ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969
Seria: MECHANIKA z. 40 Nr kol. 260

TADEUSZ LAMBER, JÓZEF WOJNAROWSKI

NAPRĘŻENIA WŁASNE W STALOWYCH DRUTACH CIĄGNIONYCH D55, D57 I D85

Streszczenie. Na podstawie pomiaru strzałek ugięcia drutów, pojawiających się przy sukcesywnym zbieraniu materiału cienkimi podłużnymi warstwami aż do połowy średnicy, określono wartości naprężeń własnych w drutach o symbolu D55, D75 i D85[1]. Badania przeprowadzono na odcinkach drutów o średnicach 3,5 mm i 4 mm.

Celem stwierdzenia wpływu prostowania drutu na wielkość naprężeń własnych przeprowadzono badania na prostowanych i nieprostowanych odcinkach drutu D55.

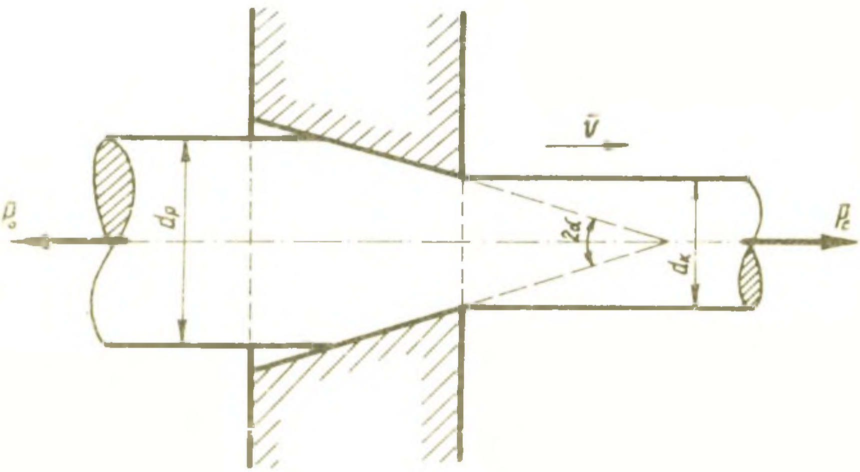
1. Wstęp

Druty uzyskuje się na ogół przez przeróbkę plastyczną zwaną procesem ciągnienia. Proces ten polega na plastycznym kształtowaniu za pomocą przeciągania metalu przez ciągadło (rys. 1). W wyniku takiego procesu zachodzi duże odkształcenie plastyczne całej objętości materiału, które jest możliwe, ponieważ izotropowa składowa tensora naprężeń $\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{ii}$ charakteryzująca stan naprężenia w drucie podczas przeciągania jest ujemna. Warunki brzegowe na powierzchni styku metalu z ciągadłem,

[1] Oznaczenia wg PN-65/M-80057

powodują niejednorodny stan odkształcenia w przekroju drutu i wywołują pojawienie się w nim naprężeń własnych.

Przedmiotem pracy jest określenie naprężeń własnych w ciągnionych drutach stalowych D55 o średnicy 4,0 mm oraz D75 i D85 o średnicy 3,5 mm. Naprężenia te mają istotny wpływ na wartości granicznych obciążeń.



Rys. 1. Schemat ciągnienia drutu przez ciągadło

2. Naprężenia własne w ciałach izotropowych

W rozwiązaniach przyjmujemy, że drut po osiowo symetrycznej deformacji jest ośrodkiem jednorodnym i izotropowym. W wyniku plastycznego płynięcia w procesie ciągnienia w drucie zostaje nagromadzona energia sprężysta, która determinuje rozkład naprężeń własnych.

W zależności od rozmiarów rozważanego obszaru ciała N.N. Dawidienkow [1] dzieli naprężenia własne na:

1) naprężenia I-rodzaju, zwane makronaprężeniami, równoważące się w obszarach równych rozmiarom całego ciała (w makroobjętości),
2) naprężenia II-rodzaju równoważące się w obszarach ziarn (w mikroobjętości),
3) naprężenia III-rodzaju, równoważące się w obszarach poszczególnych sieci krystalicznych (w submikroobjętości).

Pomimo kontrowersyjnych poglądów na taki podział naprężeń własnych można przyjąć, że ze względu na wymiary geometryczne rozważanego obszaru jest on poprawny.

Cechą naprężeń własnych jest to, że odkształcenia powstające w wyniku usunięcia tych naprężeń są zawsze czysto sprężyste, nawet jeśli naprężenia własne powstają na skutek plastycznej deformacji.

Rozważmy ogólny przypadek ośrodka ciągłego z naprężeniami własnymi, które pozostają w ciele po usunięciu sił zewnętrznych i z pominięciem sił masowych. Dla opisania pola odkształceń i pola naprężeń, wprowadzamy dwa układy współrzędnych. Pierwszy określa przestrzeń, drugi związany jest z ośrodkiem.

Niech u_i, φ_{ij}, i σ^{ij} oznaczają odpowiednio składowe: wektora przemieszczeń $\bar{u}$, tensora odkształceń $\underline{\varphi}$, tensora naprężeń własnych $\underline{\sigma}$ i tensora gęstości źródeł naprężeń własnych $\underline{\eta}$, określone w przestrzeni Euklidesa R_3 z brzegiem $\bar{R}$.

Pole naprężeń własnych liniowej statycznej teorii sprężystości w niezmienniczej formie opisujemy [2]:

- równaniami równowagi

$$\nabla_j \sigma^{ij} = 0, \qquad \sigma^{ij} = \sigma^{ji\,1)}, \tag{2.1}$$

gdzie ∇_j - pochodna kowariantna;

1) Wskaźniki i, j, k, l, m, n przebiegają ciąg 1, 2, 3.

- równaniami wiążącymi tensor odkształceń z tensorem gęstości źródeł naprężeń własnych

$$\epsilon^{ikm}\,\epsilon^{jln}\,\nabla_k\,\nabla_l\,\gamma_{mn} = \eta^{ij}, \qquad (2.2)$$

gdzie ϵ^{ikm}, ϵ^{jln} - symbole Ricciego (por. [3] str. 84);

- równaniami fizycznymi określającymi związek między tensorem odkształceń i naprężeń

$$\gamma_{mn} = \frac{1}{E}\left[(1+\nu)\,g_{im}\,g_{jn} - \nu g_{ij}\,g_{mn}\right]\sigma^{ij}, \qquad (2.3)$$

gdzie:

E - moduł Younga,

ν - współczynnik Poissona,

g_{im} - składowe tensora metrycznego;

- warunkami brzegowymi

$$n_j\,\sigma^{ij} = 0,$$

gdzie n_j - współrzędne jednostkowego wektora normalnego do zewnętrznej powierzchni.

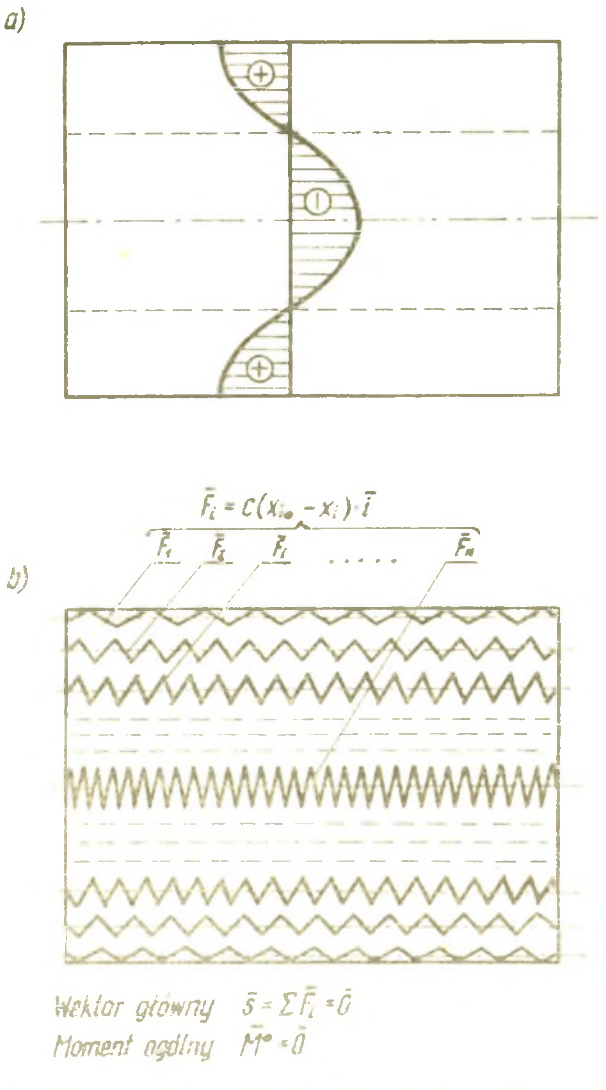
Zauważmy, że operacja $\nabla_j\,\sigma^{ij}$ jest równoważna działaniu div $\underline{\sigma}$, a zatem pierwsze z równości (2.1) świadczy o tym, że pole naprężeń jest bezwirowe. Podstawowe równanie pola naprężeń własnych (2.2) przedstawia fizycznie fakt, że mikroelementy objętościowe ośrodka posiadają nieciągłości punktowe, liniowe, powierzchniowe lub w całym mikro-ośrodku. Wynika stąd, że naprężenia własne związane są z niezgodnością odkształceń ośrodka i dlatego tensor $\underline{\eta}$ nazywamy tensorem niezgodności odkształceń.

Ośrodek z defektami w mikroobszarach można opisać modelem ośrodka ciągłego, jak to czynimy w kontinualnej teorii dyslokacji. W takim przypadku tensor niezgodności η oznacza, że niezgodność pola przemieszczeń $\bar{u}$ w mikroobszarach można sprowadzić do zgodności przemieszczeń w makroobszarach. Wyznaczenie zaś naprężeń własnych związane jest z określeniem tensorowego pola gęstości dyslokacji $\alpha^{ij}(x^n)$ i jest możliwe w przypadku czystych metali oraz w odniesieniu do dyslokacji o prostych konfiguracjach. Taki sposób określania naprężeń własnych można zaliczyć do metod fizykalnych.

Istnieją ponadto mechaniczne metody określania naprężeń własnych. W metodach tych również wykorzystujemy fakt, że naprężenia wewnętrzne w nieobciążonym ośrodku ciągłym mogą występować gdy warunki geometrycznej zgodności nie są spełnione. Jeśli w ośrodku ciągłym istnieją naprężenia własne, a spełnione są warunki nierozdzielności przemieszczeń to przyjmujemy, że niespełnienie warunku ciągłości zachodzi na zewnątrz rozważanego ośrodka ciągłego. Można bowiem uważać, że ciało z naprężeniami własnymi, wypełniające część przestrzeni, zostało wycięte z ośrodka ciągłego i równocześnie doznało takich odkształceń, że dla całego ośrodka ciągłego nastąpiło naruszenie warunku nierozdzielności przemieszczeń. Zatem ciągłość wyodrębnionego ciała można przyporządkować obszarowi z nieciągłościami, który znajduje się na zewnątrz tego ciała [4].

Pomiar naprężeń własnych w metodach mechanicznych oparty jest na wykorzystaniu ważnej cechy tych naprężeń, jaką jest wyrównoważanie się ich w makroobjętości. Rozkład i model osiowych naprężeń własnych w drucie ciągnionym przedstawiono na rysunku 2.

Samo przeprowadzenie badań polega na naruszeniu stanu równowagi naprężeń własnych w badanym ośrodku ciągłym przez po-



Rys. 2. Model osiowych naprężeń własnych w drucie ciągnionym

dzielenie go na pewną ilość elementów. W każdym z tych elementów ustala się nowy stan równowagi, który jest związany z takim odkształceniem, że jest niemożliwe uzyskanie pierwotnej ciągłości ciała przez ponowne złączenie tych elementów. Pomiar sprężystych odkształceń poszczególnych elementów pozwala ocenić naprężenia własne w oparciu o podstawowe równania teorii sprężystości (2.1) i (2.3), przy spełnieniu równań nierozdzielności odkształceń

$$\epsilon^{ikm}\,\epsilon^{iln}\,\nabla_k\,\nabla_l\,\gamma_{mn} = 0 \tag{2.4}$$

i warunków brzegowych

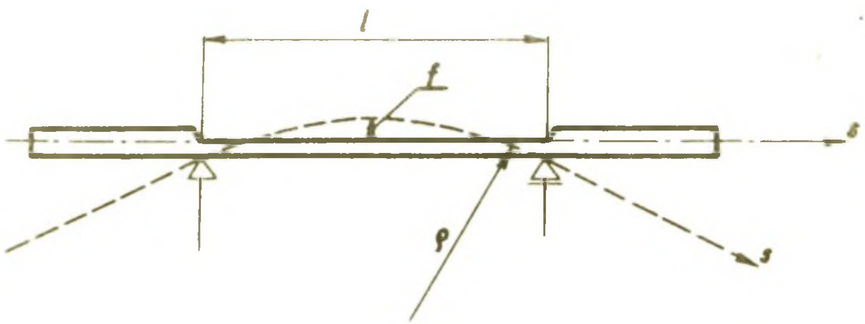
$$n_j\,\sigma^{ij} = t^j. \tag{2.5}$$

Z uwagi na to, że makronaprężenia decydują w ocenie wytrzymałości konstrukcji, metody pozwalające określić naprężenia własne w makroobszarach posiadają istotne znaczenie ze względu na możliwość dobranie najbardziej właściwych warunków procesu technologicznego.

3. Ustalenie metody badania

Wśród różnorodnych mechanicznych metod pomiaru naprężeń własnych za najbardziej odpowiednią dla drutów należy uznać metodę Sachsa i Linicusa [5]. Polega ona na naruszeniu równowagi naprężeń własnych przez skrawanie drutu na pewnej długości do połowy jej średnicy i pomiarze strzałki ugięcia f pozostałej części (rys. 3). Zmierzone strzałki ugięcia pozwalają, przy pewnych założeniach upraszczających (liniowy rozkład naprężeń własnych), na określenie osiowych naprężeń własnych drutu.

Warto podkreślić, że przeprowadzone bardziej złożonymi metodami pomiary rozkładu osiowych naprężeń własnych drutu [6] wykazały nieliniowy ich rozkład, różniący się w znacznym stopniu od rozkładów przyjętych w metodzie Sachsa - Linicusa. Znamienne jest jednak to, że osiowe naprężenia własne w warstwie



Rys. 3. Ugięcie drutu po zeszlifowaniu do połowy średnicy na długości l

zewnętrznej drutu wyznaczone tą metodą różnią się tylko nieznacznie od rzeczywistych z tym, że z reguły naprężenia na powierzchni obliczone metodą Sachsa - Linicusa są nieco większe od rzeczywistych [6]. Fakt ten upoważnia do stosowania metody Sachsa - Linicusa przy określaniu osiowych naprężeń własnych na powierzchni drutu. Zauważmy jeszcze, że naprężenia własne wywołują rozciąganie w warstwach powierzchniowych drutu i w wyniku superpozycji z naprężeniami od obciążeń zewnętrznych wpływają na wcześniejsze osiągnięcie granicznych wartości wytężenia materiału w tych warstwach. Potwierdza to obserwacja miejsc powstawania pęknięć w drucie, które z reguły zaczynają się od warstw powierzchniowych. Pęknięcia powierzchniowe drutu jeszcze wyraźniej występują przy obciążeniach zmiennych. Z tych to względów w pracy ograniczono się do określenia naprężeń własnych tylko w warstwach powierzchniowych drutu, stosując w realizacji metodę Sachsa-Linicusa.

4. Sposób przeprowadzenia badań

Klasyczna metoda Sachsa-Linicusa, stosowana i przez innych badaczy, polega na zaburzeniu stanu równowagi naprężeń własnych w badanych drutach przez odpowiednie stoczenie lub sfrezowanie drutów do połowy średnicy. Metoda taka nastręcza duże trudności techniczne z powodu małej średnicy drutu. Trudności te w niniejszej pracy pokonano zastępując staczanie drutów szlifowaniem bardzo cienkich podłużnych warstw drutu o grubości $\delta = 0{,}01$ mm[1)] przy zastosowaniu urządzenia do zamocowywania drutu oryginalnej konstrukcji. Urządzenie mocujące drut jest w tej metodzie jednym z głównych elementów, stanowiącym o poprawności badań. Konstrukcja urządzenia (rys. 4) eliminowała jakiekolwiek przemieszczenia i odkształcenia drutu w czasie szlifowania oraz zezwalała na mocowanie drutów zakrzywionych nieprostowanych i prostych.

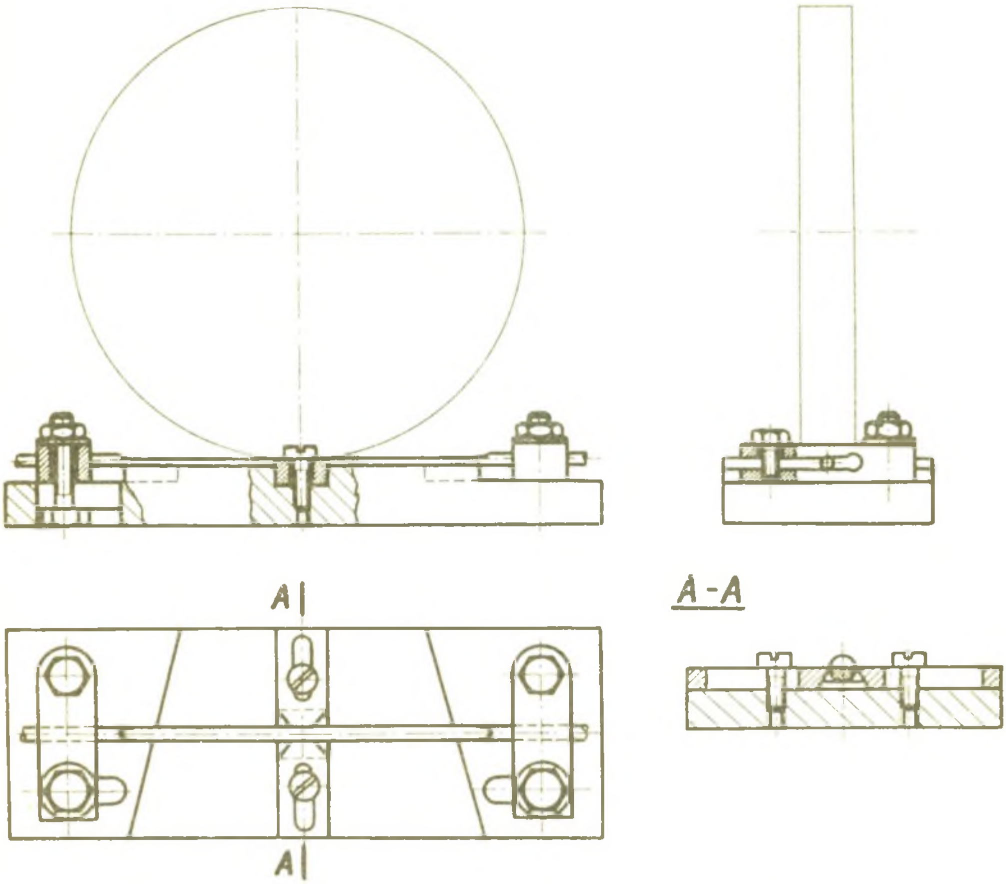
Do badań przygotowano 3 grupy próbek, a w szczególności

1) 36 próbek z drutu o średnicy 4,0 mm - gatunek D55,
2) 18 próbek z drutu o średnicy 3,5 mm - gatunek D75,
3) 18 próbek z drutu o średnicy 3,5 mm - gatunek D85.

Poszczególne grupy próbek pobierane były z jednego odcinka drutu, celem zmniejszenia rozrzutów w wynikach badań. Połowę próbek pierwszej grupy badano o osi zakrzywionej, drugą połowę badano po wyprostowaniu drewnianym młotkiem na metalowej płycie. Odrzucono z badań te próbki, których uszkodzenia powierzchniowe były widoczne pod mikroskopem warsztatowym. Długości wszystkich próbek wynosiły 120 mm. Średnice próbek mierzono z dokładnością 0,01 mm (tablica 1).

---

1) Przy szlifowaniu cienkich warstw zaburzenie w rozkładzie naprężeń własnych jest nieznaczne [7].



Rys. 4. Konstrukcja urządzenia do mocowania drutu

Tablica 1

Strzałki ugięcia próbek f [mm]

Charakterystyka próbki	Numer próbki				
	1	2	3	4	5
D55, d = 4,01 mm nieprostowane	0,61	0,61	0,50	0,50	0,50
D55, d = 4,01 mm prostowane	0,84	0,95	0,96	0,97	0,97
D75, d = 3,49 mm prostowane	1,54	1,90	2,10	1,40	1,44
D85, d = 3,51 mm nieprostowane	4,41	4,51	4,40	4,15	4,20

Poszczególne odcinki drutów mocowano najpierw w specjalnych uchwytach (rys. 4) mających na celu ustawienie drutu w tym samym miejscu po każdorazowym jego wymontowywaniu. Uchwyty te umożliwiały również pomiar ugięcia w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach drutów zakrzywionych oraz kąta skręcenia drutów prostych i zakrzywionych. Uchwyty wraz z drutem mocowane były w zasadniczym urządzeniu, które stawiano na stole elektromagnetycznej szlifierki typu SPC20, przystosowanej do szlifowania płaskich powierzchni obwodem ściernicy. Warstwy zeszlifowano ściernicą elektrokorundową o szerokości 20 mm i średnicy 150 mm przy 2280 obr/min oraz szybkości przesuwu wzdłużnego 3 m/min. Długość pomiarowa szlifowanej warstwy drutu wynosiła l = 100 mm (rys. 3). Grubość warstwy zbieranej przy każdorazowym przesuwie wynosiła 0,01 mm. Tak małą grubość zbieranych warstw przyjęto zarówno ze względu na uniknięcie zaburzeń w rozkładzie naprężeń własnych wywołanych wzrostem temperatury, jak również w celu ustalenia rozkładu naprężeń własnych wzdłuż promienia drutu. Eliminowano te druty, które w czasie szlifowania uległy uszkodzeniom dostrzegalnym pod mikroskopem warsztatowym.

Po zeszlifowaniu 175 warstw dla każdej próbki wykonanej z drutu o średnicy 3,5 mm oraz 200 warstw dla każdej próbki wykonanej z drutu o średnicy 4 mm uzyskiwano próbki o przekroju półkola, które po wymontowaniu wraz z uchwytami z urządzenia mocującego wyginały się przechodząc w drut o osi płaskiej leżącej w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni szlifowania. Pomiar strzałki ugięcia f dokonywano na mikroskopie warsztatowym firmy Zeiss w płaszczyźnie osi wygiętego drutu. Dokładność pomiaru wynosiła 0,005 mm, co stanowiło pół działki elementarnej na bębnie śruby mikrometrycznej mikroskopu. Ilość szlifowanych próbek z poszczególnych rodzajów drutu oraz szczegółowe wyniki pomiarów strzałek zestawiono w tablicy 1. Przedstawione pomiary ujmują ugięcia drutów w jednej płaszczyźnie i tylko dla przypadku zeszlifowania drutu do połowy jego średnicy. W opracowaniu jest rozkład naprężeń własnych wzdłuż średnicy drutu wyznaczany przez pomiar ugięcia i kątów skręceń po każdorazowym zeszlifowaniu warstwy.

5. Podstawowe informacje o badanych drutach

Duży wpływ na wielkość i znak naprężeń własnych w warstwie zewnętrznej posiada historia technologii drutu. Z tych względów przy określaniu naprężeń własnych równolegle z informacjami o własnościach wytrzymałościowych i strukturalnych należy podać również dane o technologii drutu.

Druty D55 o średnicy 4,0 mm wykonane były z walcówki o średnicy wyjściowej 5,5 mm, którą trzykrotnie przeciągano z częściowymi zgniotami, po około 19% przez oczka o kącie zgniatającym $2\alpha = 12^{\circ}$. Szybkość ciągnienia wynosiła 1,7 m/s.

Drut D75 o średnicy 3,5 mm wykonany był w warunkach analogicznych.

Drut D85 o średnicy 3,5 mm wykonany był z walcówki o średnicy wyjściowej 7,0 mm przez sześciokrotne przeciąganie z częściowymi zgniotami po około 19% przez oczka o kącie zgniatającym $2\alpha = 12^{\circ}$. We wszystkich przypadkach środkiem smarującym w czasie ciągnienia był rozpuszczony w wodzie proszek mydlany z dodatkiem 10% grafitu.

Badane druty wykonane były ze stali węglowej, w której procentowe zawartości poszczególnych składników były zgodne z normą PN-65/M-80057. Wyniki analizy chemicznej zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Procentowe zawartości poszczególnych składników dla różnych gatunków drutu

Oznaczenie drutu	C %	S_i %	S %	P %	M_n %
D55	0,55	0,25	0,017	0,020	0,42
D75	0,76	0,24	0,025	0,021	0,41
D85	0,89	0,22	0,024	0,020	0,42

Własności mechaniczne drutów wyznaczono przeprowadzając próbę rozciągania na trzech drutach z każdej serii próbek. Średnie wartości wyników dla poszczególnych serii próbek zestawiono w tablicy 3. Wszystkie badane druty w czasie procesu wytwarzania były poddane patentowaniu dzięki czemu uzyskały strukturę sorbityczną.

Tablica 3

Własności mechaniczne drutów w gatunku D55, D75 i D85

Oznaczenie drutu	d_o mm	R_m śr kG/mm^2	A_5 %	Z %	Uwagi
D55	4,0	102,6	9,0	26,6	drut nieprostowany
D55	4,0	103,8	10,3	29,3	drut prostowany
D75	3,5	177,5	5,0	44,0	drut nieprostowany
D75	3,5	172,0	5,0	49,0	drut prostowany
D85	3,45	193,8	10,0	52,0	drut nieprostowany
D85	3,45	188,5	9,5	52,0	drut prostowany

6. Opracowanie wyników badań

Określenie naprężeń własnych w oparciu o zastosowaną metodę jest związane z następującymi założeniami:

1 - stan naprężenia przed zeszlifowaniem jest osiowo-symetryczny,

2 - naprężenia obwodowe nie wpływają na ugięcie drutu,

3 - uwzględnia się tylko naprężenia osiowe $\sigma_{33} = \sigma_z(r)$,

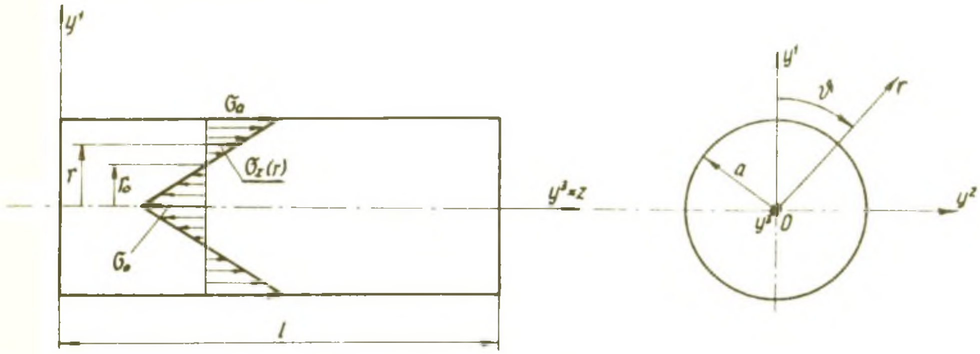
4 - drut wygina się bez udziału siły poprzecznej,

5 - rozkład osiowych naprężeń zmienia się liniowo wraz z promieniem drutu.

Jeśli rozważymy prosty drut o długości l i promieniu a z naprężeniami własnymi i przyjmiemy cylindryczny układ współrzędnych związany z drutem (rys. 5), to przed zdeformowaniem drutu

$$\left.\begin{array}{l} x^{(1)} = r, \quad x^{(2)} = \vartheta, \quad x^{(3)} = z; \\ y^{(1)} = r \cos\vartheta, \quad y^{(2)} = r \sin\vartheta, \quad y^{(3)} = z \end{array}\right\} \qquad (6.1)$$

i drut zajmuje obszar $r \leqslant a$, $0 \leqslant z \leqslant l$.



Rys. 5. Zrównoważony rozkład naprężeń własnych w drucie

Z zależności (6.1) wynika, że składowe kowariantnego i kontrawariantnego tensora metrycznego przyjmują postać:

$$g_{ik} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}, \quad g^{ik} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{r^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}. \qquad (6.2)$$

Jednostkowy wektor normalny do walcowej powierzchni zewnętrznej drutu

$$\bar{n} = \frac{\bar{g}^1}{\sqrt{g^{11}}} = \bar{g}^1, \qquad \bar{n}\,(1,\ 0,\ 0). \tag{6.3}$$

Jednostkowy wektor normalny do powierzchni czołowej drutu

$$\bar{n} = \frac{\bar{g}^3}{\sqrt{g^{33}}} = \bar{g}^3, \qquad \bar{n}\,(0,\ 0,\ 1). \tag{6.3a}$$

Zgodnie z założeniem 3 składowe tensora naprężeń własnych przyjmują postać

$$\sigma_{mn} = \sigma_z(r) \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}. \tag{6.4}$$

Składowe tensora odkształceń wyznaczone z równania (2.6) po uwzględnieniu (6.4) są

$$\gamma_{mn} = \frac{\sigma_z(r)}{E} \begin{Vmatrix} -\nu & 0 & 0 \\ 0 & -\nu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}. \tag{6.5}$$

Z założenia 5 wynika, że osiowe naprężenia własne (rys. 5) można wyrazić przez wartość naprężenia własnego w osi drutu σ_o lub przez wartość naprężenia własnego zewnętrznej warstwy drutu σ_a. Rozkład tych naprężeń opisują równania

$$\sigma_z(r) = B\,r - \sigma_o\,, \tag{6.6}$$

lub

$$\sigma_z(r) = \sigma_a\,\frac{r - r_o}{a - r_o}\,, \tag{6.7}$$

gdzie:

B – stała, którą wyrażamy w zależności od własności geometrycznych i reologicznych drutu,

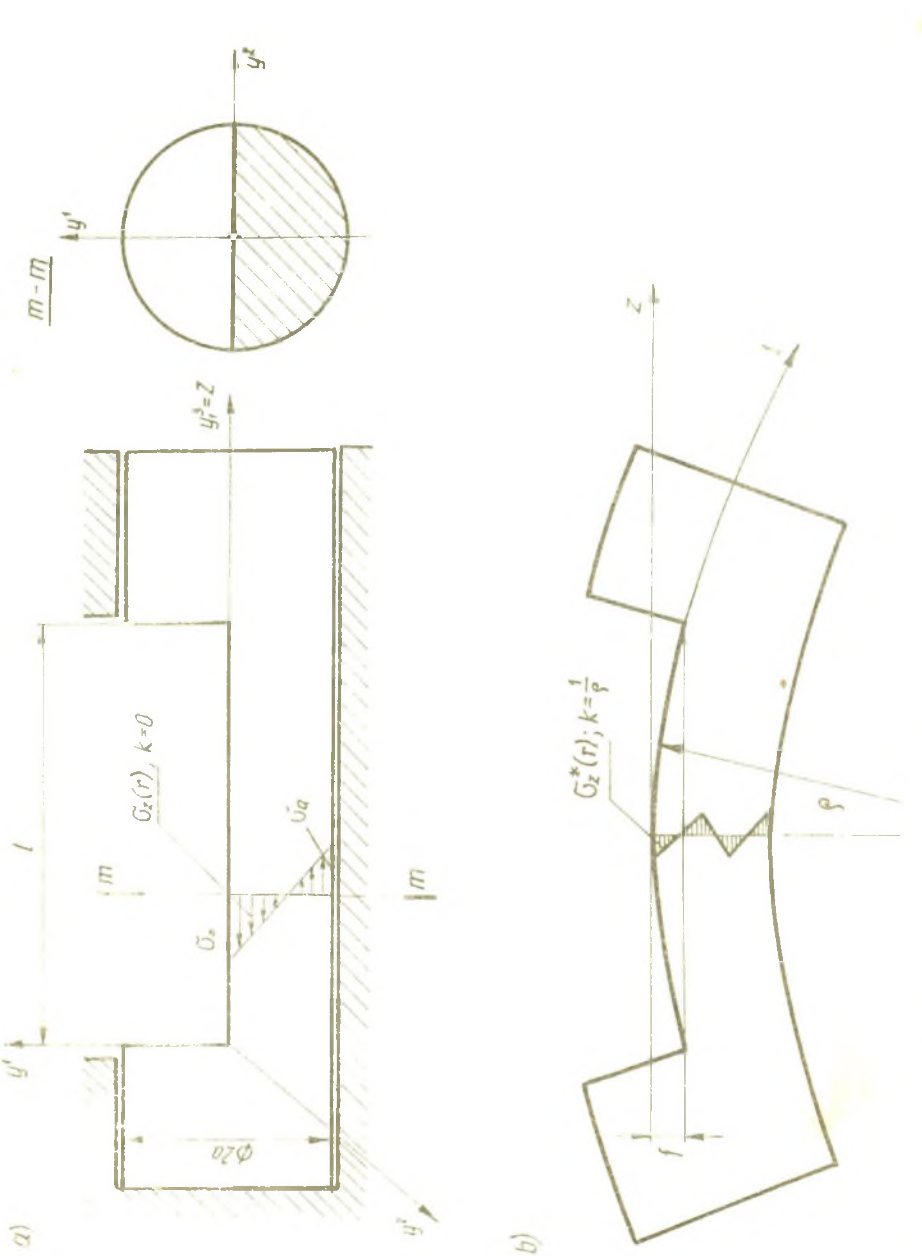
r_o – promień, przy którym naprężenia własne zmieniają znak.

Jak łatwo stwierdzić pole naprężeń określone równaniem (6.6) lub (6.7) spełnia równania (2.1).

Przez zeszlifowanie warstw drutu aż do połowy średnicy nastąpi zaburzenie stanu równowagi osiowych naprężeń własnych i jeśli drut pozostaje w uchwytach jak na rys. 6a, to wektor główny naprężeń własnych nieskrojonej części drutu będzie wektorem zerowym, natomiast moment ogólny układu sił pochodzących od tych naprężeń będzie różny od zera. Z chwilą wyjęcia nieskrojonej części drutu z uchwytów następuje ustalenie się nowego stanu równowagi naprężeń własnych tej części drutu (rys. 6b). Przejawem tego jest zgięcie niezeszlifowanej części drutu, które możemy określić promieniem krzywizny ρ i strzałką ugięcia f (rys. 6b). Pomiar jednej z tych wielkości pozwala na określenie pola naprężeń własnych. Doświadczalnie stwierdzono, że strzałka ugięcia jest bardzo mała w porównaniu z promieniem krzywizny ρ, wobec czego można przyjąć

$$\rho \approx \frac{l^2}{8f}\,. \tag{6.8}$$

Gdybyśmy nie chcieli dopuścić do zgięcia niezeszlifowanej części drutu po wyjęciu go z uchwytów, to do jego końców należałoby przyłożyć parę sił o momencie $\bar{M}_y$, która wywołałaby czyste



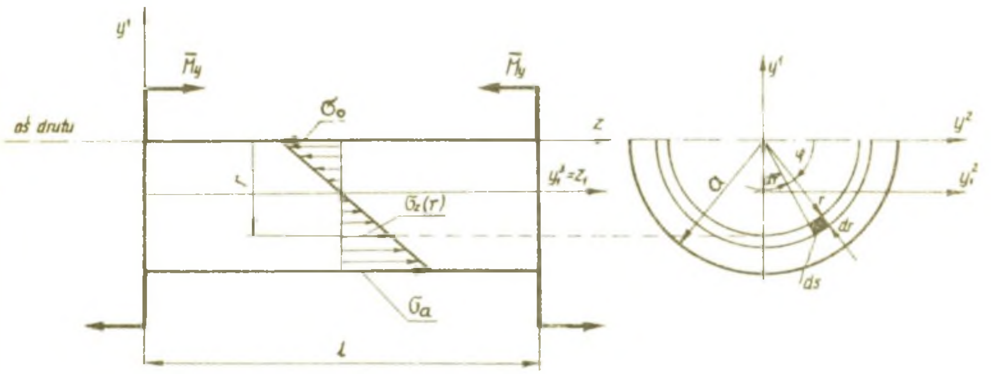
Rys. 6. Niezrównoważony (a) i zrównoważony (b) rozkład osiowych naprężeń w niezeszlifowanej części drutu

zginanie w płaszczyźnie głównej osi bezwładności pola poprzecznego przekroju drutu (rys. 7). Wartość strzałki ugięcia, odpowiadającą momentowi $\bar{M}_y$ wyznaczamy, albo wychodząc ze składowych tensora odkształceń (6.5), albo przez całkowanie równania osi ugiętej z uwzględnieniem warunków brzegowych. Wtedy w dowolnym przekroju drutu moment zginający równa się

$$M_y = \frac{E\, J_{y_1}^{(2)}}{\varrho} \tag{6.9}$$

a wykorzystując zależność (6.8) otrzymujemy

$$M_y = \frac{8\, E\, J_{y_1}^{(2)}}{l^2} \cdot f, \tag{6.10}$$



Rys. 7. Schemat obciążenia niezeszlifowanej części drutu

gdzie:

$$J_{y_1^{(2)}} = \frac{\pi r^4}{8} - \frac{8\, r^4}{9\pi} \cong 0{,}1094\ a^4$$

moment bezwładności pola poprzecznego przekroju drutu niezeszlifowanego względem osi obojętnej $y_1^{(2)}$. Moment $\bar{M}_y$ musi być równy momentowi ogólnemu układu sił osiowych pochodzących od naprężeń własnych pozostałej części przekroju drutu. Wykorzystując to, warunki równowagi przyjmą postać

$$\left.\begin{aligned} &\int_0^{\pi}\int_0^{a} \sigma_z(r)\ .\ r\ .\ dr\ d\varphi = 0, \\ &\int_0^{\pi}\int_0^{a} \sigma_z(r)\ r^2\ .\ \sin\varphi\, dr\ .\ d\varphi - \bar{M}_y = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (6.11)$$

Podstawiając (6.5) i (6.10) w równania (6.11) otrzymujemy

$$r_o = \frac{2}{3}\, a \qquad (6.12)$$

oraz

$$\sigma_a = \frac{48\ E\ J_{y_1^{(2)}}}{l^2\ a^3}\ f. \qquad (6.13)$$

W oparciu o równanie (6.13) i wyniki pomiarów strzałek ugięcia (tabl. 1) obliczono wartości osiowych naprężeń własnych w zewnętrznej warstwie. W obliczeniach poszczególnych gatunków drutu przyjęto moduł Younga $E = 2{,}1\ .\ 10^6\ kG/cm^2$. Szczegółowe wyniki zestawiono w tablicach 4 i 5.

Tablica 4

Zestawienie osiowych naprężeń własnych w drutach D55

Średnica drutu 2a = 2,01 mm.

Moment bezwładności pola poprzecznego przekroju drutu niezeszlifowanego $I_{y_1^{(2)}} = 1{,}7914\ mm^4$.

Lp.	D55 nieprostowany		D55 prostowany	
	f mm	σ_a kG/mm^2	f mm	σ_a kG/mm^2
1	0,61	13,57	0,84	18,68
2	0,61	13,57	0,95	21,15
3	0,50	11,12	0,96	21,35
4	0,50	11,12	0,97	21,57
5	0,50	11,12	0,97	21,57

$\sigma_{a,śr} = 12{,}10\ kG/mm^2$ $\sigma_{a,śr} = 20{,}86\ kG/mm^2$

s = 1,715 s = 1,480

$\sigma_{a,śr}$ - średnie naprężenie

s - odchylenie standardowe.

Tablica 5

Zestawienie osiowych naprężeń własnych w drutach D75 i D85

Średnica drutu 2a = 3,50 mm.
Moment bezwładności pola poprzecznego przekroju drutu niezeszlifowanego $I_{y_1}^{(2)} = 1{,}0294$ mm^4.

Lp.	D75 prostowany		D85 nieprostowany	
	f mm	kG/mm^2	f mm	kG/mm^2
1	1,54	29,81	4,41	85,38
2	1,90	36,78	4,51	87,31
3	1,85	34,19	4,40	85,18
4	1,40	27,10	4,15	79,76
5	1,44	27,88	4,20	81,31

$\sigma_{a,śr} = 31{,}15$ kG/mm^2 $\qquad$ $\sigma_{a,śr} = 83{,}79$ kG/mm^2

s = 2,945 $\qquad$ s = 2,551

$\sigma_{a,śr}$ - średnie naprężenie, s - odchylenie standardowe.

7. Wnioski

1. Metoda Sachsa-Linicusa pozwala z dostateczną dla praktyki dokładnością określić osiowe naprężenie własne w warstwie zewnętrznej drutu.

2. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono znaczne wartości naprężeń własnych w warstwach zewnętrznych badanych drutów (tablice 4 i 5).

3. Największe wartości naprężeń własnych wykazały druty D85. Zjawisko to wyjaśnia przyczynę spadku wytrzymałości zmęczeniowej drutów stalowych o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie.

4. Z przeprowadzonych badań wynika, że druty D75 w porównaniu z drutami D85 mają zbliżone wytrzymałości na rozciąganie, natomiast około 2,5 razy mniejsze naprężenia własne w warstwie zewnętrznej (tablice 3 i 5). Na elementy konstrukcyjne pracujące przy obciążeniach zmiennych należy więc spośród tych drutów stosować druty D75.

5. Warunki ciągnienia oraz dodatkowa mechaniczna obróbka drutu przez ciągnienie o małym zgniocie zmniejsza osiowe naprężenia własne w warstwie zewnętrznej. Mechaniczna obróbka drutu przez prostowanie drewnianym młotkiem na metalowej płycie, nawet przy zachowaniu dużej ostrożności powoduje wzrost naprężeń własnych w warstwie zewnętrznej drutu (tablica 4). Ma to szczególne znaczenie podczas przygotowywania próbek z drutu do badań laboratoryjnych, a zwłaszcza do badań na zmęczenie.

LITERATURA

[1] Gajdučenko B.J.: Ostatočnyje napriaženija i ustałost prowołoki, Materiały naučno-proizwodstwiennowo seminara 27-29 sentabria 1965, Odessa-Moskva, 1967.

[2] Kröner E.: Kontinuumstheorie der Versetzungen und Eigenspannungen, Berlin, 1958.

[3] Gołąb St.: Rachunek tensorowy, PWN 1956.

[4] Kröner E.: Die innere Spanungen und der Inkompatibilitätstensor in der Elastizitätstheorie, Z.f. angew. Physik, 1955, str. 249.

[5] Linicus W., Sachs G.,: Versuche über die Eigenschaften gezogenen Drähte und den Kraftbedarf beim Ziehen - Spanlose Formung der Metalle, Berlin, 1931.

[6] Bühler H. und Jürgen P.: Einfaches Verfahren zum Ermitteln von Eigenspannungen in Drähten, Archiv für das Eisenhüttenwesen Nr 7, 1968, str. 545-551.

[7] Sinajskij W.M., Rowinskij B.M.: Ob ostatočnych napriaženijach woznikajuščih pri šlifowanii metałłov, Izw. AN SSSR nr 3, 1963.

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СТАЛЬНОЙ ТЯНУТОЙ ПРОВОЛОКЕ Д55, Д75 И Д85

Р е з ю м е

На основании измерения стрелок прогиба проволоки при постепенном собирании материала тонкими продольными слоями вплоть до половины диаметра, были определены величины остаточных напряжений в проволоках Д55, Д75 и Д85. Исследования проводились на отрезках проволоки диаметром в /, : и " мм.

Для установления влияиия правки проволоки на величину остаточных напряжений были проведены исследования на правленных и неправленных кусках проволоки Д55.

RESIDUAL STRESSES IN STEEL HARD-DRAWN WIRES D55, D75 AND D85

S u m m a r y

Axial residual stresses in a wire D55, D75 and D85 were found by the measurement of the maximum deflections occuring after the successive removal of thin uniform layres of material from the wire until to half of its diameter. Investigations were carried on the pieces of wires of 3,5 mm and 4 mm diameter.

In order to see the influence of straightening of wire on the magnitude of residual stresses some investigations were carried on the straightened and unstraightened pieces of wires D55.