

P.3353 / 72

# HUTNICTWO z. 2

LESZEK GODECKI

**ANALIZA PRZYCZYN POWSTAWANIA ROZWARSTWIEN  
POWIERZCHNIOWYCH DRUTÓW SPRĘŻYNOWYCH  
ZE STALI WYSOKOWĘGLOWYCH PODCZAS PBÓBY SKRĘCANIA**

**P O L I T E C H N I K A Ś L Ą S K A  
ZESZYT NAUKOWY Nr 316 – GLIWICE 1972**

## SPIS TREŚCI

1. Wstęp . . . . .	3
2. Zjawiska zachodzące przy skręcaniu drutów stalowych . . . . .	4
3. Wpływ gniotów pojedynczych i gniotu sumarycznego na podatność do rozwarstwień przy skręcaniu . . . . .	20
4. Zmiany strukturalne drutów ze stali wysokowęglowych w procesie ciągnięcia . . . . .	26
5. Wpływ układu ciągów i kąta ciągnięcia na podatność do rozwarstwień przy skręcaniu . . . . .	36
6. Wpływ odpuszczania i prostowania na podatność do rozwarstwień w czasie skręcania . . . . .	40
7. Wpływ naprężeń własnych na podatność do rozwarstwień przy skręcaniu . . . . .	44
8. Omówienie całości wyników badań . . . . .	49
9. Wnioski końcowe . . . . .	53
Zakończenie . . . . .	55
Literatura . . . . .	58
Tablice . . . . .	61



**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

**ZESZYTY NAUKOWE**

P.3353 | 72

Nr 316

**LESZEK GODECKI**

**ANALIZA PRZYCZYŃ POWSTAWANIA ROZWARSTWIŃ  
POWIERZCHNIOWYCH DRUTÓW SPRĘŻYNOWYCH  
ZE STALI WYSOKOWĘGLOWYCH PODCZAS PRÓBY SKRĘCANIA**

**PRACA HABILITACYJNA Nr 107**

Przewód habilitacyjny otwarto w dniu 3 marca 1970 r.

---

**GLIWICE 1972**

REDAKTOR NACZELNY ZESZYTÓW NAUKOWYCH  
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

*Fryderyk Staub*

REDAKTOR DZIAŁU

*Adolf Maciejny*

SEKRETARZ REDAKCJI

*Witold Gużkowski*

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej  
Gliwice, ul. Kujawska 2

---

Nakł 60+170 Ark wyd. 4 Ark. druk. 3,94 Papier offsetowy kl. III, 70×100, 80 g  
Oddano do druku 4.10.1971 Podpis. do druku 11.12.1972 Druk ukoń. w styczniu 1972  
Zam. 1210 12. 8. 1971 C-22 Cena zł 5,-

---

Skład, fotokopie, druk i oprawę  
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

PJ-77/72

## 1. WSTĘP

Druty sprężynowe ze stali węglowych stosowane do wyrobu sprężyn, pracujących w ciężkich warunkach zmęczeniowych, po próbie skrećania nie powinny wykazywać spiralnych rozwarstwień powierzchniowych, a złom ich powinien być gładki i prostopadły do osi drutu. Warunek ten jest szczególnie uciążliwy dla producentów drutu, ponieważ zagadnienie rozwarstwiania się drutów przy skrećaniu nie jest dotychczas w sposób wystarczający przebadane. Nie wiadomo dokładnie, co jest przyczyną rozwarstwiania i jak należy prowadzić proces technologiczny, aby go uniknąć. Literatura na ten temat jest uboga i w zasadzie ogranicza się do ogólnych uwag zaczerpniętych z praktyki ruchowej.

Problem rozwarstwień powierzchniowych drutów przy skrećaniu odgrywa również dużą rolę przy opracowywaniu technologii produkcji drutów o najwyższych możliwych wytrzymałościach będących obecnie przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych i przemysłowych w świecie.

Celem badań omówionych w niniejszej pracy było udzielenie odpowiedzi na dwa następujące podstawowe pytania:

- jaka jest natura i jakie są przyczyny teoretyczne rozwarstwiania się drutów w czasie próby skrećania?
- jak należy prowadzić proces technologiczny produkcji drutów, aby uniknąć rozwarstwiania się ich przy próbie skrećania?

Przeanalizowano stan naprężeń i zjawiska występujące przy skrećaniu drutów oraz charakter krzywych skrećania. Zbadano wpływ gniotu sumarycznego, gniotów pojedynczych, układu ciągów, kąta ciągnięcia i końcowej obróbki gotowych drutów (odpuszczanie i przostowanie) na własności mechaniczne i podatność do rozwarstwień powierzchniowych przy skrećaniu. Stwierdzono istotny wpływ struktury drutu po ciągnięciu, naprężeń własnych i zjawiska starzenia na skłonność do rozwarstwień.

Całość badań została szczegółowo omówiona w 9 sprawozdaniach autora z prac naukowo-badawczych Centralnego Laboratorium Przemysłu Wyrobów Metalowych w Zabrze [1] do [9].

Część badań została opublikowana w Anglii w czasopiśmie "Wire Industry" [10] do [14] i w "Biuletynie Technicznym ZPVM" [15] do [19]. Niniejsza praca stanowi zwarte kompleksowe ujęcie całości badań z ogólnym omówieniem wyników.

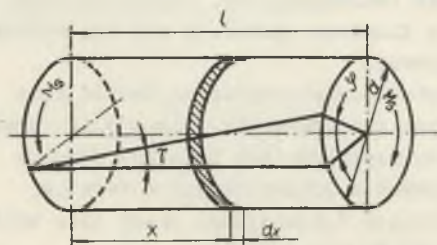
Badania przeprowadził autor w Centralnym Laboratorium Przemysłu Wrobów Metalowych w Zabrze, w Katedrze Mechaniki Technicznej i w Katedrze Metaloznawstwa Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej oraz w BISRA (British Iron and Steel Research Association) i w "Spring Research Association" w Sheffield w czasie pobytu w Anglii na stypendium naukowym ONZ.

## 2. ZJAWISKA ZACHODZĄCE PRZY SKRĘCANIU DRUTÓW STALOWYCH

### 2.1. Rodzaje złomów przy skręcaniu

Teoria skręcania pryzmatycznych sztywnych prętów okrągłych opiera się na następujących założeniach:

- Wszystkie tworzące pręta doznają jednego i tego samego skręcenia o kąt  $\varphi$  (rys. 1).



Rys. 1. Schemat skręcania prętów okrągłych

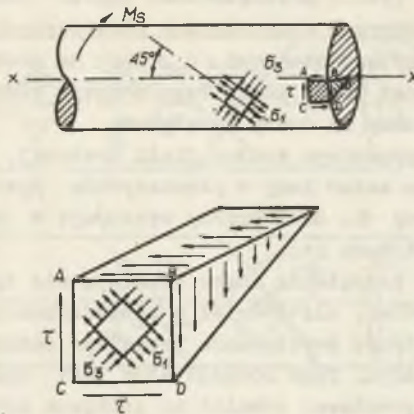
- Każdy przekrój poprzeczny pręta obraca się względem swojej osi w stosunku do przekroju sąsiedniego o kąt skręcenia  $\varphi$ . Wielkość tego kąta jest proporcjonalna do wielkości momentu skręcającego  $M_g$  oraz do odległości między obu przekrojami (rys. 1).
- Przekroje poprzeczne po skręceniu pręta o kąt  $\varphi$  pozostają płaskie i normalne do osi pręta.
- Odległości między sąsiednimi przekrojami w czasie skręcania nie ulegają zmianie (odległość  $dx$  na rys. 1).

W dowolnym punkcie przekroju poprzecznego pręta powstają w czasie skręcania naprężenia styczne określone wzorem:

$$\tau = \frac{M_g}{I_0} \cdot \rho \quad (1)$$

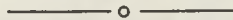
Oprócz naprężeń stycznych działających w przekrojach poprzecznych występują równocześnie naprężenia styczne w przekrojach podłużnych, zgodnie z prawem równości naprężeń stycznych w płaszczyznach wzajemnie prostopad-

łych (rys. 2). Poprzeczne i wzdłużne przekroje są płaszczyznami w których występuje czyste ścinanie. W płaszczyznach tych nie działają naprężenia normalne.



Rys. 2. Rozkład naprężeń przy skręcaniu prętów okrągłych

Naprężenia normalne  $\sigma$  natomiast działają w przekrojach ukośnych i osiągają największe wartości w przekrojach nachylonych do osi pręta pod kątem  $45^\circ$ . Na element ABCD (rys. 2), wycięty na powierzchni pręta, działają wzdłuż jego krawędzi bocznych tylko naprężenia styczne. Natomiast w płaszczyznach nachylonych do osi pręta pod kątem  $45^\circ$  naprężenia styczne równają się zero, a wartości maksymalne osiągają naprężenia normalne.



Podręczniki wytrzymałości materiałów rozróżniają przy skręcaniu na ogół trzy rodzaje złomów:

- a) złom poślizgowy poprzeczny,
- b) złom tzw. "kruchy",
- c) złom "strzępiasty".



Rys. 3. Złom poprzeczny poślizgowy drutów sprężynowych

Złom poślizgowy poprzeczny występuje w płaszczyźnie prostopadłej do osi próbki, a więc w płaszczyźnie działania największych poprzecznych naprężeń tnących  $\tau_p$ . Na rys. 3 przedstawiono wygląd złomu drutu sprężynowego z badań autora o dobrych własnościach plastycznych. Jest to typowy złom poślizgowy wywołany naprężeniami  $\tau_p$ . Drut ma gładką powierzchnię i gładki prostopadły do osi drutu złom. Tego rodzaju złom odpowiada wymaganiom stawianym przez normy na druty sprężynowe.

Złom zwany kruchym przebiega wzdłuż linii śrubowej, nachylonej do osi próbki pod kątem  $45^\circ$ , a zatem leży w płaszczyźnie występowania maksymalnych naprężeń normalnych  $\sigma$ . Złom kruchy występuje w materiałach takich, jak żeliwo, stal zahartowana itp.

Jak podano powyżej, naprężenia tnące działają nie tylko w płaszczyźnie prostopadłej do osi próbki, ale również w płaszczyznach do niej równoległych. Wynika stąd możliwość powstawania trzeciego rodzaju złomu przy skręcaniu o kierunku wzdłużnym. Tego rodzaju złom jest charakterystyczny dla drewna [20], ale może powstawać również na próbkach metalowych o strukturze włóknistej, wyraźnie zarysowanej teksturze itp. Jest to więc również złom poślizgowy, ale wywołany naprężeniami  $\tau_w$ .



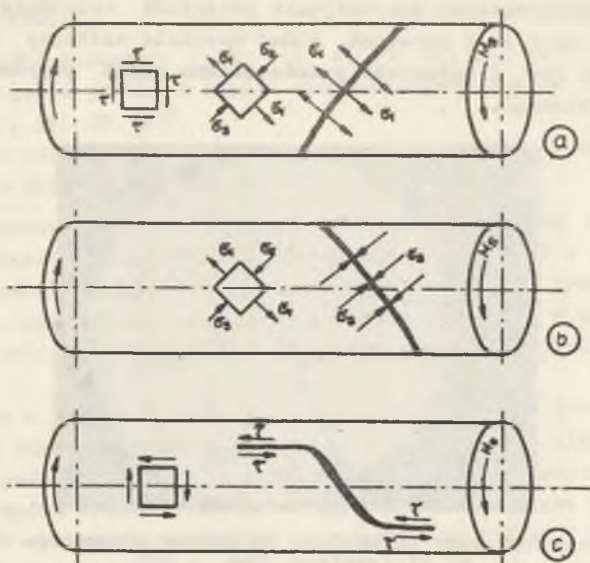
Rys. 4. Spiralne rozwarstwienie drutu sprężynowego po próbie skręcania

W niektórych pracach z zakresu ciągarstwa drutów spotyka się pogląd, że spiralne rozwarstwienia widoczne na powierzchni próbek drutów po próbie skręcania (rys. 4) są pęknięciami kruchymi. Jest to pogląd całkowicie niesłuszny. Już sama obserwacja wzrokowa kierunku przebiegu rysy w stosunku do kierunku działania momentu skręcającego wyklucza powstawanie jej pod wpływem rozciągających naprężeń normalnych  $\sigma_1$ . Na rys. 5a przedstawiono poglądowo pęknięcie kruche wywołane naprężeniami głównymi, a na rys. 5b przebieg rysy spiralnej występującej przy skręcaniu drutu. Widać wyraźnie, że pęknięcie widoczne na powierzchni drutu po próbie skręcania nie mogło być wywołane naprężeniami głównymi.

Powstawanie rozwarstwień powierzchniowych przy skręcaniu drutów może nastąpić wyłącznie pod wpływem wzdłużnych naprężeń  $\tau_w$ , jak przedstawiono na rys. 5c. Pod wpływem działania tych naprężeń powstaje pierwsze pęknię-

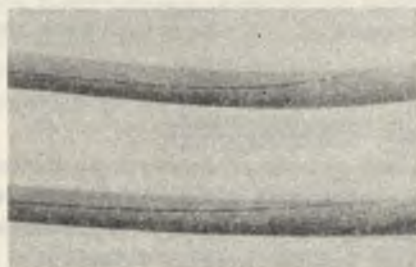


cie równoległe do osi drutu. Pęknięcie to następnie wygina się zgodnie z kierunkiem działania momentu skręcającego i przechodzi w rysę spiralną.



Rys. 5

- a) schemat pęknięcia kruche go wywołanego naprężeniami rozciągającymi  $G_1$ ,  
 b) schemat pęknięcia spiralnego drutów po próbie skręcania, c) schemat powstawania pęknięcia spiralnego przy skręcaniu drutów



Rys. 6. Makrozdjęcia początków tworzenia się rysy po 2-3 obrotach. Wzdłużny kierunek pęknięcia. Głębokie trawienie. Pow. x 5

Za początkowym wzdłużnym charakterem rozwarstwienia przemawia poza tym fakt, że pierwsze pęknięcie następuje zaraz na początku próby skręcania po wykonaniu pierwszych paru obrotów, gdy kąt  $\gamma$  jest jeszcze bardzo mały. W przypadku drutów badanych przez autora o średnicy 1,2 mm liczba skręceń  $N_{BU}$  próbek o długości pomiarowej  $L_0 = 120$  mm sięgała 40, gdy natomiast

pierwsze pęknięcie drutów rozwarstwiających się obserwowano już po 1 do 3 obrotach. Kąt  $\gamma$  wynosił wtedy zaledwie 0,02 do 0,05 rad (1,5 do 2,5°).

Na rys. 6 przedstawiono makrozdjęcia początków tworzenia się rysy na próbkach drutu po 1 do 2 obrotach. Widać wyraźnie wzdłużny przebieg początku rysy. Na rys. 7 natomiast przedstawiono zgląd poprzeczny drutu w pełni rozwarstwionego.



Rys. 7. Drut rozwarstwiony całkowicie po próbie skręcania. Zgląd poprzeczny niestrawiony. Pow. x 120

Reasumując dotychczasowe wywody można stwierdzić, że w czasie próby skręcania drutów sprężynowych złom może powstać albo w płaszczyźnie prostopadłej do osi drutu, albo w płaszczyźnie równoległej do osi drutu. Złom prostopadły wywołują naprężenia  $\tau_p$ , a złom w płaszczyźnie równoległej do osi drutu naprężenia  $\tau_w$ . W obu przypadkach mamy do czynienia ze złomem poślizgowym.

## 2.2. Charakter krzywych skręcania drutów

Próbki drutów do badań wytrzymałościowych na skręcanie różnią się zasadniczo od normalnie stosowanych próbek toczonej z główkami do mocowania w szczękach maszyny wytrzymałościowej. W próbkach toczonej długość pomiarowa wynosi 5 do 20 średnic próbki. Natomiast w przypadku drutów długość pomiarowa wynosi 50 do 200 średnic drutu. Stosowanie tak smukłych próbek wpływa w sposób bardzo istotny na ich zachowywanie się w czasie skręcania. O ile skręcanie sztywnych, krótkich próbek toczonej zostało dość dobrze przebadane i opisane w podręcznikach wytrzymałości materiałów to zagadnienie skręcania wysmukłych próbek drutów nie zostało dotychczas prawie zupełnie zbadane i brak danych tak doświadczalnych jak i teoretycznych na ten temat.

Na początku p. 2.1 podano teoretyczne założenia dla skręcania sztywnych prętów okrągłych. Szereg jednak danych doświadczalnych wskazuje, że

założenia te są ważne tylko w strefie odkształceń sprężystych, a wraz z pojawieniem się stanu plastycznego występuje bardziej złożony rozkład naprężeń. W szczególności dotyczy to wiotkich próbek drutów. Przypuszczenia te może potwierdzić:

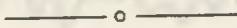
- a) brak stałości stosunku  $\tau_e/R_e$  [2, 4, 23, 24, 25, 26],
- b) zmiana długości próbki w czasie skręcania przy dużych odkształceniach [7, 26, 27, 28, 29, 30],
- c) wybaczenie się próbek drutu po pierwszych obrotach i następnie wyprostowywanie się po dalszych [7, 12, 26].

Stałość stosunku  $\tau_e/R_e$  jest cechą charakterystyczną materiałów izotropowych. Stosunek ten powinien równać się 0,5 do 0,58 w zależności od przyjętej hipotezy wytężeniowej. Druty ciągnięte, jako typowe materiały anizotropowe, nie wykazują stałości stosunku  $\tau_e/R_e$  i dlatego podstawowe założenia teorii skręcania w ich przypadku mogą mieć tylko charakter przybliżony.

Dotychczas w literaturze spotykamy się z opinią, że próbki metali poddawane dużym odkształceniom plastycznym przy skręcaniu ulegają wydłużeniu. Wiele uwagi poświęcili temu zagadnieniu Swift [28], Nadai [29] i Stüwe [30]. W przypadku drutów stalowych ciągniętych ma miejsce zupełnie odwrotne zjawisko - występuje mianowicie skracanie się próbek. Zjawisko to zostanie dokładniej omówione w p. 2.3.

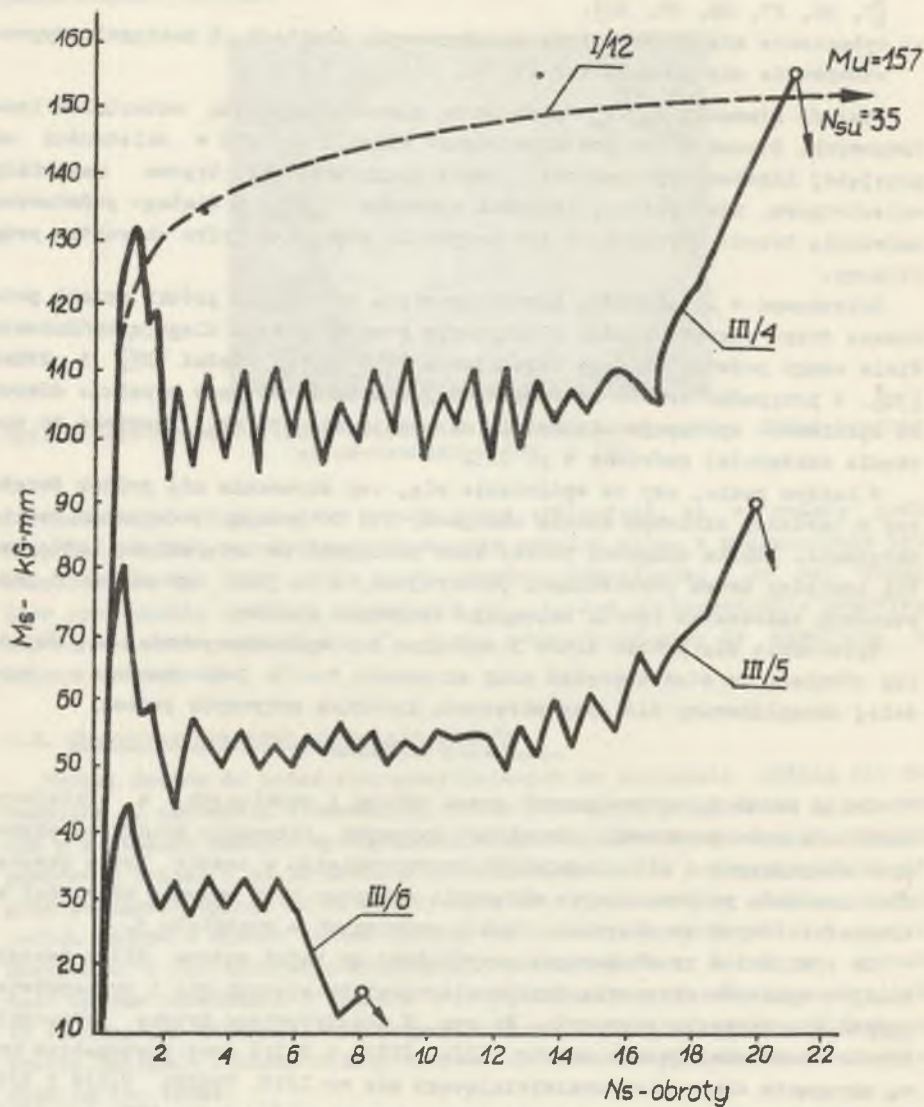
W każdym razie, czy to wydłużanie się, czy skracanie się próbek świadczą o bardziej złożonym stanie naprężeń, niż to podają podstawowe teorie skręcania. Zmiana długości próbki musi pociągnąć za sobą zmianę odległości pomiędzy dwoma poprzecznymi przekrojami, a to jest sprzeczne z podstawowym założeniem teorii skręcania sztywnych prętów.

Wybaczenie się próbek drutu i następne ich wyprostowywanie się świadczą również, że stan naprężeń przy skręcaniu drutów jest znacznie bardziej skomplikowany niż przy skręcaniu krótkich sztywnych próbek.



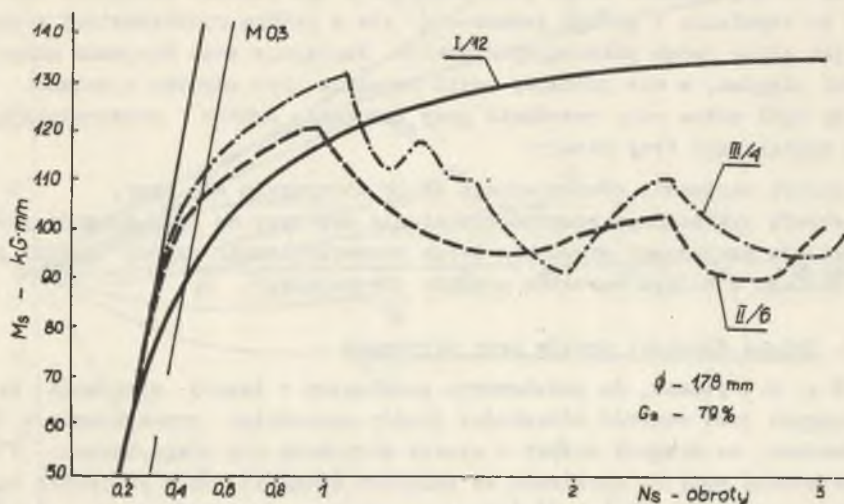
Celem badań przeprowadzonych przez autora i omówionych w niniejszym rozdziale było porównanie charakteru krzywych skręcania drutów sprężystych ulegających i nie ulegających rozwarstwieniu w czasie próby skręcania. Analizie poddano krzywe skręcania wykonane przy badaniu własności wytrzymałościowych na skręcanie drutów omówionych w rozdziale 3.

Na rys. 8 i 9 przedstawiono przykładowo wg badań autora kilka rzeczywistych wykresów skręcania drutów nierozwarstwiających się i rozwarstwiających się w czasie skręcania. Na rys. 8 przedstawiono krzywe skręcania drutów rozwarstwiających się nr III/4, III/5 i III/6 oraz porównawczo krzywą skręcania drutu nierozwarstwiającego się nr I/12. Próbki III/4 i I/12 stanowią druty po tym samym gnioście sumarycznym równym ok. 80%, ale ciąg-



Rys. 8. Rzeczywiste krzywe skręcania drutów sprężynowych wg badań autora

nione z różnymi gniotami pojedynczymi (32% i 13% odpowiednio). Na rys. 9 pokazano początkowe odcinki krzywych skręcania drutów rozwarstwiających się nr II/6 i III/4 i drutu nierozwarstwiającego się I/12. Wszystkie druty po tym samym gniocie sumarycznym ok. 80%.



Rys. 9. Rzeczywiste krzywe skręcania drutów wg badań autora. Początki krzywych

Z przedstawionych rysunków wyraźnie widać, że krzywe skręcania drutów rozwarstwiających się i nierozwarstwiających różnią się zasadniczo między sobą. Krzywe skręcania drutów nierozwarstwiających się mają przebieg regularny, bez żadnych załamania, od początku próby aż do wystąpienia złomu. Wszystkie próbki o regularnym przebiegu krzywej skręcania miały zawsze po zakończeniu próby gładką bez rys spiralnych powierzchnię i gładki prostopadły do osi drutu złom.

Krzywe skręcania drutów ulegających rozwarstwieniu charakteryzują się gwałtownym załamaniem krzywej (spadkiem momentu skręcającego) zaraz po pierwszych obrotach. Ten gwałtowny spadek momentu skręcającego występuje w chwili utworzenia się rysy. Ma on zawsze miejsce albo w strefie odkształceń sprężysto-plastycznych, albo zaraz na początku strefy odkształceń plastycznych.

Po wystąpieniu załamania krzywe skręcania mają przebieg falowy świadczący o okresowym rozprzestrzenianiu się rysy. Odcinek wzrostu fali odpowiada skręcaniu się próbki bez powiększania się rysy. Próbka na tym odcinku umacnia się do wartości, przy której moment skręcający osiąga pewną wartość krytyczną, po przekroczeniu której następuje ponowne pęknięcie i rozprzestrzenienie się rysy na dalszym odcinku próbki. Cykl ten powtarza

się aż do chwili rozprzestrzenienia się rysy na całą długość próbki od szczęki do szczęki.

Po rozprzestrzenieniu się rysy na całą długość próbki następuje dalsze jej skręcanie połączone z bardzo intensywnym wzrostem momentu skręcającego aż do wystąpienia złomu poprzecznego. W tym okresie skręcania nie mamy już do czynienia z próbką jednorodną, ale z próbką rozwarstwioną w postaci jak gdyby dwóch półokrągłych drutów. Następuje więc wzajemne skręcanie dwóch części, a nie jednego, czyli zupełnie nowe odrębne zjawisko.

Na ogół można więc rozróżnić przy skręcaniu drutów rozwarstwiających się następujące trzy strefy:

- a) strefa skręcania równomiernego aż do utworzenia się rysy,
- b) strefa cyklicznego rozprzestrzeniania się rysy na całą długość próbki,
- c) strefa wzajemnego skręcania dwóch rozwarstwionych części próbki połączonej z silnym wzrostem momentu skręcającego.

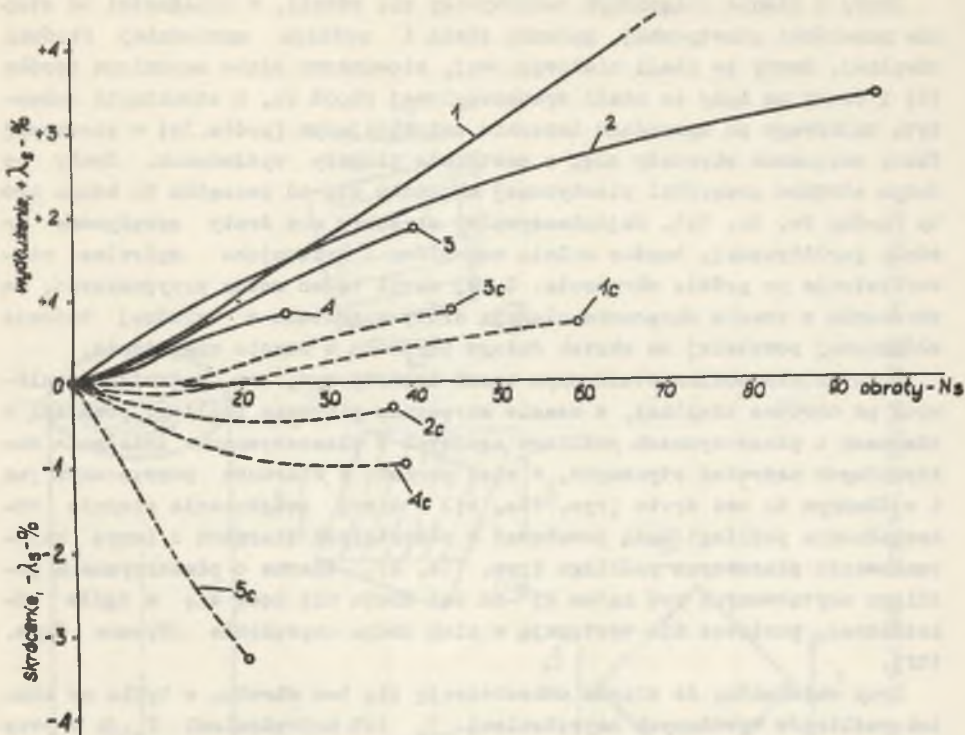
### 2.3. Zmiana długości drutów przy skręcaniu

W p. 2.1 podano, że podstawowym założeniem w teorii skręcania prętów okrągłych jest stałość odległości między sąsiednimi przekrojami, a więc założenie, że długość próbki w czasie skręcania nie ulega zmianie. W rzeczywistości mamy do czynienia ze zmianami długości, a w przypadku drutów z dość znacznymi. Większość dotychczasowych prac na ten temat podaje, że próbki metali w czasie skręcania ulegają wydłużeniu.

Kunda [26] badając druty ciągnięte ze stali wyżej węglowych zaobserwował zupełnie inne zjawisko. Próbki drutów przy skręcaniu zamiast wydłużać się ulegały skróceniu. Kunda nie zajmował się bliżej tym problemem, ale jego empiryczne spostrzeżenie było całkowicie sprzeczne z dotychczasowymi poglądami na ten temat. Tylko Timoshenko [27] podaje, że w przypadku materiałów bardzo elastycznych, jak np. gumy, można zaobserwować przy skręcaniu skracanie się próbek, a nie ich wydłużanie.

Autor niniejszej pracy stwierdził jednoznacznie wydłużanie się drutów stalowych skręcanych bezpośrednio po obróbce cieplnej (wyżarzanie, patentowanie, ulepszenie cieplne itp.), a skracanie się drutów ciągniętych. Druty skracały się tym intensywniej, im były bardziej umocnione i były poddane większemu gniotowi sumarycznemu. Badania te zostały szczegółowo omówione w [7].

Na rys. 10 przedstawiono bardziej charakterystyczne wyniki. Wszystkie druty po obróbce cieplnej, niezależnie od jej rodzaju, wydłużały się przy skręcaniu. Wielkość wydłużenia była tym większa, im materiał był miękniejszy i wytrzymywał większą liczbę skręceń. U wszystkich tych drutów po próbie skręcania złom był gładki, a powierzchnia nie wykazywała spiralnych rozwarstwień. Można więc przypuszczać, że quasi-izotropowa struktura materiałów polikrystalicznych sprzyja wydłużeniu się próbek przy skręcaniu.



Rys. 10. Zmiana długości drutów przy skręcaniu.  $L_0 = 100$  d. Obciążenie osiowe 2%  $F_m$

Druty obrobione cieplnie:

- |                  |         |                             |
|------------------|---------|-----------------------------|
| 1. Żarzony;      | 0,1% C; | $R_m = 360 \text{ N/mm}^2$  |
| 2. Żarzony;      | 0,8% C; | $R_m = 550 \text{ N/mm}^2$  |
| 3. Patentowany;  | 0,6% C; | $R_m = 1150 \text{ N/mm}^2$ |
| 4. Ulepsz.ciepl. | 0,6% C; | $R_m = 1700 \text{ N/mm}^2$ |

Druty w stanie ciągniętym zachowywały się różnie, w zależności od stopnia przeróbki plastycznej, gatunku stali i rodzaju uprzedniej obróbki cieplnej. Druty ze stali niskowęglowej, stosunkowo słabo umocniona (próba 1c) i druty na igły ze stali wysokowęglowej (0,8% C), o strukturze cementytu kulkowego po uprzednim żarzeniu zmiękczającym (próba 3c) w pierwszej fazie skręcania skracały się, a następnie ulegały wydłużeniu. Druty po dużym stopniu przeróbki plastycznej skracały się od początku do końca próby (próby 2c, 4c, 5c). Najintensywniej skracały się druty sprężynowe ze stali perlitycznej, bardzo silnie umocnione i wykazujące spiralne rozwarstwienia po próbie skręcania. Z tej serii badań można przypuszczać, że skróceniu w czasie skręcania ulegają druty ciągnięte o wyraźnej budowie włóknistej powstałej na skutek dużego przerobu w czasie ciągnięcia.

W materiale polikrystalicznym quasi-izotropowym, np. w drutach stalowych po obróbce cieplnej, w czasie skręcania pierwsze poślizgi powstaną w ziarnach o płaszczyznach poślizgu zgodnych z płaszczyznami działania maksymalnych naprężeń stycznych, a więc zarówno w kierunku poprzecznym jak i wzdłużnym do osi drutu (rys. 11a, b). W miarę zwiększania stopnia odkształcenia poślizgi będą powstawać w pozostałych ziarnach o innym ukierunkowaniu płaszczyzn poślizgu (rys. 11c, d). Ziarna o płaszczyznach poślizgu usytuowanych pod kątem  $45^{\circ}$  do osi drutu nie będą się w ogóle odkształcać, ponieważ nie występują w nich żadne naprężenia styczne (rys. 11f).

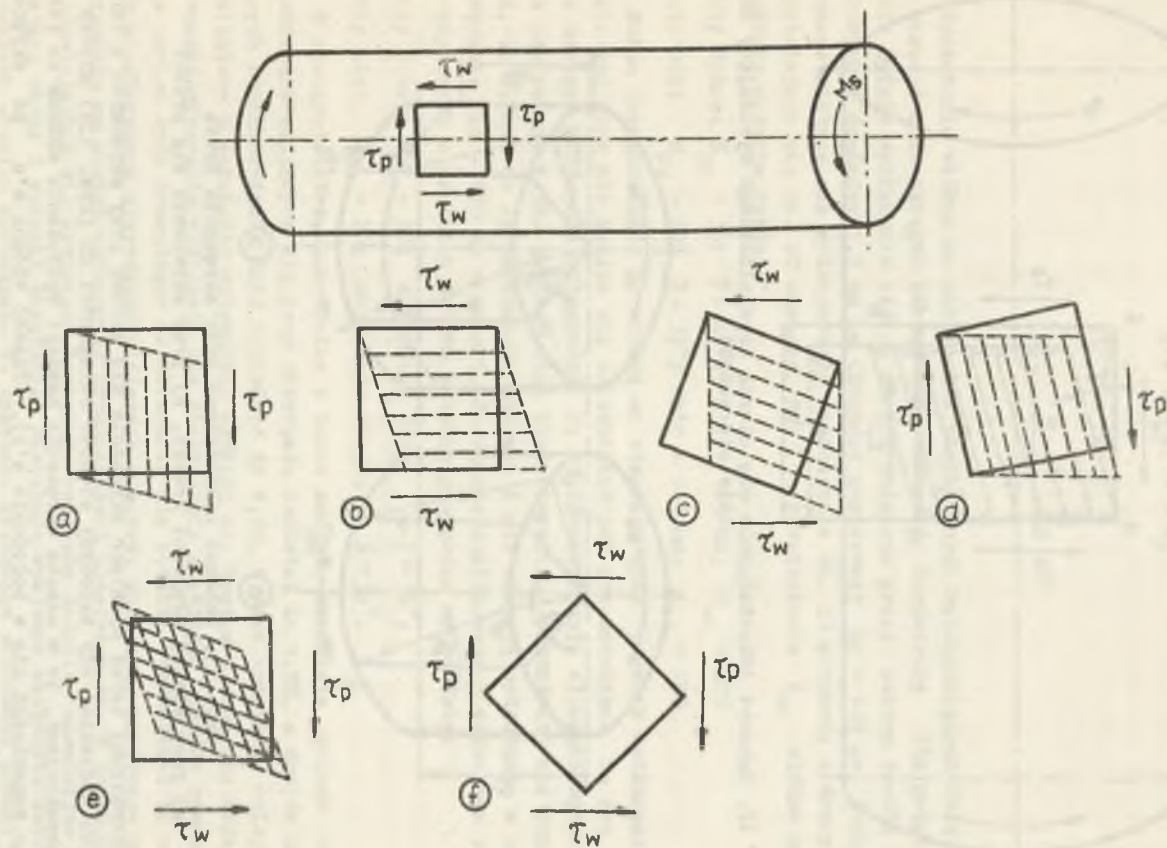
Przy założeniu, że ziarna odkształcają się bez obrotu, a tylko na skutek poślizgów wywołanych naprężeniami  $T_p$  lub naprężeniami  $T_w$ , to w przypadku a) nie wystąpią żadne statystyczne zmiany wymiarów podłużnych ani poprzecznych, natomiast w przypadkach b, c, d wystąpi tendencja do wydłużania się próbki.

W procesie skręcania jednak tylko w przypadku a) może nie występować obrót. We wszystkich innych przypadkach odkształcenie połączone jest z obrotem. Na rys. 11e przedstawiono schemat odkształcania się ziarna pod wpływem równoczesnego działania naprężeń  $T_p$  i  $T_w$ , połączonego z obrotem zgodnym z kierunkiem działania momentu skręcającego. Ten rodzaj odkształcania się ziarn prowadzi do wydłużania się próbki.

W drutach ciągniętych po bardzo dużym stopniu przeróbki plastycznej o wyraźnej budowie włóknistej poślizgi są łatwiejsze i bardziej prawdopodobne w kierunku wzdłużnym niż w poprzecznym. Tendencja ta szczególnie wyraźna występuje w drutach sprężynowych ze stali perlitycznej, w których jak zostanie omówione w rozdziale 4, poślizgi w ferrycie w kierunku poprzecznym do płytek cementytu odgrywają przy skręcaniu znacznie mniejszą rolę niż poślizgi w kierunku wzdłużnym.

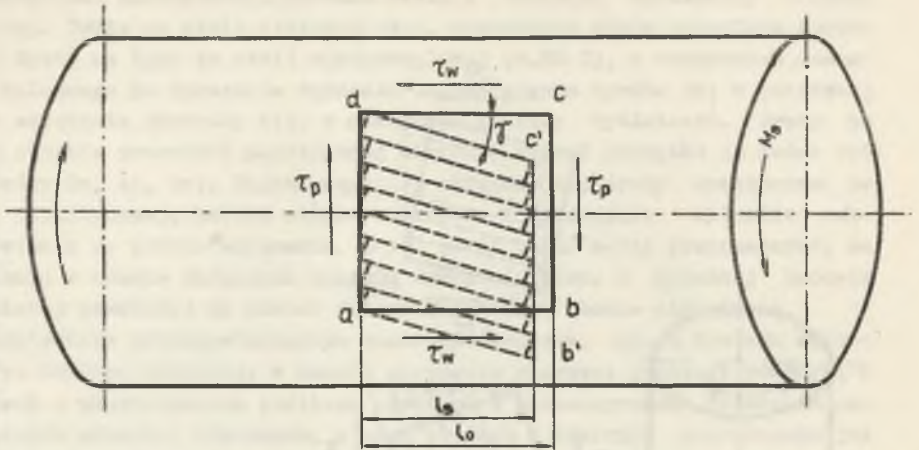
W przypadku poślizgów wywołanych wzdłużnymi naprężeniami  $T_w$  naprężenia poprzeczne  $T_p$  mogą spowodować obrót ziarna, jak przedstawiono na rys. 12,



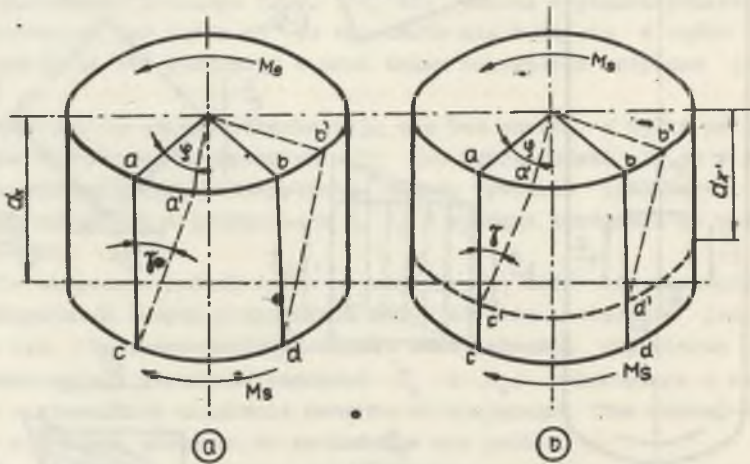


Rys. 11. Schematy odkształcania się ziarn krystalicznych przy skręcaniu

przewodzący do skrócenia się próbki. Długość boków  $ab$  i  $dc$  po obrocie pozostaje bez zmiany, a więc odległość  $l_g$  musi być mniejsza od  $l_0$ .



Rys. 12. Schemat odkształcenia się ziarna krystalicznego wywołujący skracanie się próbki



Rys. 13. Schemat odkształceń przy skręcaniu drutu  
a) przy stałej długości próbki, b) przy skracaniu się próbki

Rozpatrzmy teraz zjawisko skracania się próbek przy skręcaniu z innego punktu widzenia. Gdy założymy stałość odległości  $dx$  (rys. 13a) między dwoma przekrojami, to w czasie skręcania nastąpi wydłużenie włókna  $ac$  (włókno  $ac$  przemieści się w położenie  $a'c$ ). Długość włókna  $a'c$  po skręceniu próbki o kąt  $\gamma$  wyniesie:

$$a'c = \sqrt{ac^2 + a'a^2} \quad (2)$$

$$a'a = \pi \cdot d \cdot N_B$$

$$ac = L_0$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\pi \cdot d \cdot N_B}{L_0}$$

Wydłużenie włókna ac materiałów plastycznych wytrzymujących dużą liczbę skręceń może osiągać bardzo duże wartości. Rozpatrzmy dla przykładu, jakie byłoby wydłużenie włókna ac dla badanych przez autora drutów sprężynowych o średnicy 1,2 mm na długości pomiarowej  $L_0 = 120$  mm. Druty nierozwarstwiający się wytrzymywały przeciętnie ok. 30 skręceń, a druty rozwarstwiający się ok. 20 skręceń. Kąt  $\gamma$  i wydłużenie  $\epsilon_{ac}$  włókna ac wyniosłoby w takim razie:

Druty dobre:  $N_{su} = 30$ ;  $\gamma = 43^\circ$ ;  $a'c = 165$  mm;  $\epsilon_{ac} = 37\%$

Druty złe:  $N_{su} = 20$ ;  $\gamma = 32^\circ$ ;  $a'c = 141$  mm;  $\epsilon_{ac} = 18\%$ .

Można przypuszczać, że włókna ac stawiają opór przeciw wydłużaniu się i element abcd nie będzie się odkształcać jak przedstawiono na rys. 13a, ale nastąpi skrócenie odległości dx i odkształcenie elementu będzie takie jak na rys. 13b. Założmy więc hipotetycznie, przeciwnie niż poprzednio, że włókna ac są całkowicie sztywne i nie ulegają wydłużeniu w czasie skręcania ( $ac = 120$  mm = const). Skrócenie analizowanych przez nas drutów sprężynowych o średnicy 1,2 mm w takim przypadku wyniosłoby:

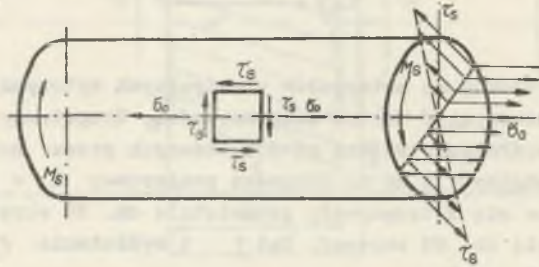
Druty dobre:  $N_{su} = 30$ ; skrócenie 67%;  $\gamma \approx 70^\circ$ ;

Druty złe:  $N_{su} = 20$ ; skrócenie 22,5%;  $\gamma \approx 39^\circ$ .

W rzeczywistości, jak wynika z badań autora, skrócenie próbek drutów nierozwarstwiających się przy skręcaniu dochodzi do 1,5%, a drutów ulegających rozwarstwieniu może dochodzić do 6,0%, a więc znacznie mniej niż wynikałoby z założenia sztywności włókien ac. Wynika z tego, że włókna ac w czasie skręcania wydłużają się plastycznie stawiając jednak równocześnie pewien opór prowadzący do skracania się próbki. Wydłużanie to u drutów plastycznych nierozwarstwiających się przy skręcaniu następuje przede wszystkim na skutek wzdłużnych przemieszczeń plastycznych. W drutach rozwarstwiających się natomiast następuje wzdłużne ścięcie zasadniczo zmieniające obraz i warunki skręcania. Następuje wzajemne skręcanie dwóch półokrągłych cięgien prowadzące do znacznie większego skrócenia próbki drutu.

#### 2.4. Skręcanie połączone z rozciąganiem

Polaska Norma PN-66/M-80003, jak również normy innych krajów przewidują przeprowadzanie próby skręcania przy zastosowaniu obciążenia osiowego nie przekraczającego 2% siły zrywającej badany drut. W praktyce ruchowej panuje pogląd, że obciążenie osiowe przyłożone do skręcanej próbki powoduje zmniejszenie liczby skręceń i przyczynia się do powstawania różwarstwienia powierzchniowego.



Rys. 14. Stan naprężeń w próbce rozciąganej i skręcanej

Na rys. 14 przedstawiono stan naprężeń panujący w próbce skręcanej i równocześnie rozciąganej. Rozpatrzmy trzy możliwe przypadki:

- a)  $\sigma_0 = 0$ ; a  $\tau_s > 0$  - czyste ścinanie
- b)  $\sigma_0 > 0$ ; a  $\tau_s = 0$  - jednoosiowe rozciąganie
- c)  $\sigma_0 > 0$ ; i  $\tau_s > 0$  - układ złożony, skręcanie połączone z rozciąganiem.

Ad a)  $\sigma_0 = 0$   $\tau_s > 0$

Przypadek czystego ścinania. Złom może powstać albo pod kątem  $90^\circ$  do osi drutu pod wpływem poprzecznych naprężeń tnących, albo w płaszczyźnie równoległej do osi drutu pod wpływem wzdłużnych naprężeń tnących.

Ad b)  $\sigma_0 > 0$   $\tau_s = 0$

Przypadek jednoosiowego rozciągania. Złom następuje w przekrojach nachylonych pod kątem  $45^\circ$  do osi drutu pod wpływem naprężeń stycznych  $\tau(\sigma) = 1/2 \sigma_0$ ; Naprężenia styczne  $\tau(\sigma)$  są wywołane naprężeniami normalnymi  $\sigma_0$ .

Ad c)  $\sigma_0 > 0$   $\tau_s > 0$

Układ złożony. Skręcanie połączone z rozciąganiem. W zależności od wzajemnej wielkości  $\tau_s$  i  $\sigma_0$  może nastąpić ścięcie pod kątem  $\alpha = 90^\circ$  lub  $\alpha = 180^\circ$ , gdy  $\tau_s \gg \sigma_0$ , albo ścięcie pod kątem  $\alpha = 45^\circ$ , gdy  $\tau_s \ll \sigma_0$ . Gdy różnice między  $\tau_s$  i  $\sigma_0$  są nieznaczne, ścięcie nastąpi w płaszczyznach pośrednich.

Rozpatrzmy zjawiska występujące w warstwach powierzchniowych, w których działają największe naprężenia  $\tau_s$ . Naprężenie redukowane  $\sigma_{red}$  w zależności od przyjętej hipotezy wytrzymałościowej wyniesie:

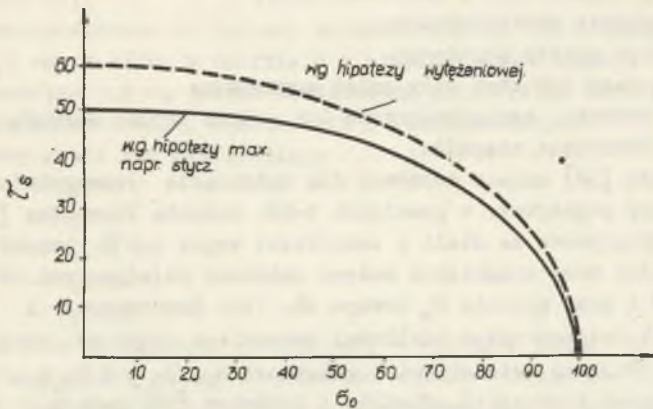
- wg hipotezy największych naprężeń stycznych:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 4\tau_s^2}; \quad (3)$$

- wg hipotezy energii odkształcenia postaciowego:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3\tau_s^2}; \quad (4)$$

Rozważmy, jak będzie się zmieniać wartość niszczącego naprężenia skręcającego  $\tau_s$  po przyłożeniu wzrastającego obciążenia osiowego  $\sigma_o$  wg obydwu hipotez. Załóżmy materiał o wytrzymałości na rozciąganie  $R_m = \sigma_{red} = 100$  jednostek. Na rys. 15 przedstawiono przebieg krzywych  $\tau_s = f(\sigma_o)$ ,



Rys. 15. Wielkość naprężenia skręcającego  $\tau_s$  w zależności od obciążenia osiowego  $\sigma_o$ .

przy  $\sigma_{red} = \text{const}$ , obliczonych wg wzorów (3) i (4). Z przebiegu krzywych można wyciągnąć następujące wnioski:

- Obciążenie osiowe  $\sigma_o$  aż do wartości ok. 20%  $R_m$  nie ma praktycznie większego wpływu na wielkość niszczącego naprężenia skręcającego  $\tau_s$ , a więc prawdopodobnie i na liczbę skręceń. Stosowane więc w praktyce obciążenie osiowe  $\sigma_o \leq 2\% R_m$  nie ma praktycznie żadnego znaczenia.
- Przy obciążeniach  $\sigma_o$  powyżej 20%  $R_m$  następuje spadek niszczącego naprężenia skręcającego  $\tau_s$ .

Obciążenie osiowe może przyspieszyć i obniżyć niszczące naprężenia tnące  $\tau_p$  przy skręcaniu drutu, a więc ma wpływ na powstawanie złomu w płaszczyźnie prostopadłej do osi drutu.

Natomiast obciążenia osiowe nie mają żadnego wpływu na powstawanie złomu w płaszczyźnie równoległej do osi drutu, wywołanego naprężeniami wzdłuż-

nymi  $\tau_w$ . A więc obciążenia osiowe nie mogą mieć również żadnego wpływu na analizowane w pracy rozwarstwienia powierzchniowe w czasie skręcania, będące niczym innym jak złomem wzdłużnym wywołanym naprężeniami  $\tau_w$ .

### 3. WPŁYW GNIOTÓW POJEDYŃCZYCH I GNIOTU SUMARYCZNEGO NA PODATNOŚĆ DO ROZWARSTWIEŃ PRZY SKRĘCANIU

#### 3.1. Wprowadzenie

Dotychczas uważa się, że na podatność do rozwarstwień w czasie próby skręcania istotny wpływ mają: wielkość gniotu sumarycznego ( $G_s$ ), wielkość gniotów pojedynczych ( $G$ ) i jakość przygotowania powierzchni drutu do ciągnięcia. Steininger [31] wymienia między innymi, tylko z zakresu procesu ciągnięcia, następujące ewentualne przyczyny złej jakości drutów sprężynowych po próbie skręcania:

- a) złe przygotowanie powierzchni drutu
- b) odwęglenie powierzchniowe
- c) za duże gnioty pojedyncze
- d) zbyt duży lub zbyt mały gniot sumaryczny
- e) źle dobrane, zanieczyszczone lub zużyte środki smarujące
- f) źle obrobione ciągadła.

Rachstadt [30] zaleca stosować dla uniknięcia rozwarstwień przy skręcaniu gnioty pojedyncze w granicach 5-8%. Badania Potemkina [33] wykazały, że druty sprężynowe ze stali o zawartości węgla 0,83% uzyskiwały najlepsze własności przy ciągnięciu małymi gniotami pojedynczymi nie przekraczającymi 12% i przy gniocie  $G_s$  równym ok. 74%. Krautmacher i Greiss [34] stwierdzili istotny wpływ wielkości ostatniego ciągu na własności drutów stalowych. Większy ostatni gniot zwiększał  $R_m$ ,  $R_{0.2}$  i  $R_{0.01}$ , a obniżał liczbę skręceń i przegięć. Bleilöb i Schücher [35] podają, że pomiędzy jakością powierzchni i złomu po próbie skręcania, a liczbą skręceń nie ma żadnej zależności. Wydaje się, że ten ostatni problem nie jest dotąd dostatecznie zbadany.

Niektórzy autorzy analizując ujemny wpływ wzrostu temperatury drutu w czasie ciągnięcia wzmiankują również o wpływie temperatury ciągnięcia na jakość złomu po próbie skręcania. Wistreich [36] stwierdził, że ze wzrostem szybkości ciągnięcia na skutek wzmożonego wydzielania ciepła, własności drutów liniarskich i sprężynowych mogą się tak obniżyć, że nie będą odpowiadać wymaganiom. Steininger [37] podaje, że punktowy wzrost temperatury o ciągadło może doprowadzić do miejscowego zahartowania drutu. Wtrącenia kruchej struktury martenzytycznej w tym przypadku mogą być źródłem rozwarstwień przy skręcaniu. Schultz i Püngel [38] uzyskiwali zwiększenie liczby skręceń i przegięć przy podzerowym ochładzaniu ciągadeł i drutu. Zitkow i Pospiechow [39] stwierdzili, że liny wykonane z drutów ciągniętych małymi gniotami, a więc przy mniejszym wydzielaniu ciepła, miały lepsze własności zmęczeniowe. Schwier [40] uważa, że na jakość złomu po

próbie skręcania ma bardzo istotny wpływ temperatura ciągnięcia. Szczegółowe badania Eisenhutha [41], [42] oraz Krautmachera i Greissa [43] wykazały, że w przypadku złego chłodzenia występują zjawiska analogiczne do przyspieszonego starzenia drutu. Wzrasta  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i  $R_{0,01}$ , a spada wydłużenie, liczba skręceń i przegięć. Badania Godeckiego i Mierzejewskiego [44] potwierdziły ww. poglądy o istotnym wpływie temperatury ciągnięcia na własności drutów stalowych. Im lepsze chłodzenie, tym lepsze własności plastyczne drutu.

### 3.2. Badania własne i dyskusja wyników

Celem badań przedstawionych w niniejszym rozdziale było wstępne rozpoznanie wpływu wielkości gniotu sumarycznego i wielkości gniotów pojedynczych na własności drutów sprężynowych, przede wszystkim z punktu widzenia występowania rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skręcania [4, 10, 11, 15, 16].

Badania przeprowadzono na drutach sprężynowych ze stali wysokowęglowej o średnicy 1,2 mm, w BISRA w Sheffield w czasie pobytu autora w Anglii. Półwyrob o średnicy 3,9 mm został dostarczony przez firmę "British Ropes" z Doncaster po patentowaniu, wytrawieniu i fosforanowaniu.

Skład chemiczny stali był następujący:

węgiel	- 0,89%
mangan	- 0,66%
krzem	- 0,25%
siarka	- 0,028%
fosfor	- 0,026%

Druty ciągnięto na ciągarce pojedynczej o średnicy bębna 22 cale przy użyciu jako środka smarującego stearynianu wapnia. Ciągadła dostarczyła firma "Danite Hard Metals Ltd", o kącie ciągnięcia  $2\alpha$  równym ok.  $12^\circ$ .

Wykonano trzy partie drutów o średnicy 1,2 mm stosując następujące układy ciągów:

Partia I	- 18 ciągów o gniotach pojedynczych ok. 12%
Partia II	- 9 ciągów o gniotach pojedynczych ok. 23%
Partia III	- 6 ciągów o gniotach pojedynczych ok. 32%

Po każdym ciągu badano:  $R_m$ ,  $R_{0,2}$ ,  $R_{0,02}$ ,  $M_u$ ,  $M_{sr}$ ,  $M_{0,3}$ ,  $M_{0,03}$ ,  $R_s$ ,  $R_{sr}$ ,  $\tau_{0,3}$ ,  $\tau_{0,03}$  i  $N_{su}$ . Po próbie skręcania oceniano jakość powierzchni i złożu próbki. Do obliczania naprężeń skręcających stosowano następujące wzory:

$$R_s = \frac{12 M_u}{\pi d^3} \quad (5)$$

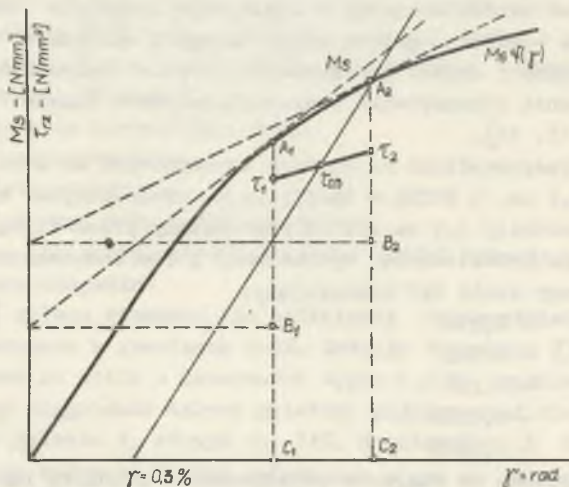
$$R_{sr} = \frac{12 M_{sr}}{\pi d^3} \quad (6)$$

$$\tau_{0,03} = \frac{16 M_{0,03}}{\pi d^3} \quad (7)$$

Wartość umownej granicy plastyczności na skręcanie  $\tau_{0,3}$  wyznaczono graficznie [21] z doświadczalnie wykreślonej krzywej  $M_B = f(\gamma)$  na podstawie wzoru teoretycznego:

$$\tau_{rz} = \frac{1}{2\pi r^3} \cdot \left( \varphi' \frac{dM_B}{d\varphi} + 3 M_B \right) \quad (8)$$

Na rys. 16 przedstawiono poglądowo przyjęty przez autora sposób wyznaczania  $\tau_{0,3}$ .



Rys. 16. Graficzna metoda określania umownej granicy plastyczności na skręcanie  $\tau_{0,3}$  na podstawie empirycznej krzywej skręcania  $M_B = f(\gamma)$  wg wzoru:

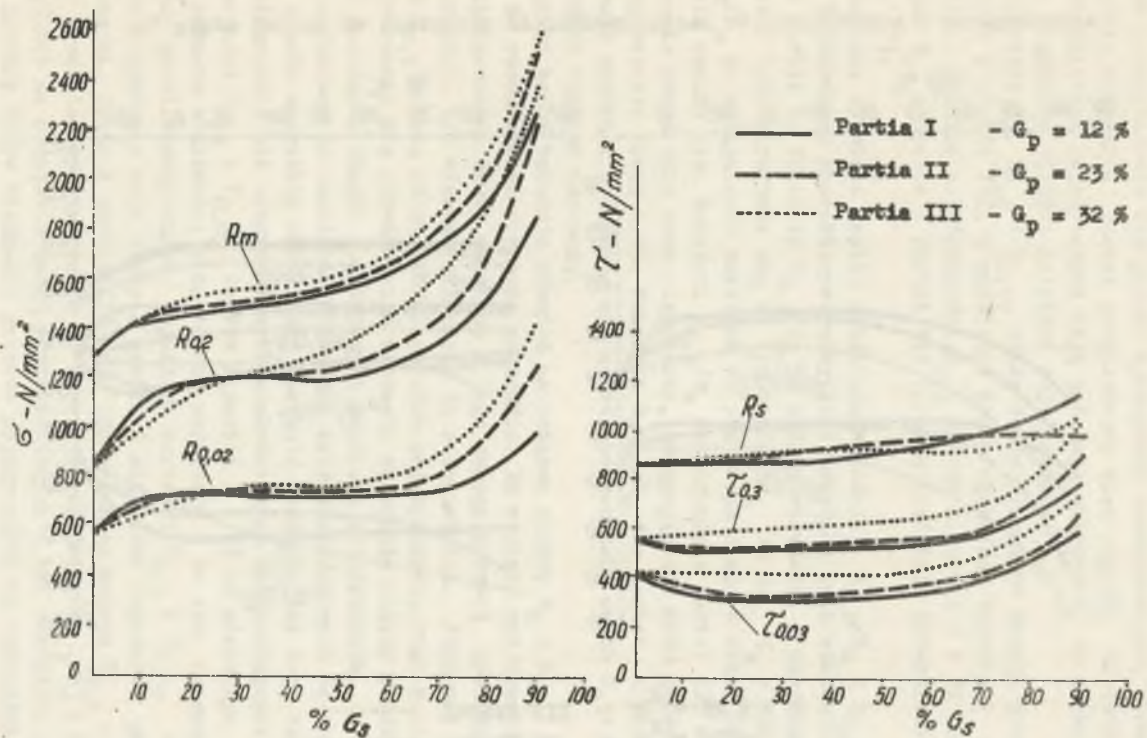
$$\tau_{rz} = \frac{1}{2\pi r^3} \left( \varphi' \frac{dM_B}{d\varphi} + 3 M_B \right)$$

$$\tau_{rz} = \frac{1}{2\pi r^3} (AB + 3 AC)$$

Badania wytrzymałościowe na rozciąganie przeprowadzono na maszynie "INSTRON" posługując się tensometrem elektronowym. Badania wytrzymałościowe na skręcanie przeprowadzono w Spring Research Association w Sheffield. Druty o średnicy 2,0 mm i powyżej badano na maszynie "TINIUS-Olsen-75C-USA" wyposażonej w automatyczny elektronowy rejestrator krzywej  $M_B - \varphi$  przełożeniu 250:1. Druty o średnicy poniżej 2,0 mm badano na aparacie firmy Amsler typ o5TA-89 bez automatycznego rejestratora.

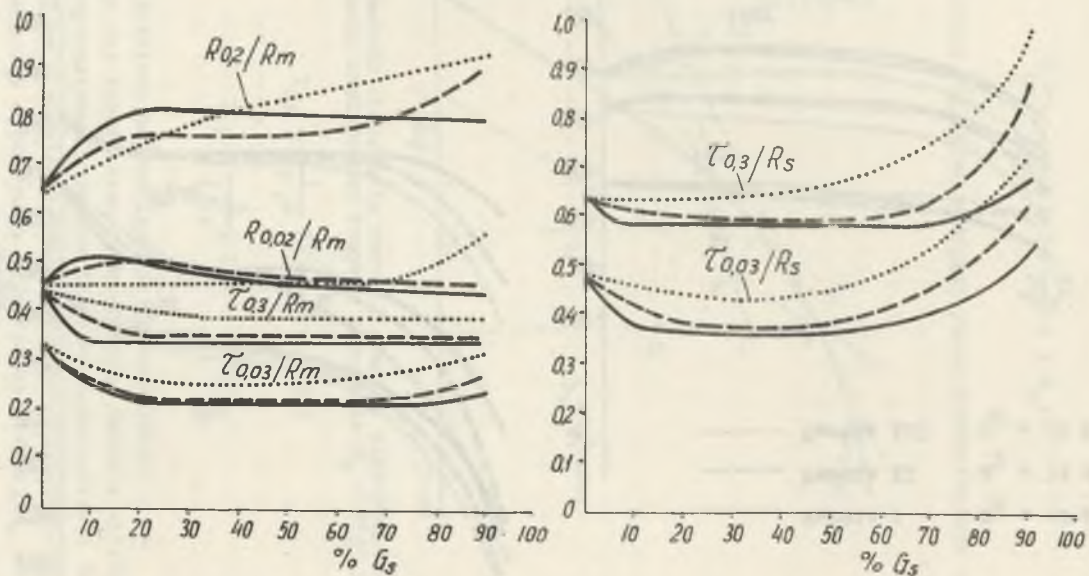
Każdą próbę powtarzano 3 do 6 razy i jako wynik przyjmowano wartość średnią. W tablicach 1 i 2 zebrano całość wyników badań, a na rys. 17 i 18 przedstawiono je wykreślnie.





Rys. 17. Wpływ gniotu na własności wytrzymałościowe na rozciąganie i na skręcanie drutów sprężynowych

— Partia I -  $G_p = 12\%$   
 - - - Partia II -  $G_p = 23\%$   
 ..... Partia III -  $G_p = 32\%$



Rys. 18. Wpływ gniotu na wskaźniki wytrzymałościowe na rozciąganie i na skręcanie

Z badanych trzech partii drutów tylko druty z partii I miały dobrą powierzchnię po próbie skręcania aż do  $G_s = 90\%$ . Druty z partii II i III już po przekroczeniu 65% gniotu wykazywały rozwarstwienia powierzchniowe po próbie skręcania. Został potwierdzony więc pogląd, że druty ciągnięte małymi gniotami pojedynczymi mają mniejszą skłonność do rozwarstwień niż druty ciągnięte silnymi gniotami pojedynczymi.

Najwyższe  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i  $R_{0,02}$  miały druty ciągnięte dużymi gniotami pojedynczymi z partii III, a najniższe druty ciągnięte łagodnymi gniotami z partii I. Granica plastyczności  $R_{0,2}$  drutów z partii I i II rośnie podobnie jak  $R_m$ , a drutów z partii III wzrasta bardziej intensywnie niż  $R_m$  (rys. 17).

Powyższe zjawiska lepiej ilustrują wskaźniki  $R_{0,2}/R_m$  i  $R_{0,02}/R_m$  (rys. 18). Najbardziej charakterystyczny jest przebieg tych wskaźników dla drutów z partii I. Wskaźnik  $R_{0,2}/R_m$  po silnym wzroście w pierwszym ciągu do wartości 0,82 utrzymuje się na tym poziomie aż do  $G_s = 90\%$ . Wskaźnik  $R_{0,02}/R_m$  po osiągnięciu maksimum po pierwszym ciągu w miarę dalszego ciągnięcia obniża się. Wskaźnik  $R_{0,2}/R_m$  dla drutów z partii III wzrasta równomiernie przez cały czas ciągnięcia, osiągając dla drutu gotowego  $\phi 1,2$  mm wysoką wartość równą 0,93. Wskaźnik  $R_{0,02}/R_m$  dla drutów z partii III nie wykazuje spadku i utrzymuje się na stałym poziomie aż do  $G_s = 80\%$ , aby w ostatnich ciągach wzrosnąć.

Wyniki badań wskazują również na związek między  $R_m$  i  $R_{0,2}$  a skłonnością do rozwarstwień w czasie skręcania. Im większa wytrzymałość i granica plastyczności drutu uzyskana z tego samego surowca (półwyrobu po patentowaniu), tym większa skłonność do rozwarstwień. Ponieważ zarówno  $R_m$  jak i  $R_{0,2}$  zależą od wielkości gniotów pojedynczych, więc w celu uniknięcia tworzenia się rozwarstwień w czasie skręcania należy stosować większą ilość łagodnych ciągów o mniejszych gniotach pojedynczych.

Przechodząc do omawiania własności wytrzymałościowych na skręcanie należy przede wszystkim stwierdzić znacznie łagodniejszy ich wzrost w czasie ciągnięcia niż własności wytrzymałościowych na rozciąganie.

Wartości  $\tau_{0,3}$  i  $\tau_{0,03}$  drutów z partii I i II po pierwszym ciągu ulegają pewnemu obniżeniu, a następnie wzrastają i to tym intensywniej, im większy gniot sumarycznych. Najniższe wartości  $\tau_{0,3}$  i  $\tau_{0,03}$  w całym zakresie ciągnięcia mają druty z partii I ciągnięte łagodnymi gniotami pojedynczymi. Druty z partii III mają zdecydowanie wyższe  $\tau_{0,3}$  i  $\tau_{0,03}$ . Jeszcze wyraźniej spostrzeżenia te obrazują wskaźniki  $\tau_{0,3}/R_s$  i  $\tau_{0,03}/R_s$ .

Ogólnie na podstawie badań przedstawionych w tym rozdziale można stwierdzić istotny wpływ wielkości gniotów pojedynczych na własności sprężystoplastyczne drutów sprężynowych. Im mniejsze stosujemy gnioty pojedyncze, tym drut ma lepsze własności plastyczne i równocześnie mniejszą skłonność do rozwarstwień w czasie skręcania. Wpływ wielkości gniotów pojedynczych jest szczególnie wyraźny przy gniotach sumarycznych powyżej 75%.

Można by wyciągnąć więc wniosek, że im niższą mają druty granicę plastyczności i sprężystości, tym mniejszą powinny mieć skłonność do rozwarstwień powierzchniowych przy skręcaniu. Do wniosku tego należy jednak podchodzić z pewną rezerwą. Np. druty z partii I przy gniocie 90% nie rozwarstwiają się, pomimo że mają znacznie wyższe  $R_{0,2}$  i  $\sigma_{0,3}$  niż druty rozwarstwiający się z partii II i III po gniocie 70%. Wynika z tego, że granica plastyczności i sprężystości może być miernikiem podatności do rozwarstwień tylko przy porównywaniu drutów o tej samej średnicy ciągniętych z tego samego surowca i po tym samym gniocie sumarycznym. Przy odpowiednio dobranej technologii ciągnięcia druty sprężynowe mogą się nie rozwarstwiać przy skręcaniu, mając nawet bardzo wysoką granicę plastyczności i sprężystości.

Niniejsza seria badań wykazała poza tym, że druty o złych skręcaniach (rozwarstwiający się) mają istotnie niższą liczbę skręceń niż druty dobre.

#### 4. ZMIANY STRUKTURALNE DRUTÓW ZE STALI WYSOKOWĘGLOWYCH W PROCESIE CIĄGIENIA

##### 4.1. Wprowadzenie

W badaniach omówionych w rozdziale 3 stwierdzono, że im większy gniot sumaryczny i większe gnioty pojedyncze, tym większa skłonność drutów sprężynowych do rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skręcania. Przy stosowaniu silnych gniotów pojedynczych o wielkości powyżej 20%, już przy gniocie sumarycznym równym 65% druty ulegały rozwarstwieniu przy skręcaniu. Przy stosowaniu natomiast łagodnych gniotów pojedynczych, (nie przekraczających wielkości 13%, druty nie rozwarstwiały się przy skręcaniu nawet do  $G_s = 90\%$ . Stwierdzono również, że im drut jest bardziej kruchy, a więc gdy ma wyższą granicę plastyczności, niższe przewężenie, tym jest większe prawdopodobieństwo rozwarstwiania się w czasie próby skręcania.

Z powyższych badań nasuwa się przypuszczenie, że gorsze własności plastyczne i idąca za tym większa podatność do rozwarstwień przy skręcaniu ma między innymi źródło w budowie strukturalnej drutu po ciągnięciu. Celem więc badań omówionych w niniejszym rozdziale było zbadanie wpływu parametrów procesu ciągnięcia na zmiany strukturalne drutów patentowanych ze stali perlitycznej i ewentualne stwierdzenie czy występuje zależność między strukturą po ciągnięciu a podatnością do rozwarstwień w czasie próby skręcania [6, 13, 14, 18].

Przeróbka plastyczna na zimno stali perlitycznej ma swoje cechy charakterystyczne. W perlicie występują obok siebie dwie fazy - ferryt i cementyt. Przeróbka zachodzi przede wszystkim na skutek odkształcenia się ferrytu. Cementyt z powodu małej plastyczności ulega odkształceniu w stopniu znacznie mniejszym. Do niedawna istniały dwa punkty widzenia na rolę cementytu w czasie przeróbki plastycznej na zimno:

- a) odkształceniu podlega tylko ferryt, a cementyt ulega kruchemu rozdrobieniu,  
b) odkształceniu podlega nie tylko ferryt, ale również w pewnym stopniu cementyt.

Obecnie przyjmuje się za udowodnione, że odkształceniu plastycznemu ulega również cementyt, chociaż w stopniu znacznie mniejszym niż ferryt i zależnym od warunków przeróbki plastycznej. Możliwość plastycznego odkształcenia cementytu tłumaczy się występowaniem trójosiowego stanu naprężeń w cementycie otoczonym ze wszystkich stron plastycznym ferrytem.

Rozdrabnianie płytek cementytu zależy od stopnia dyspersji cementytu i od nachylenia płytek względem kierunku przeróbki plastycznej. Cementyt grubopłytkowy łatwiej ulega rozdrobieniu niż drobnopłytkowy.

Zubow [45] i Potemkin [33] uważają, że proces kruszenia cementytu ma istotny wpływ na podatność do odkształceń plastycznych stali. Gdyby cementyt ulegał rozdrobieniu w pierwszych ciągach w całej jego masie, to przeróbka plastyczna byłaby bardzo utrudniona, o ile nie niemożliwa. Według Zubowa rozdrobienie cementytu w drutach patentowanych następuje dopiero przy dużych stopniach deformacji.

Jak wynika z badań autora niniejszej pracy, rozdrobienie cementytu zależy od warunków procesu ciągnięcia i może w pewnych przypadkach zachodzić już przy stosunkowo niedużych gniotach sumarycznych. Zdaniem autora różnice w obserwacjach podawanych przez różnych badaczy wynikają prawdopodobnie z różnych warunków ciągnięcia i obróbki cieplnej badanych drutów.

Badania Kardonskiego [46, 47] przeprowadzane na drutach patentowanych wykazały po gniocie 93% zmniejszenie się nie tylko odstępów między płytkami z ok.  $0,15\mu\text{m}$  na ok.  $0,06\mu\text{m}$ , ale również zmniejszanie się grubości samych płytek cementytu z ok. 300 Å na ok. 80 Å. Rozdrobienie cementytu występowało przy znacznie większych gniotach niż w drucie żarzonem.

Do bardzo interesujących badań na omawiany temat można zaliczyć prace Embury i Fishera [48, 49]. Badając pod mikroskopem elektronowym cienkie folie z drutu ze stali perlitycznej po bardzo dużym gniocie (97%) badacze ci zaobserwowali wiele jak gdyby płytkowych komórek ferrytu, oddzielonych granicami o rozstępie 100 do 200 Å. Stwierdzono, że wymiary poprzeczne komórek zmniejszają się ze wzrostem odkształcenia. Badania ilościowe przeprowadzone przez Embury i Fishera wykazały, że szerokość komórek jest funkcją średnicy drutu (gniotu sumarycznego).

Badania Chandhoka i innych [50] przeprowadzane również na drutach patentowanych ze stali perlitycznej dały podobne wyniki jak badania Embury i Fishera. W procesie ciągnięcia odkształcał się zarówno ferryt jak i cementyt. Zaobserwowano nie tylko zmniejszanie się odstępów między płytkami ale również zmniejszanie się grubości samych płytek cementytu. Początki rozdrabniania cementytu zauważono już po gniocie 55%, ale równocześnie nawet po bardzo dużym gniocie występowały płytki nierozdrobnione. Gridniew [51] uważa, że w procesie ciągnięcia rozdrobienie cementytu może zachodzić

dział tylko w określonych bardzo niekorzystnych warunkach, a zasadniczo występuje plastyczna deformacja cementytu.

Podsumowanie dotychczasowego stanu wiedzy na temat zmian strukturalnych podczas ciągnięcia drutów stalowych ze stali perlitycznej przeprowadzili Maurer i Rosegger [52]. Przy małych odkształceniach powstają najpierw w ferrytyce węzły dyslokacji, a przy większych tworzy się dyslokacyjna substruktura komórkowa. Największe skupisko dyslokacji powstaje w płaszczyznach granicznych ferrytu i cementytu. Przy dużych odkształceniach następuje rozciąganie (wydłużanie) siatki dyslokacyjnej, a poprzeczne wymiary substruktury komórkowej zmniejszają się. Zachowywanie się płytek cementytu w perlicie zależy od położenia kolonii perlitu względem kierunku ciągnięcia. Przy równoległym ułożeniu kolonii perlitu do osi ciągnięcia płytki cementytu odkształcają się w sposób nieznaczny, a głównie odkształca się ferryt. Jeżeli kolonia perlitu usytuowana jest ukośnie do kierunku przeróbki, to płytki cementytu ulegają elastycznemu lub plastycznemu obrotowi w kierunku osi drutu. W takich przypadkach można również często zauważyć ścięcia cementytu. Z im bardziej drobnoziarnistym perlitem mamy do czynienia, tym płytki cementytu łatwiej ulegają sprężystemu lub plastycznemu odkształceniom niż rozdrobnieniu.

W drutach patentowanych poddanych odkształceniom powyżej 90% uzyskujemy pełną kierunkowość struktury (teksturę). Struktura ta przedstawia bardzo wydłużone równoległe wstęgi dyslokacyjnej substruktury komórkowej, w której występują więcej lub mniej rozdrobnione cienkie płytki cementytu. Płytki cementytu, względnie ich fragmenty, często są bardzo trudno rozróżnialne w strukturze komórkowej.

#### 4.2. Program badań własnych i omówienie mikrostruktur

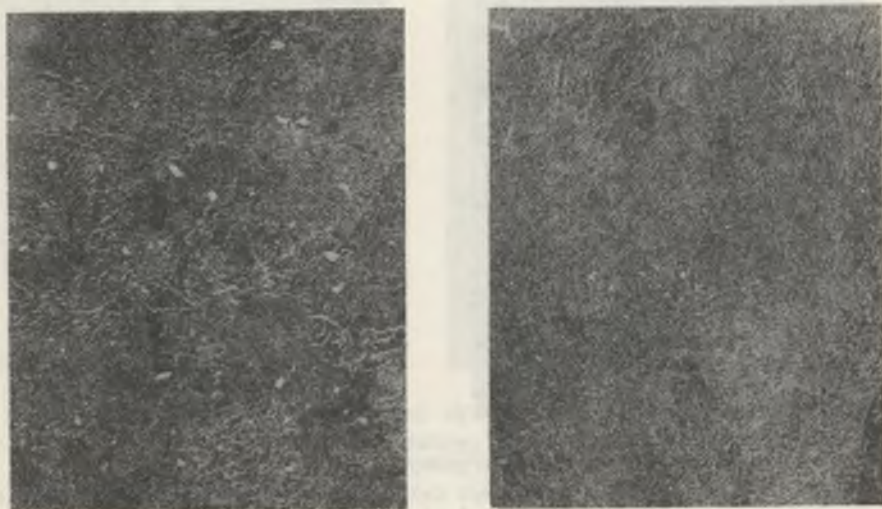
Jak zaznaczono na wstępie, celem badań metalograficznych było określenie wpływu gniotów pojedynczych i gniotu sumarycznego na zmiany strukturalne drutów patentowanych ze stali wysokowęglowej (0,9% C) i ewentualne stwierdzenie, czy występuje zależność między strukturą, a podatnością do rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skrećania.

Całość badań autor przeprowadził w czasie pobytu w Anglii w BISRA w Sheffield. Badania przeprowadzono na drutach z partii I i III omówionych w rozdziale 3. Druty z partii I ciągnięte łagodnymi gniotami miały dobre własności plastyczne i nie rozwarstwiały się w czasie skrećania. Druty z partii III ciągnięte z bardzo silnymi gniotami pojedynczymi były kruche i rozwarstwiały się przy skrećaniu.

Do badań metalograficznych wybrano analogiczne druty z partii I i III po tym samym gniocie sumarycznym (30%, 70%, 80% i 90%) i porównano ich mikrostrukturę przy użyciu mikroskopu elektronowego.

Na wszystkich próbkach drutów wykonano zglądy podłużne. Próbki drutów inkludowane w bakelicie i polerowano mechanicznie. Wypolerowane próbki

trawiono w 1% alkoholowym roztworze  $\text{HNO}_3$ . Badania oparto wyłącznie na bezpośrednich replikach węglowych. Repliki zdejmowano ze zglądów stosując elektrolityczne rozpuszczanie próbki stalowej w 10% roztworze kwasu nadchlorowego w acetonie. Obserwacje mikroskopowe przeprowadzono przy powiększeniach x 2.000, x 5.000, x 10.000 i x 20.000. Zdjęcia wykonano stosując powiększenie fotograficzne x 4.



Rys. 19. Gniot sumaryczny 30%; pow. 4 x 2.000

- a) próba I/3 - ciągi łagodne - drut dobry, b) próba III/1 - ciągi mocne - drut dobry

(Uwaga: dla uproszczenia druty nierozwarstwiające się przy skręcaniu nazywać będziemy dobrymi, a druty rozwarstwiające się przy skręcaniu złymi)

Obydwa zdjęcia przedstawiają strukturę drobnego perlitu. Różnice pomiędzy nimi są niezauważalne. Widoczna przypadkowość orientacji perlitu w poszczególnych koloniach jest taka jak bezpośrednio po patentowaniu. Kierunek ciągnięcia jest trudny do rozróżnienia.

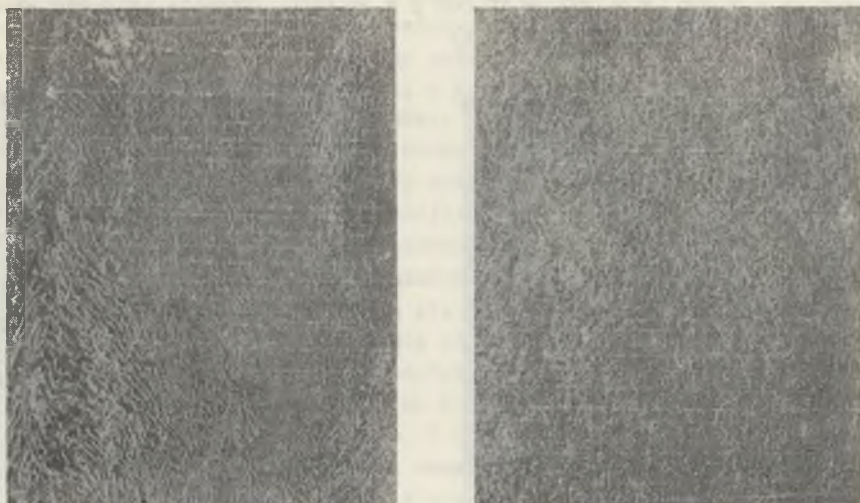
Rys. 20. Gniot sumaryczny ok. 70%; pow. 4 x 2.000

- a) próba I/9 - ciągi łagodne - drut dobry  
b) próba III/3 - ciągi mocne - drut zły.

Na zdjęciach obserwujemy wyraźne wydłużanie się ziarn perlitu w kierunku ciągnięcia. Na zdjęciu (a) występuje dobrze zachowana struktura drobnego perlitu. Proces rozdrabniania cementytu jest prawie niezauważalny. W koloniach perlitu o kierunku ułożenia płytek pod kątem do osi ciągnięcia widoczne są miejsca o plastycznie ugiętych płytkach.

Obserwuje się wyraźną różnicę w ilości płytek na  $1\mu\text{m}$  ułożonych równoległe do kierunku ciągnięcia i pod kątem do osi ciągnięcia. Ilość płytek

ułożonych równolegle do osi ciągnięcia wynosi 12 do 18 szt/ $\mu\text{m}$ , a ułożonych pod kątem tylko 7 do 10 szt/ $\mu\text{m}$ . Tę różnicę w ilości płytek można wytłumaczyć tylko różnym oporem deformacji kolonii perlitu o ułożeniu pły-



Rys. 20. Gniot sumaryczny ok. 70%; pow. 4 x 2.000

a) próba I/9 - ciągi łagodne - drut dobry, b) próba III/3 - ciągi mocne - drut zły

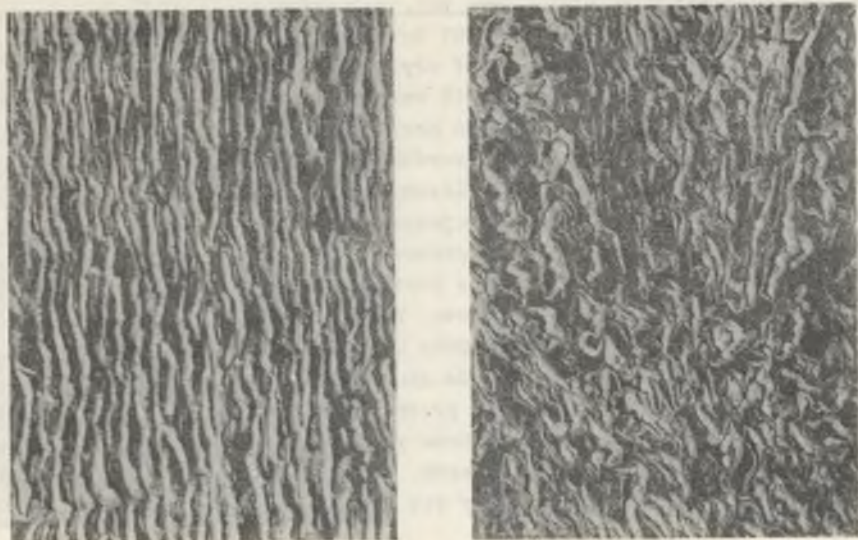
tek równoległym i pod kątem do osi ciągnięcia. Kolonie perlitu o płytkach równoległych do osi ciągnięcia stawiają stosunkowo mały opór deformacji. Cała praca odkształcenia zostaje użyta na plastyczne odkształcenie ferrytu i ewentualnie również w pewnym stopniu cementytu. Natomiast w przypadku kolonii perlitu o płytkach ułożonych prostopadle lub pod pewnym kątem do osi ciągnięcia większość pracy zużywa się na ugięcie płytek cementytu w kierunku ciągnięcia lub na ich rozdrobnienie. Płytki cementytu stanowią w tym przypadku sztywny, o dużej wytrzymałości na ściskanie, szkielet nie zezwalający na plastyczne odkształcenie ferrytu. Zdjęcie (b) różni się od zdjęcia (a) stopniem rozdrobnienia cementytu. W niektórych miejscach trudno nawet rozróżnić budowę płytkową. Niemniej istnieją jeszcze obszary dobrze zachowanego perlitu.

Rys. 21. Gniot sumaryczny ok. 70%; pow. 4 x 10.000

a) próba I/9 - ciągi łagodne - drut dobry  
b) próba III/3 - ciągi mocne - drut zły.

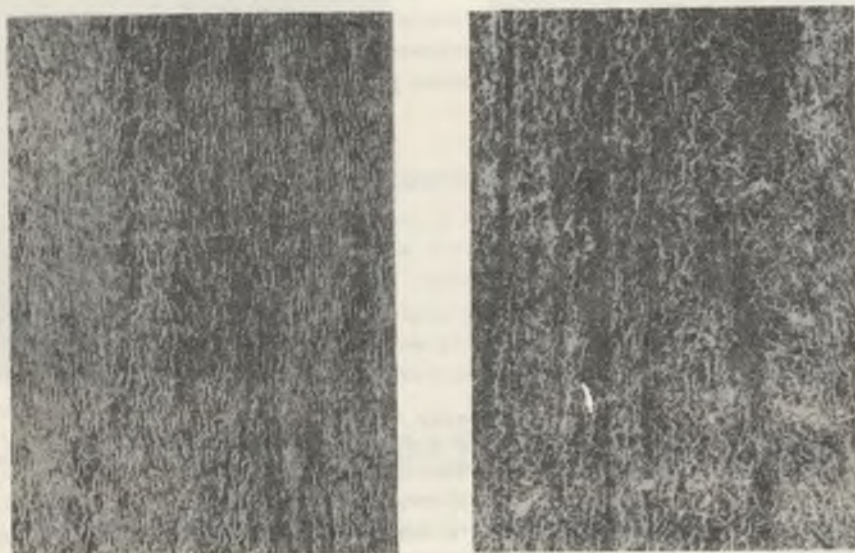
Na zdjęciu (a) przedstawiono typowy szczegół o dobrze zachowanej strukturze perlitycznej, a na zdjęciu (b) typowy szczegół struktury o znacznym rozdrobieniu płytek cementytu.





Rys. 21. Gniot sumaryczny ok. 70%; pow. 4 x 10.000

a) próba I/9 - ciągi łagodne - drut dobry, b) próba III/3 - ciągi mocne - drut zły



Rys. 22. Gniot sumaryczny ok. 80%; pow. 4 x 2.000

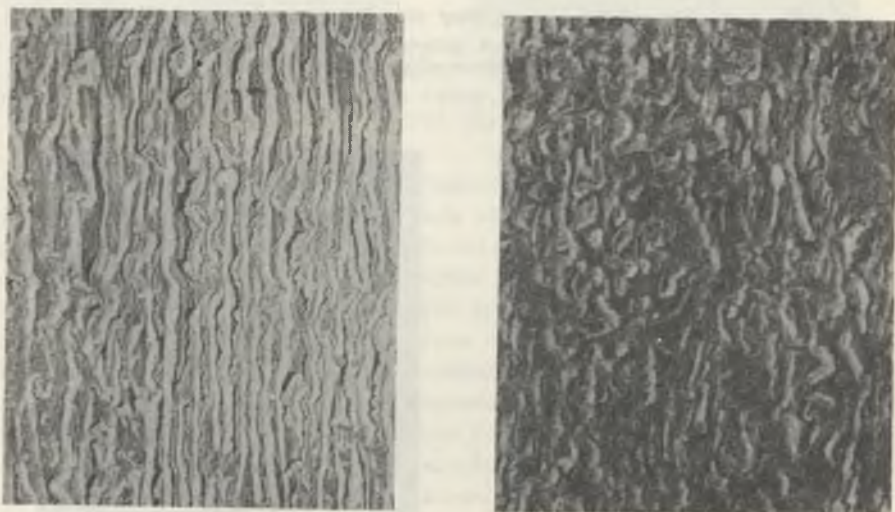
a) próba I/12 - ciągi łagodne - drut dobry, b) próba III/4 - ciągi mocne - drut zły

Rys. 22. Gniot sumaryczny ok. 80%; pow. 4 x 2.000

a) próba I/12 - ciągi łagodne - drut dobry

b) próba III/4 - ciągi mocne - drut zły.

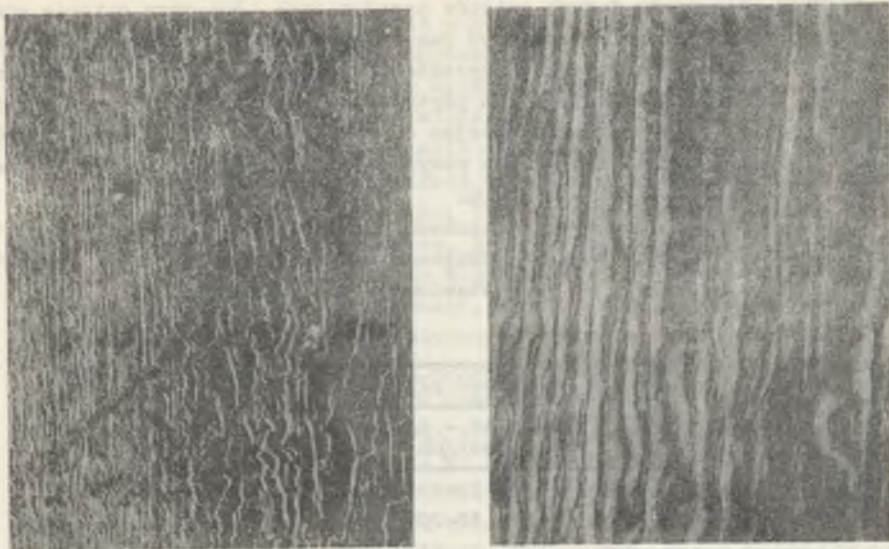
Na zdjęciu (a) obserwujemy prawie całkowite zorientowanie ziarn perlitu w kierunku ciągnięcia. Struktura perlityczna pozostaje bardzo dobrze zachowana pomimo dużego stopnia przeróbki plastycznej. Stopień rozdrobnienia płytek cementytu nieznaczny. Widzimy więc, że aż do 80% gniotu sumarycznego dzięki łagodnym gniotom pojedynczym płytki cementytu uginają się plastycznie i układają w kierunku przeróbki bez rozdrobnienia. W efekcie otrzymujemy strukturę perlityczną o płytkach ułożonych prawie w całej masie równolegle do osi wzdłużnej drutu. Różnica pomiędzy zdjęciami (a) i (b) polega przede wszystkim na stopniu rozdrobnienia cementytu. Na zdjęciu (a) mamy prawie w całości dobrze zachowaną strukturę perlityczną. Na zdjęciu (b) natomiast zdecydowanie przeważają obszary o daleko posuniętym rozdrobnieniu płytek cementytu. Dobrze zachowaną budowę perlityczną można zauważyć tylko w nielicznych miejscach. Można przypuszczać, że uprzednio rozdrobnione płytki obecnie ułożyły się w kierunku ciągnięcia.



Rys. 23. Gniot sumaryczny ok. 80%; pow. 4 x 10.000

a) próba I/12 - ciągi łagodne - drut dobry, b) próba III/4 - ciągi mocne - drut zły

Zdjęcie (a) przedstawia szczegół o bardzo dobrze zachowanej budowie perlitycznej o płytkach równoległych do osi drutu. Zdjęcie (b) natomiast przedstawia zupełnie odrębny obraz struktury o znacznym rozdrobnieniu cementytu.



Rys. 24. Gniot sumaryczny 90%

a) próba I/18; pow. 4 x 5000, b) próba I/18; pow. 4 x 20000

Na rys. 24 przedstawiono zdjęcia struktur drutu z partii I po gniocie sumarycznym 90,5% (Próba I/18), ciągniętego łagodnymi gniotami pojedynczymi. Zdjęcia przedstawiają tę samą strukturę, ale o różnych powiększeniach dla wyodrębnienia szczegółów. Obserwujemy pomimo bardzo dużego gniotu sumarycznego bardzo dobrze zachowaną strukturę perlityczną. Kierunkowość jest prawie całkowita.

#### 4.3. Dyskusja wyników badań metalograficznych

Przedstawione mikrodzjęcia obrazują wyraźnie wpływ wielkości gniotów pojedynczych na zmiany strukturalne drutów patentowanych, a przede wszystkim na proces rozdrabniania płytek cementytu. W rozdziale 2 i 3 stwierdzono wpływ wielkości gniotów pojedynczych na podatność do rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skręcania. Obecnie można przyjąć, że tworzenie się rozwarstwień w czasie skręcania ma między innymi związek ze strukturą drutu.

Reasumując opis mikrodzjęć można wyciągnąć następujące wnioski, dotyczące zmian strukturalnych występujących w czasie ciągnięcia drutów patentowanych o strukturze drobnego perlitu.

a) Przy stosowaniu łagodnych gniotów pojedynczych rzędu ok. 13% przeważają w procesie ciągnięcia plastyczne ugięcia i obracanie się płytek cementytu w kierunku osi wzdłużnej drutu. Aż do 90% gniotu sumarycznego zachowuje się budowa perlityczna, a stopień rozdrabnienia cementytu jest nieznaczny.

b) Przy stosowaniu dużych gniotów pojedynczych już przy gniocie sumarycznym powyżej 30% można zauważyć jak gdyby początki rozdrobnienia cementytu. Po gniocie sumarycznym przekraczającym 60% w strukturze drutu dominują obszary o rozdrobnionych płytkach cementytu. Im większy stopień odkształcenia, tym coraz mniej miejsc o dobrze zachowanej budowie perlitycznej. Przy gniocie sumarycznym powyżej 80% rozdrobnione płytki cementytu układają się wzdłuż osi drutu.

c) Ilość płytek cementytu w ziarnach o równoległym ułożeniu płytek względem kierunku ciągnięcia na długości  $1\mu\text{m}$  zwiększa się ze wzrostem stopnia odkształcenia, jak przedstawiono w poniższej tabelicy:

Wielkość gniotu sumarycznego	Ilość płytek cementytu	
	od - do szt/ $\mu\text{m}$	średnio szt/ $\mu\text{m}$
30%	10-15	12
70%	12-20	15
80%	15-21	18
90%	18-25	22

Spróbujmy teraz przeanalizować wpływ budowy strukturalnej, a właściwie wpływ procesu rozdrabniania cementytu w czasie ciągnięcia na podatność do tworzenia się rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skręcania drutów sprężynowych.

W czasie próby skręcania drutów sprężynowych złom może powstać albo w płaszczyźnie prostopadłej do osi drutu, albo w płaszczyźnie równoległej do osi drutu. Złom prostopadły do osi drutu wywołują poprzeczne naprężenia styczne  $\tau_p$ , a złom w płaszczyźnie równoległej do osi drutu wywołują wzdłużne naprężenia styczne  $\tau_w$ .

Naturalną tendencją przy próbie skręcania jest powstawanie złomu w płaszczyźnie prostopadłej do osi drutu. Ten rodzaj złomu przy skręcaniu próbek drutu pociąga za sobą jednak bardzo duże odkształcenia postaciowe, jak przedstawiono w rozdziale 2. Wynika z tego, że powstanie złomu w płaszczyźnie prostopadłej do osi drutu uwarunkowane jest własnościami plastycznymi. W przypadku niewystarczającej plastyczności, wzdłużne włókna próbki przy skręcaniu nie mogą odkształcić się (ulec wydłużeniu) w tak znacznym stopniu i następuje ścięcie w płaszczyźnie równoległej do osi drutu. W poprzednich rozdziałach wykazano jednoznacznie, że druty mające niższe własności plastyczne są bardziej podatne do rozwarstwień w czasie skręcania, niż druty o dobrych własnościach plastycznych.

Wg Nemeca [53 - str. 38] w strukturze perlitycznej opór odkształcenia ferrytu jest większy w kierunku prostopadłym do płytki cementytu niż

wzdłuż niej. Poślizgi w ferrycie w kierunku wzdłużnym są łatwiejsze i intensywnejsze niż w kierunku poprzecznym. W perlicie najmniej wytrzymałym miejscem jest płaszczyzna styku między ferrytem a cementytem, bo przy działaniu siły ma miejsce tutaj największe lokalne spiętrzenie naprężeń. Z tego wynika, że na skutek zwiększenia długości powierzchni styku zwiększa się także nierównomierność rozkładu naprężeń stycznych na danej powierzchni. Konsekwentnie Nemeč [53 - str. 194] wnioskuje, że im dłuższa płaszczyzna styku ferrytu z cementytem, tym łatwiejsze poślizgi przy mniejszych naprężeniach. Poza tym, im większa jest nierównomierność rozkładu odkształceń plastycznych w ziarnach, tym większa jest podatność do uszkodzeń ciała przy mniejszych plastycznych ogólnych odkształceniach.

Z powyższych rozważań wynika wniosek, że z im lepiej uporządkowaną strukturą mamy do czynienia, a więc w naszym przypadku z lepiej zachowaną po ciągnięciu strukturą perlityczną, tym łatwiej ferryt odkształca się przy skręcaniu, co prowadzi w efekcie do powstawania złomu w płaszczyźnie prostopadłej do osi drutu. Gdy natomiast mamy do czynienia ze strukturą składającą się z krótkich fragmentów cementytu, to w takiej strukturze ferryt jest mniej odkształcalny i ścięcie wzdłużne poprzedzi ścięcie prostopadłe.

W dobrze zachowanej strukturze perlitycznej łatwiej powstają poślizgi w ferrycie wywołane wzdłużnymi naprężeniami stycznymi przy skręcaniu, niż w strukturze perlitycznej o rozdrobnionych płytkach cementytu. Poza tym druty ciągnięte łagodnymi gniotami pojedynczymi są w mniejszym stopniu umocnione, a więc mają mniejszą gęstość dyslokacji, co również ma istotny wpływ na podatność do odkształceń plastycznych. Natomiast w drutach ciągniętych mocnymi gniotami pojedynczymi, niezależnie od większej gęstości dyslokacji, nierównomiernie rozłożone rozdrobnione cząstki cementytu wywierają hamujące oddziaływanie na plastyczne odkształcenie ferrytu.

Proces fragmentacji cementytu wywołuje dodatkowo powstawanie różnych mikropełnięć, wzrost liczby wakansów i innych defektów sieciowych przeciwdziałających odkształceniu plastycznemu. Niezmiernie interesujące badania na ten temat przeprowadził Gridniew [54, 55]. Szukając przyczyn nadmiernego wzrostu objętości drutów w czasie ciągnięcia, niemożliwego do wytłumaczenia przy pomocy teorii dyslokacji, zaobserwował on występowanie mikropor i mikropełnięć o kierunku wzdłużnym do osi drutu. Stwierdził również, że mikropełnięcia te powstają na granicy płytek cementytu i ferrytu w perlicie. Ilość tych pełnięć wzrasta ze wzrostem gniotu sumarycznego, a więc można przypuszczać przez analogię do innych zjawisk, że ilość ich będzie również wzrastać przy stosowaniu większych gniotów pojedynczych. W każdym razie wykryte przez Gridniewa mikropełnięcia z pewnością mogą być źródłem tworzenia się rozwarstwienia przy skręcaniu pod wpływem wzdłużnych naprężeń stycznych.

Można więc stwierdzić, że w drucie ciągniętym dużymi gniotami pojedynczymi istnieje szereg czynników przyczyniających się do rozwarstwień powierzchniowych przy skręcaniu.

## 5. WPŁYW UKŁADU CIĄGÓW I KĄTA CIĄNIENIA NA PODATNOŚĆ DO ROZWARSTWIEŃ PRZY SKRĘCANIU

### 5.1. Wprowadzenie

W rozdziale 2 i 3 stwierdzono, że im większe gnioty pojedyncze, tym większa skłonność do rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skręcania.

W rozdziale 4 natomiast wykazano, że podatność do rozwarstwień przy skręcaniu zależy od stopnia rozdrobnienia cementytu w perlicie. Przy stosowaniu dużych gniotów pojedynczych proces rozdrabniania cementytu zachodzi wcześniej i intensywniej niż przy małych gniotach pojedynczych. Natomiast przy stosowaniu łagodnych ciągów płytki cementytu uginają się plastycznie i układają w kierunku przeróbki bez rozdrobnienia, tak że w efekcie po dużym gniocie sumarycznym powyżej 80% otrzymujemy strukturę włóknistą o płytkach cementytu ułożonych w całej masie równolegle do osi wzdłużnej drutu. Druty o tego rodzaju strukturze obok wysokiej wytrzymałości na rozciąganie mają dobre własności plastyczne i małą skłonność do rozwarstwień w czasie skręcania. A więc proces technologiczny ciągnięcia drutów sprężynowych ze stali perlitycznej należy tak prowadzić, aby zmniejszyć do minimum proces rozdrabniania cementytu, a utrzymać do największych stosowanych gniotów sumarycznych dobrze zachowaną budowę perlityczną.

Rozważmy teraz, jakie czynniki procesu ciągnięcia mogą przyspieszyć względnie opóźnić proces rozdrabniania cementytu. W rozdziale 4 stwierdzono tylko istotny wpływ wielkości gniotów pojedynczych.

Nasuwa się przypuszczenie, że jeżeli duże gnioty pojedyncze wywołują wzmoczone rozdrabnianie cementytu, to podobnie może wpływać duży kąt stożka roboczego ciągadła. Przy dużym kącie ciągnięcia naprężenia gnące ułożenia drutu z ciągadła mogą przekraczać wytrzymałość na zginanie płytek cementytu powodując ich pękanie. Odwrotnie, przy małych kątach ciągnięcia, płytki cementytu będą się ugiąć plastycznie.

W koloniach perlitu o płytkach ułożonych równolegle do osi drutu cementyt w znacznie mniejszym stopniu ulega rozdrobnieniu niż przy ułożeniu płytek pod kątem lub prostopadle do kierunku ciągnięcia. Płytki cementytu ukierunkowane wzdłuż osi drutu w czasie wstępnych łagodnych ciągów wykazują mniejszą skłonność do rozdrobnienia w następnych ciągach aż do bardzo dużych gniotów sumarycznych. Nasuwa się pytanie czy stosując wstępne łagodne ciągi, sprzyjające uginaniu się płytek wzdłuż osi drutu, nie będzie można zastosować następnych mocniejszych gniotów pojedynczych bez wywołania rozdrobnienia cementytu. W ten sposób ogólna liczba ciągów mogłaby ulec zmniejszeniu. Ewentualnie po przekroczeniu gniotu optymalnego ( $G_g = \text{ok. } 80\%$ ), gdy zacznie występować spadek własności plastycznych, trzeba by ponownie obniżyć wielkości gniotów pojedynczych.

Autor proponuje więc nowy układ ciągów polegający na łagodnych gnio-  
tach wstępnych rosnących, następnie stałych dość silnych, a po przekrocze-  
niu dla danego drutu gniotu optymalnego stopniowo malejących.

Badania omawiane w niniejszym rozdziale mają więc na celu sprawdzenie  
dwóch hipotez:

1. Czy ze wzrostem kąta ciągnięcia wzrasta podatność do rozwarstwień  
powierzchniowych w czasie próby skręcania drutów ze stali wysokowę-  
glowych.
2. Czy ciągi wstępne mają wpływ na ww. podatność do rozwarstwień w cza-  
sie skręcania.

## 5.2. Badania własne

Badania przeprowadzono na drutach sprężynowych o średnicy 1,2 mm klasy  
C wg PN-65/M-80057. Do badań pobrano walcówkę sprowadzoną ze Szwecji, cha-  
rakteryzującą się bardzo dużą czystością i brakiem wad powierzchniowych.  
Wysoka jakość walcówki miała na celu wyeliminowanie wpływu różnych zmien-  
nych czynników pochodzenia hutniczego na własności drutu gotowego. Skład  
chemiczny walcówki był następujący:

Składnik	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu
%	0,90	0,30	0,21	0,020	0,017	ślady	ślady	0,10

Wykonany z walcówki tej półwyrób o średnicy 3,9 mm ciągniono w Hali  
Doświadczalnej CL PWM w Zabrze na średnicę 1,2 mm stosując różne kąty  
ciągnięcia  $2\alpha$ :  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  i  $20^\circ$  oraz cztery następujące układy ciągów:

- a) układ ciągów rosnąco-malejących wg propozycji autora - ilość ciągów XIV,
- b) układ ciągów malejących - ilość ciągów XIV,
- c) układ ciągów stałych ( $G_p = \text{ok. } 15\%$ ) - ilość ciągów XIV,
- d) układ ciągów stałych ( $G_p = \text{ok. } 23\%$ ) - ilość ciągów IX.

W tabelicy 3 zestawiono wszystkie cztery układy ciągów. Druty ciągniono  
na ciągarkach pojedynczych stosując jako środek smarujący mieszankę prosz-  
ku mydlanego i stearynianu wapnia z niewielkim dodatkiem grafitu.

Na drutach po każdym ciągu określano następujące własności:  $R_m$ ,  $R_{0,2}$ ,  
 $R_{0,02}$ ,  $Z$  i liczbę skręceń z oceną jakości złomu i powierzchni po próbie  
skręcania.

Na drutach gotowych  $\emptyset$  1,2 mm, oprócz wyżej wymienionych, określano do-  
datkowo:  $M_u$ ,  $M_{sr}$ ,  $M_{0,3}$ ,  $M_{0,03}$ ,  $R_s$ ,  $R_{sr}$ ,  $\tau_{0,3}$  i  $\tau_{0,03}$ . Badania momentów  
skręcających przeprowadzono na aparacie F-my Amsler typ 05.TA.89 w byłej  
Katedrze Mechaniki Technicznej Wydziału Mechaniczno-Technologicznego Po-  
litechniki Śląskiej przy współpracy z dr inż. A. Kwaśnickim.

Średnie wartości wyników badań drutów gotowych zebrano w tabelicy 4.  
Całość badań omówiono szczegółowo w [3]. W tabelicy 5 przedstawiono wyniki  
badań jakości powierzchni i złomu drutów gotowych po próbie skręcania.

Z przeprowadzonych badań wynika niewąznic, że im większy kąt ciągnięcia, tym większa podatność do rozwarstwień. Przy kącie ciągnięcia  $10^\circ$  rozwarstwieniu ulegały tylko druty ciągnięte wg układu (d). Przy kącie ciągnięcia  $15^\circ$  rozwarstwiały się druty ciągnięte wg układów (c) i (d), a przy kącie ciągnięcia  $20^\circ$  dobre były tylko druty ciągnięte wg układu rosnąco-malejącego (a). Uzyskane wyniki potwierdzają więc hipotezę, że im większy kąt ciągnięcia, tym druty sprężynowe wykazują większą skłonność do rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skręcania.

Porównując własności drutów gotowych ciągniętych wg układów a, b, c potwierdza się również przypuszczenie o wpływie ciągów wstępnych na podatność do rozwarstwień w czasie skręcania. Druty ciągnięte wg układu ciągów rosnąco-malejących (a) nie tylko, że nie ulegały rozwarstwieniu przy skręcaniu, niezależnie od wielkości kąta ciągnięcia, ale miały też najlepsze własności plastyczne. Różnice we własnościach pomiędzy układami (b) i (c) wskazują, że na podatność do rozwarstwień mają również wpływ ciągi końcowe.

W każdym razie został potwierdzony wpływ gniotów wstępnych na podatność do rozwarstwień w czasie próby skręcania. Łagodne gnioty wstępne zmniejszają tę podatność.

— o —

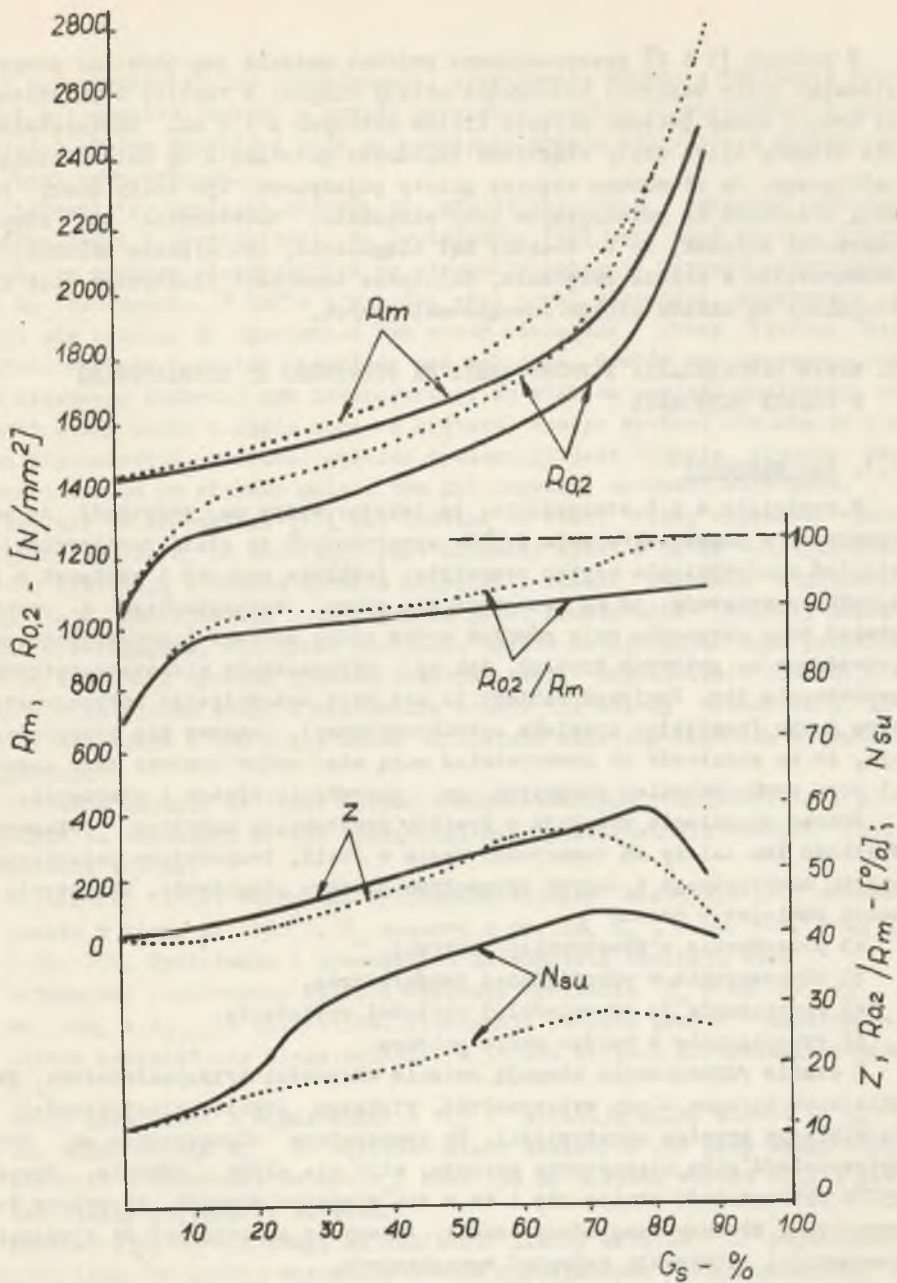
Badania  $R_m$ ,  $R_{0,2}$ ,  $Z$  i liczby skręceń po każdym ciągu umożliwiły wykreślenie krzywych zależności tych własności od wielkości gniotu sumarycznego [3]. Ponieważ objętość pracy nie pozwalała na zamieszczenie wykresów dla wszystkich układów ciągów i kątów ciągnięcia, na rys. 25 podano najbardziej charakterystyczne krzywe dla drutu o najlepszych własnościach plastycznych (Próba 1a;  $2\alpha = 10^\circ$ ) i o najgorszych własnościach plastycznych (Próba 3d;  $2\alpha = 20^\circ$ ).

Wytrzymałość  $R_m$  drutu 3d wzrastała bardziej intensywnie niż drutu ciągniętego wg układu rosnąco-malejącego 1a. Granica plastyczności  $R_{0,2}$  rosła w obu przypadkach bardziej intensywnie niż  $R_m$ . Wartości  $R_{0,2}$  drutów 3d osiągnęły po  $G_s = 80\%$  wartości  $R_m$ . W tym przypadku wskaźnik  $R_{0,2}/R_m$  równał się jedności i równocześnie druty zaczynały rozwarstwiać się przy skręcaniu.

Przewężenie i liczba skręceń wzrastały w miarę procesu ciągnięcia osiągając maksimum dla próby 3d przy gniocie sumarycznym ok. 70%, a dla próby 1a przy gniocie ok. 80%. Przesunięcie gniotu optymalnego w kierunku większych gniotów sumarycznych dla drutów ciągniętych wg układu rosnąco-malejącego jest zdaniem autora, najważniejszą cechą tego układu ciągów. Po przekroczeniu gniotu optymalnego następował spadek przewężenia i liczby skręceń. Spadek był bardziej intensywny dla drutów kruchych 3d niż dla drutów o lepszych własnościach plastycznych 1a. Liczba skręceń drutów ciągniętych wg układu rosnąco-malejącego (1a) była znacznie wyższa niż dla drutów ciągniętych silnymi gniotami pojedynczymi.

— o —





Rys. 25. Wpływ gniotu sumarycznego i układu ciągów na własności drutów sprężynowych

————— Układ ciągów rosnąco-malejących - próba 1a..... układ ciągów stałych,  $G_p = 23\%$ ; próba 3d

W pracach [1 i 2] przeprowadzono podobne badania jak omówiono powyżej, stosując tylko bardziej różnorodny układ ciągów. W tablicy 6 przedstawiono wyniki badań jakości skręceń drutów gotowych  $\varnothing$  1,2 mm. Rozwarstwieniu nie ulegały tylko druty ciągnięte łagodnymi gniotami i wg układu rosnąco-malejącego. Im stosowano większe gnioły pojedyncze tym druty miały większą skłonność do rozwarstwienia przy skręcaniu. Potwierdził się również poprzedni wniosek, że im większy kąt ciągnięcia, tym większa skłonność do rozwarstwienia w czasie skręcania. Najlepsze własności plastyczne miał drut ciągnięty wg układu ciągów rosnąco-malejących.

## 6. WPŁYW ODPUSZCZANIA I PROSTOWANIA NA PODATNOŚĆ DO ROZWARSTWIEŃ W CZASIE SKRĘCANIA

### 6.1. Wprowadzenie

W rozdziale 4 i 5 stwierdzono, że istotny wpływ na podatność do rozwarstwienia w czasie skręcania drutów sprężynowych ze stali perlitycznej ma stopień rozdrobnienia płytek cementytu. Praktyka ruchowa i wzmianki w literaturze wskazują, że na tworzenie się złomu strzępiastego i rozwarstwienia przy skręcaniu mają również wpływ różne zabiegi technologiczne przeprowadzane na gotowych drutach, jak np.: odpuszczanie niskotemperaturowe, prostowanie itp. Ponieważ zabiegi te nie mają zasadniczego wpływu na strukturę drutu (pomijając zjawiska submikroskopowe), nasuwa się przypuszczenie, że na podatność do rozwarstwienia mogą mieć wpływ jeszcze inne czynniki poza rozdrobnieniem cementytu, np.: naprężenia własne i starzenie.

Proces ciągnięcia wywołuje w drutach powstawanie naprężeń własnych. Wielkość ich zależy od zawartości węgla w stali, temperatury patentowania, gniotu sumarycznego i innych parametrów procesu ciągnięcia. Naprężenia te można zmniejszyć przez:

- a) prostowanie w prostownicy rolkowej,
- b) odpuszczanie w odpowiedniej temperaturze,
- c) rozciąganie do odpowiedniej wartości wydłużenia,
- d) przeciąganie z bardzo małym gniotem.

W czasie odpuszczania ulegają zmianie własności wytrzymałościowe. Najmniejszym zmianom ulega wytrzymałość, większym granica plastyczności, a największym granica sprężystości. Do temperatury odpuszczania ok. 250°C wytrzymałość albo nieznacznie wzrasta, albo nie ulega zmianie. Powyżej 250°C wytrzymałość obniża się i to w tym większym stopniu, im wyższa temperatura i dłuższy czas odpuszczania. Zmiany te są związane ze zjawiskiem starzenia i relaksacją naprężeń wewnętrznych.

Wzrost własności wytrzymałościowych w czasie odpuszczania spowodowany jest starzeniem. Równocześnie ze zjawiskiem starzenia może występować relaksacja naprężeń własnych i różne zmiany substruktury, jak: rozmieszczenie i gęstość dyslokacji, ilości wakansów itp. prowadzące zazwyczaj do obniżenia naprężeń wewnętrznych.

W przeciwieństwie do odpuszczania, prostowanie powoduje obniżenie własności wytrzymałościowych, a przede wszystkim granicy plastyczności i sprężystości. W tym przypadku mamy do czynienia prawie wyłącznie z relaksacją naprężeń wewnętrznych.

Starzenie po zgniocie objawia się przede wszystkim wzrostem granicy plastyczności i sprężystości. Wg Houdremonta [56] może mieć miejsce przypadek, że granica plastyczności po starzeniu osiągnie wartość wytrzymałości na rozciąganie. W takim przypadku stal traci własności plastyczne i staje się kruchą. Ze zjawiskiem tym autor niniejszej pracy zetknął się niejednokrotnie w swoich badaniach nad jakością drutów sprężynowych. Proces starzenia zachodzi tym intensywniej, im większa gęstość dyslokacji ponieważ atomy azotu i węgla mogą na krótszej drodze spotkać dyslokacje i w nich się umieścić. Ponieważ gęstość dyslokacji jest funkcją stopnia deformacji, więc im większy gniot, tym intensywniej zachodzi starzenie.

Badania Polakowskiego [57] nad drutami ze stali wyżej węglowych wykazały, że nawrót  $R_e$  po starzeniu jest hamowany albo w ogóle wstrzymywany, jeżeli występują w drucie wysokie naprężenia własne powstałe w procesie ciągnięcia. Zmniejszenie tych naprężeń przez prostowanie rolkowe, naprężenie rozciągające, lub przez usunięcie warstw zewnętrznych może przywrócić po starzeniu wyraźną granicę plastyczności. Odpuszczanie likwiduje w znacznie mniejszym stopniu naprężenia własne niż metody mechaniczne. Nawet odpuszczanie w  $400^{\circ}\text{C}$  nie usuwa całkowicie naprężeń własnych w drutach ciągnionych.

Obszerne badania na temat wpływu różnych zabiegów odpuszczania i prostowania na własności drutów wysokowęglowych przeprowadził Pungel [58]. Stwierdził on, że:

- a) Największy wzrost własności wytrzymałościowych następuje przy odpuszczaniu w temp. ok.  $200^{\circ}\text{C}$ .  $R_m$  wzrasta o ok. 3%,  $R_{0,2}$  o ok. 10%, a  $R_{0,01}$  o ok. 25%. Wydłużenie i przewężenie nieznacznie obniżają się.
- b) Intensywne prostowanie rolkowe wywołuje obniżenie  $R_m$  o ok. 8%,  $R_{0,2}$  o ok. 30%, a  $R_{0,01}$  o blisko 50%. Wydłużenie wzrasta prawie dwukrotnie. Liczba przegięć nie ulega zmianie, a liczba skręceń nieznacznie obniża się.
- c) Druty prostowane i odpuszczane w  $200^{\circ}\text{C}$  wykazują silny wzrost  $R_{0,01}$  o ok. 100%, wzrost  $R_{0,2}$  do wartości nieco większych niż przy samym odpuszczaniu i niewielki wzrost  $R_m$ . Poza tym ma miejsce wzrost  $A_{100}$  i spadek liczby przegięć i skręceń.

Schwier [59] zwraca uwagę na obniżenie liczby skręceń i pogorszenie jakości złomu po próbie skręcania drutów sprężynowych odpuszczanych w temp.  $250^{\circ}\text{C}$ .

Wyniki badań wielu innych autorów potwierdzają powyższe dane, że niskotemperaturowe odpuszczanie w zakresie temperatur  $150\text{--}250^{\circ}\text{C}$  podwyższa własności wytrzymałościowe, a obniża własności plastyczne. Prostowanie działa

odwrotnie niż odpuszczanie. Pewne kontrowersje występują odnośnie wpływu prostowania na liczbę przegięć i skręceń.

Chromik [60] zaobserwował wyraźny wpływ prostowania na poprawę jakości złomu po próbie skręcania pomimo spadku liczby skręceń. Natomiast Grabek [61], prowadząc podobne badania jak Chromik, stwierdził zarówno poprawę jakości złomu jak i wzrost liczby skręceń. Mankcher [62] uzyskuje po prostowaniu spadek liczby skręceń, a wzrost liczby przegięć. Liczne badania Tulenkowa [63 do 68] wykazały poprawę własności zmęczeniowych drutów liniarskich po prostowaniu rolkowym po każdym ciągu oraz wzrost liczby skręceń i przegięć.

Interesujące badania nad wpływem bardzo małych gniotów na własności drutów stalowych ciągnionych po patentowaniu przeprowadzili Nishioka [69, 70] i Nakamura [71]. Stwierdzili oni, że po zastosowaniu małego gniotu poniżej 10% może nastąpić spadek wytrzymałości drutów uprzednio silnie umocnionych. Bardzo łagodny ciąg o gniocie 1-2% przy kącie ciągnięcia poniżej  $10^\circ$  może wywołać spadek wytrzymałości sięgający  $15 \text{ kg/mm}^2$ . Obniżanie się wytrzymałości jest tym intensywniejsze, im większa zawartość węgla w stali i większy uprzedni gniot sumaryczny. Wg Nishioki mały końcowy gniot poprawia również jakość powierzchni i złomu po próbie skręcania. Nishioka tłumaczy powyższe zjawiska zmianą rozkładu naprężeń własnych. Naprężenia rozciągające na powierzchni przechodzą w ściskające, a ściskające w rdzeniu zmieniają znak na rozciągające.

W. Dahl [72] zaobserwował spadek własności wytrzymałościowych drutów ciągnionych po patentowaniu po poddaniu ich łagodnemu przepustowi na walcu duo. Zjawisko to Dahl tłumaczy zmianą rozkładu naprężeń własnych i uruchomieniem nowych dyslokacji, względnie uwolnieniem dyslokacji zablokowanych w czasie uprzedniego ciągnięcia.

Badania wpływu odpuszczania niskotemperaturowego na własności wytrzymałościowe na skręcanie przeprowadził Klimes [73, 74]. Badania te wykazały, że największy wzrost własności wytrzymałościowych na skręcanie ma miejsce przy odpuszczaniu w temp. ok.  $300^\circ\text{C}$ , a nie jak własności wytrzymałościowych na rozciąganie przy temp. ok.  $200^\circ\text{C}$ . Wyniki te są interesujące, ponieważ w temperaturze  $300^\circ\text{C}$  następuje również znaczny wzrost wydłużenia, a więc druty odpuszczane w tej temperaturze obok wysokich własności sprężystych na skręcanie mogą mieć dobre własności plastyczne.

## 6.2. Badania własne i dyskusja wyników

Badania przeprowadzono na drutach omówionych w rozdziale 5. Gotowe druty o średnicy 1,2 mm poddano następującym zabiegom:

1. Odpuszczaniu w oleju maszynowym w temperaturze  $200\text{--}220^\circ\text{C}$  w czasie 30 min.
2. Prostowaniu w prostownicy rolkowej o średnicy rolek 35 mm.
3. Prostowaniu jak pod 2, z następnym odpuszczaniem jak pod 1.

Po każdym z powyższych zabiegów określano następujące własności:  $R_m$ ,  $R_{0,2}$ ,  $R_{0,02}$ ,  $Z$ ,  $N_{su}$ ,  $M_u$ ,  $M_{sr}$ ,  $M_{0,3}$ ,  $M_{0,03}$ ,  $R_s$ ,  $R_{sr}$ ,  $\tau_{0,3}$  i  $\tau_{0,03}$ . Wyniki badań zostały szczegółowo omówione w [5]. Druty bezpośrednio po ciągnięciu i po starzeniu naturalnym na 12 przypadków w 6 ulegały rozwarstwieniu, a w 6 nie rozwarstwiały się przy skręcaniu. W wyniku odpuszczania podatność do rozwarstwień wyraźnie zwiększyła się. Na 12 prób tylko w 2 przypadkach druty po odpuszczeniu pozostały dobre, a we wszystkich pozostałych ulegały rozwarstwieniu w czasie skręcania. Należy podkreślić, że jako dobre pozostały tylko druty ciągnięte wg układu rosnąco-malejącego (tablica 7).

Wytrzymałość  $R_m$  w większości przypadków wzrastała po odpuszczeniu, a tylko u niektórych drutów bardzo silnie umocnionych (na ogół z układu d) następował spadek wytrzymałości. Zjawisko obniżania się  $R_m$  w tym przypadku można wytłumaczyć większym udziałem relaksacji naprężeń w porównaniu do starzenia. Zjawisko to nie omawiane dotychczas w literaturze, wymaga dalszych bardziej wnikliwych badań.

Granice  $R_{0,2}$  i  $R_{0,02}$  zasadniczo w wyniku odpuszczania wzrastały. Druty silniej umocnione (rozwarstwiający się) wykazały mniejszy wzrost  $R_{0,2}$  i  $R_{0,02}$  po odpuszczeniu niż druty mniej umocnione nierozwarstwiający się. Zjawisko to, podobnie jak dla  $R_m$  można wytłumaczyć większym udziałem u tych drutów relaksacji naprężeń niż starzenia.

Własności wytrzymałościowe na skręcanie w czasie odpuszczania ulegały podobnym zmianom jak własności wytrzymałościowe na rozciąganie. Wzrost  $\tau_{0,3}$  i  $\tau_{0,03}$  był na ogół większy niż wzrost  $R_{0,2}$  i  $R_{0,02}$ . Liczba skręceń obniżała się, z tym że drutów dobrych w większym stopniu niż złych.

W poprzednich rozdziałach stwierdzono, że druty sprężynowe ciągnięte z tego samego półwyrobu im wyższe miały własności wytrzymałościowe (były mniej plastyczne), tym bardziej były skłonne do rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skręcania. Wniosek ten został w niniejszej serii badań całkowicie potwierdzony. Na skutek odpuszczania w temperaturze ok. 200°C zwiększała się kruchość drutów, a zatem i podatność do rozwarstwień przy skręcaniu. Można więc przyjąć za udowodniony ujemny wpływ starzenia na podatność do rozwarstwień.

o

Dane literaturowe podają zgodnie, że prostowanie rolkowe obniża naprężenia własne i własności wytrzymałościowe, a zwiększa wydłużenie i przewężenie.

Badania własne autora wykazały przede wszystkim bardzo pozytywny wpływ prostowania na jakość skręceń (tablica 7). Po prostowaniu jako złe pozostały tylko druty najbardziej umocnione, ciągnięte wg układu (d). Można więc przyjąć, że niniejsza seria badań potwierdziła istotną rolę naprężeń własnych przy rozwarstwianiu się drutów w czasie skręcania. Wiadomo, że druty ciągnięte, a szczególnie wysokowęglowe, mają znaczne naprężenia

własne. Wiadomo również, że prostowanie rolkowe niweluje naprężenia własne, a szczególnie prawie całkowicie I rodzaju. Ponieważ prostowanie rolkowe obniża istotnie podatność do rozwarstwień w czasie skręcania, więc tym samym można przyjąć, że podatność do rozwarstwień zależy od wielkości naprężeń własnych. Bardziej wnikliwa analiza tego problemu zostanie przeprowadzona w rozdziale 7.

Własności wytrzymałościowe na rozciąganie  $R_m$ ,  $R_{0,2}$  i  $R_{0,02}$  po prostowaniu we wszystkich przypadkach ulegały obniżeniu.

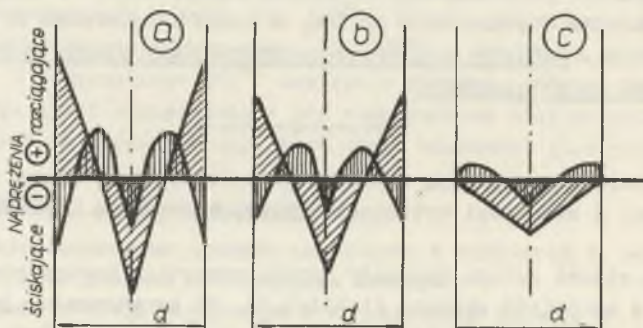
— o —

Odpuszczanie bezpośrednio po ciągnięciu wywołuje zjawisko starzenia i w pewnym stopniu relaksację naprężeń. Prostowanie wywołuje wyłącznie relaksację naprężeń. Stosując więc odpuszczanie po prostowaniu będziemy mieć do czynienia prawie wyłącznie ze starzeniem. W p. 6.1 podano, że odpuszczanie po prostowaniu może spowodować większy wzrost granicy sprężystości niż samo odpuszczanie. W badaniach własnych (tablica 9) stwierdzono przede wszystkim, że druty prostowane i odpuszczane mają mniejszą skłonność do rozwarstwień w czasie skręcania niż po samym odpuszczaniu. Ponieważ odpuszczanie jest zabiegiem niezbędnym przy wyrobie sprężyn, wprowadzenie prostowania drutów po ciągnięciu jest jak najbardziej wskazane.

## 7. WPŁYW NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH NA PODATNOŚĆ DO ROZWARSTWIEŃ PRZY SKRĘCANIU

### 7.1. Naprężenia własne w drutach ciągniętych

Warunki procesu ciągnięcia drutów wywołują nierównomierną deformację między oddzielnymi małymi lub większymi objętościami odkształcanego metalu. Na skutek nierównomiernych odkształceń powstaje niejednorodny stan naprężeń, a po zdjęciu obciążenia pozostają w metalu naprężenia własne.



Rys. 26. Wpływ prostowania rolkowego na rozkład naprężeń własnych  
 a) naprężenia wzdłużne -  $\sigma_L$ , b) naprężenia styczne -  $\sigma_T$ , c) naprężenia promieniowe -  $\sigma_R$

Siły normalne działające na stożkową powierzchnię ciągnadła, nawet przy nieobecności sił tarcia, wywołują opóźnianie się warstw zewnętrznych w stosunku do warstw wewnętrznych. Siły tarcia zewnętrznego zwiększają jeszcze bardziej to opóźnianie się warstw zewnętrznych. Dowodem tego jest tworzenie się "lejka" na końcu przeciągniętego drutu lub pręta [75]. W drucie po opuszczeniu ciągnadła i po odjęciu siły ciągnącej bardziej wydłużona warstwa powierzchniowa sprężystości skraca się, czemu przeciwstawia się w odwrotną stronę rozprężający się rdzeń (rys. 26a).

Drut po wyjściu z ciągnadła rozpręża się sprężystości również w kierunku promieniowym. Następuje pewien wzrost średnicy. W pierwszym rzędzie rozprężają się warstwy zewnętrzne, hamując możliwość całkowitego rozprężenia się warstw wewnętrznych. W efekcie w rdzeniu pozostają ściskające naprężenia promieniowe zmniejszające się do zera na powierzchni (rys. 26c). Pod wpływem ściskających naprężeń promieniowych warstwy wewnętrzne usiłują rozzerwać okowę warstw zewnętrznych wywołując w nich powstawanie obwodowych naprężeń rozciągających (rys. 26b).

Perlin [75] podaje, że w mosiężnych prętach ciągnionych po starzeniu na skutek naprężeń własnych mogą powstawać na powierzchni pęknięcia wzdłużne, wywołane obwodowymi naprężeniami rozciągającymi  $+ \sigma_{T0}$  lub pęknięcia poprzeczne wywołane wzdłużnymi naprężeniami rozciągającymi  $+ \sigma_L$ . Z punktu widzenia rozwarstwiania się drutów w czasie próby skręcania bardziej interesująca jest możliwość powstawania pęknięć wzdłużnych. Jak wiadomo z poprzednich rozdziałów, rozwarstwienie w czasie skręcania w pierwszym momencie stanowi rysa wzdłużna. Jeżeli naprężenia własne obwodowe mogą być źródłem tworzenia się pęknięć wzdłużnych, to tym samym mogą ułatwiać rozwarstwienie się drutów przy skręcaniu.

Tulenkow [64, 65] badając druty liniarskie  $\emptyset 1,0$  mm stwierdził występowanie osiowych naprężeń własnych  $+ \sigma_L = 0,15$  do  $0,3 R_m$ . Badania Krasilnikowa [76] drutów sprężynowych  $\emptyset 0,5$  mm wykazały naprężenia własne  $+ \sigma_L =$  ok.  $0,25 R_m$ . Gajduczenko i Tulenkov [77] stwierdzili, że przy kątach ciągnięcia normalnych i powiększonych nie obserwuje się wpływu układu ciągów na wielkość naprężeń własnych. Natomiast przy małych kątach ciągnięcia zastosowanie łagodnych ostatnich ciągów wyraźnie zmniejsza wielkość naprężeń własnych. W badanych drutach maksymalna wielkość naprężeń własnych  $+ \sigma_L$  wynosiła ok.  $0,4 R_m$ . W cytowanych badaniach wielkości naprężeń własnych mierzono metodą strawiania [75, 76].

Kozłowski i Wysoczin [78, 79] próbując liczyć naprężenia własne w drutach liniarskich na drodze analitycznej ocenili ich wielkość na ok.  $0,4 R_m$ .

W. Bühler i P. Kreher [80, 81] badali naprężenia własne w drutach ciągnionych metodą frezowania. Stwierdzili, że największe naprężenia rozciągające na powierzchni występują przy gniotach 10 do 20%. Wielkość naprężeń stycznych rozciągających  $+ \sigma_T$  może wynosić  $0,5 \sigma_L$ . Przy zastosowaniu bardzo małego gniotu rzędu 1% po silnych uprzednich gniotach następuje spadek naprężeń własnych, dochodzący do 20% wartości pierwotnych, a mogą

się nawet zdarzyć przypadki zmiany znaku naprężeń na ściskające. Wpływ bardzo małych końcowych gniotów pojedynczych na własności drutów liniarskich badał również T. Nishioka [69]. Prawie całkowitą likwidację naprężeń własnych uzyskiwał on przy gniotach mniejszych od 1,0%. Naprężenia ściskające na samej powierzchni występowały już przy gniotach pojedynczych poniżej 7%.

Liczne badania Peitera [82, 83, 84] na temat naprężeń własnych w drutach i prętach ciągnionych wykazały, że naprężenia styczne  $\sigma_T$  mogą wynosić  $0,67 \sigma_L$ , a  $\sigma_L$  może osiągać wartość  $0,87 R_{0,2}$ . Granica plastyczności przewężenie i wydłużenie całkowite i równomierne nie zależą od naprężeń własnych.

## 7.2. Wpływ prostowania i odpuszczania na wielkość naprężeń własnych

W czasie prostowania w rolkach drut ulega przemianom zgięciom wywołującym odkształcenie sprężysto-plastyczne i w efekcie zmianę rozkładu naprężeń własnych. Warstwy zewnętrzne ulegają na przemian rozciąganiu i ściskaniu. Wydłużanie się warstw powierzchniowych zachodzi w obszarze odkształceń plastycznych, co prowadzi do usunięcia osiowych rozciągających naprężeń własnych  $+\sigma_L$ , a nawet do powstania naprężeń ściskających -  $\sigma_L$ . Równocześnie na skutek niemożności pełnego wydłużania się warstwy zewnętrznej następuje spęczanie drutu i wzrost średnicy. Prowadzi to do zmniejszenia albo likwidacji rozciągających naprężeń stycznych  $+\sigma_T$ , a nawet do zmiany ich znaku na ściskające -  $\sigma_T$ .

Ogólnie można podać, że w wyniku prostowania (przy prawidłowo dobranych średnicach rolek) następuje zmiana stanu naprężeń własnych. Naprężenia rozciągające na powierzchni ulegają zmniejszeniu, a nawet zmianie na ściskające (rys. 26).

Naprężenia rozciągające  $\sigma_1$  wywołane ugięciem drutu na rolce w dowolnym punkcie strefy odkształcenia sprężystego przy  $\rho \ll \rho_e$  określa się wzorem:

$$\sigma_1 = E \frac{\rho}{r} \quad (9)$$

gdzie:

$E$  - moduł Younga,

$\rho$  - odległość dowolnego punktu na przekroju drutu od osi wzdluznej drutu,

$\rho_e$  - odległość granicy strefy plastycznej od środka drutu,

$r$  - promień krzywizny osi drutu przy ścisłym przyleganiu drutu do rolki.



Odkształcenie plastyczne zaczyna się pojawiać na powierzchni drutu przy promieniu krzywizny:

$$r_{pl} = \frac{E \cdot d}{2 \cdot R_{0,2}} \quad (10)$$

Np. w przypadku drutów badanych przez autora o średnicy 1,2 mm i  $R_{0,2} \approx 2500 \text{ N/mm}^2$  minimalny promień krzywizny  $r_{pl} \approx 50 \text{ mm}$ .

Tulenkow i Gajduczenko [63, 64, 75] stosując rolki prostujące o promieniu równym ok. 0,5  $r_{pl}$  uzyskali dla drutów liniarskich  $\emptyset$  1,1 i 1,3 mm zmniejszenie naprężeń osiowych z  $+550 \text{ N/mm}^2$  na  $+110 \text{ N/mm}^2$ . Przy prostowaniu drutów po każdym ciągu rozciągające naprężenia osiowe zmieniły znak na ściskające o wartości  $-75 \text{ N/mm}^2$ , a nawet  $-150 \text{ N/mm}^2$ . Te same druty po odpuszczaniu w temperaturze  $250-300^\circ\text{C}$  w czasie 6 godzin wykazały obniżenie naprężeń własnych w mniejszym stopniu, ponieważ, pozostawały w nich jeszcze naprężenia rozciągające osiowe  $+100$  do  $+300 \text{ N/mm}^2$ .

### 7.3. Naprężenia własne a podatność do rozwarstwień powierzchniowych w czasie skręcania

W celu właściwej oceny wpływu naprężeń własnych na podatność do rozwarstwień w czasie skręcania drutów sprężynowych rozpatrzmy jeszcze raz dane o naturze rozwarstwień wykazane w poprzednich rozdziałach.

Rozwarstwienie powstaje na początku próby skręcania po 1 do 2 obrotach w postaci podłużnej rysy pod wpływem wzdłużnych naprężeń tnących  $\tau_w$ . Naprężenie rozwarstwiająca  $R_{sr}$  wynosi przeciętnie ok. 91%  $R_g$ .

Przyłożone obciążenie osiowe może obniżyć niszczące naprężenie poprzeczne  $\tau_p$ , a więc ma wpływ na powstawanie złomu w płaszczyźnie prostopadłej do osi drutu, ale nie ma żadnego wpływu na powstawanie złomu w płaszczyźnie równoległej do osi drutu wywołanego naprężeniami wzdłużnymi  $\tau_w$ .

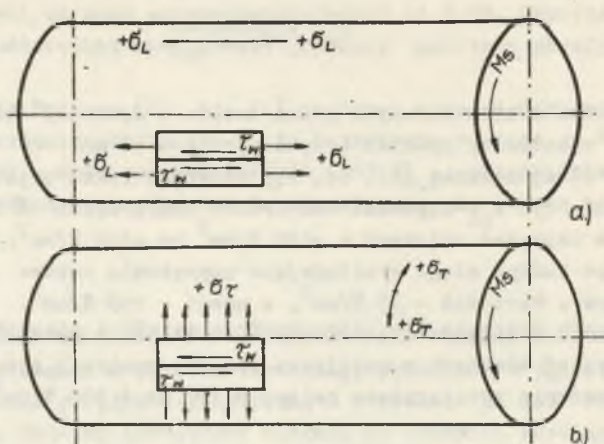
Próbki drutów ciągnionych skracają się w czasie skręcania, co świadczy o występowaniu w czasie skręcania osiowych naprężeń ściskających.

W drutach ciągnionych na powierzchni występują rozciągające naprężenia własne osiowe  $+\tau_L$  i obwodowe  $+\sigma_{T0}$ .

Naprężenia osiowe, jak wynika z powyższych danych, nie mogą wpływać na powstawanie wzdłużnych rozwarstwień wywołanych wzdłużnymi naprężeniami tnącymi przy skręcaniu (rys. 27a). Ponieważ naprężenia rozciągające prostopadłe do kierunku działania naprężeń stycznych  $\tau_p$  obniżają wielkość skręcającego momentu niszczącego, więc naprężenia własne obwodowe  $+\sigma_{T0}$  prostopadłe do wzdłużnych naprężeń tnących  $\tau_w$  przy skręcaniu mogą mieć wpływ na wielkość naprężenia rozwarstwiającego  $R_{sr}$  (rys. 27b).

Naprężenia własne osiowe  $+\sigma_L$  mogą wynosić w drutach ciągnionych, jak przedstawiono w p. 7.1, ok. 40%  $R_m$ , a naprężenia obwodowe mogą sięgać 50 do 70%  $\sigma_L$ , czyli naprężenia obwodowe mogą wynosić w skrajnych przypadkach 35%  $R_m$ . Z wykresu na rys. 15 wynika, że obciążenia rozciągające wynoszące

ok. 35%  $R_m$  mogą obniżyć wytrzymałość na skręcanie o ok. 6%, czyli o wielkość nie pozostającą bez znaczenia.



Rys. 27. Wpływ naprężeń własnych  $+\sigma_L$  i  $+\sigma_T$  na powstawanie rozwarstwień przy skręcaniu

Wytrzymałość na ścinanie drutów po dużym gnioście sumarycznym o wyraźnej budowie włóknistej jest mniejsza w kierunku wzdłużnym niż poprzecznym. Naprężenia własne obwodowe wytrzymałość tę mogą jeszcze bardziej obniżyć.

Występujące w czasie skręcania drutów sprężynowych skrócenie próbki pociąga za sobą wzrost średnicy. Wymuszony wzrost średnicy musi wywołać powstanie na powierzchni rozciągających naprężeń obwodowych. Naprężenia te będą się sumować z obwodowymi naprężeniami własnymi  $+\sigma_{\Pi 0}$ . W efekcie zjawisko skracania się próbek przy skręcaniu sprzyja wzdłużnemu rozwarstwianiu się drutów sprężynowych przy skręcaniu.

Przeprowadzona powyższa analiza pozwala na wyciągnięcie ogólnego wniosku, że na podatność do rozwarstwień powierzchniowych przy skręcaniu drutów stalowych, mają istotny wpływ obwodowe rozciągające naprężenia własne.

W rozdziale 6 wykazano doświadczalnie, że druty sprężynowe po prostowaniu rolkowym są znacznie mniej podatne do rozwarstwień w czasie skręcania, niż druty bezpośrednio po ciągnięciu. Ponieważ przyjmuje się za udowodnione, że prostowanie rolkowe w znacznym stopniu lub nawet całkowicie usuwa naprężenia własne w drutach ciągniętych, można badania omówione w rozdziale 6 przyjąć za empiryczne sprawdzenie wpływu naprężeń własnych na skłonność do rozwarstwień przy skręcaniu. Niemniej w dalszych badaniach należałoby przeprowadzić ilościową analizę wpływu wielkości naprężeń własnych na podatność do rozwarstwień.

## 8. OMÓWIENIE CAŁOŚCI WYNIKÓW BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań była analiza teoretyczna i technologiczna zjawiska rozwarstwiania się drutów sprężynowych ze stali wysokowęglowych w czasie próby skręcania. W całości pracy można wyodrębnić dwa główne kierunki:

- a) kierunek teoretyczny,
- b) kierunek technologiczny.

Kierunek teoretyczny miał dać odpowiedź, jaka jest natura i jakie są przyczyny teoretyczne rozwarstwiania się drutów przy skręcaniu. Kierunek technologiczny natomiast miał wyjaśnić, jak należy prowadzić proces technologiczny produkcji drutów sprężynowych, aby uniknąć rozwarstwiania się ich w czasie próby skręcania.

W pracy jednoznacznie stwierdzono, że rozwarstwienie wywołują wzdłużne naprężenia tnące  $\tau_w$ . W chwili powstawania ma ono charakter pęknięcia równoległego do osi drutu. Pęknięcie to w miarę dalszego skręcania wygina się zgodnie z kierunkiem działania momentu skręcającego i przechodzi w rysę spiralną. Analizowane rozwarstwianie się drutów sprężynowych przy skręcaniu stanowi więc typowy złom półokrągły, a nie kruchy, jak podawały dotychczas niektóre prace z zakresu ciągarstwa drutów. W przekroju poprzecznym rozwarstwienie przedstawia się początkowo jako rysa idąca promieniowo od powierzchni do środka, a następnie przechodzi w poprzek całego przekroju tworząc jak gdyby dwa półokrągłe ciągną wzajemnie skręcone.

Krzywe skręcania drutów nierozwarstwiających się mają przebieg regularny od początku próby aż do wystąpienia złomu. Krzywe skręcania drutów ulegających rozwarstwieniu charakteryzują się gwałtownym załamaniem krzywej (spadkiem momentu skręcającego) zaraz po pierwszych obrotach. Rozwarstwienie ma miejsce albo w strefie odkształceń sprężysto-plastycznych, albo zaraz na początku strefy odkształceń plastycznych. Po wystąpieniu załamania krzywe skręcania mają przebieg falowy, świadczący o cyklicznym rozprzestrzenianiu się rysy wzdłuż próbki. Początek rysy jest zawsze skierowany równoległe do osi drutu. Po rozprzestrzenieniu się rysy na całą długość próbki następuje zazwyczaj dalsze jej skręcanie połączone z bardzo intensywnym wzrostem momentu skręcającego, aż do wystąpienia złomu w płaszczyźnie poprzecznej.

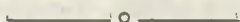
Długość próbek drutów w czasie skręcania ulega zmianie, co jest niezgodne z podstawowymi teoriami skręcania opracowanymi dla sztywnych krótkich próbek. Autor stwierdził, że druty bezpośrednio po obróbce cieplnej (żarzenie, patentowanie) o własnościach quasi-izotropowych, w czasie skręcania wydłużają się, a druty ciągnięte o wyraźnej budowie włóknistej ulegają skróceniu. Zmiany długości próbek drutów w czasie skręcania autor próbuje tłumaczyć następująco:

W czasie skręcania działają równocześnie naprężenia tnące poprzeczne  $\tau_p$  i wzdłużne  $\tau_w$ . W materiale polikrystalicznym quasi-izotropowym w czasie skręcania pierwsze półokrągłe mogą powstać z jednakowym prawdopodobieństwem

stwem w kierunku poprzecznym jak i wzdłużnym, co w efekcie może prowadzić do wydłużania się próbki. Natomiast w drutach ciągniętych o wyraźnej budowie włóknistej, poślizgi są łatwiejsze i bardziej prawdopodobne w kierunku wzdłużnym niż w poprzecznym. W takim przypadku poślizgi powstają pod wpływem wzdłużnych naprężeń tnących  $\tau_w$ , a poprzeczne naprężenia tnące  $\tau_p$  mogą powodować obrót ziarna prowadzący do skrócenia się próbki.

Skracanie się próbek drutów w czasie skręcania autor tłumaczy również ograniczoną możliwością wydłużania się wzdłużnych włókien przechodzących w spiralę. W przypadku druców to wydłużenie może dochodzić do 40% i więcej. Można przypuszczać, że wzdłużne włókna stawiają pewien opór przeciw wydłużaniu, co musi prowadzić do skrócenia się próbki. Wg badań autora skracanie się drutów sprężynowych nierozwarstwiających się wynosiło ok. 1,5%, a drutów rozwarstwiających się dochodziło do 6,0%. Zagadnienie zmian długości próbek drutów w czasie skręcania wymaga dalszych dociekań teoretycznych. W szczególności należałoby przeanalizować złożony stan naprężeń występujący przy skręcaniu wiotkich próbek drutów. Problem ten nie był rozpatrywany w niniejszej pracy, ponieważ nie dotyczy bezpośrednio zjawiska rozwarstwiania się drutów przy skręcaniu.

W czasie próby skręcania drutów sprężynowych złom może powstać więc albo w płaszczyźnie prostopadłej do osi drutu, albo w płaszczyźnie równoległej do osi drutu. Złom prostopadły wywołują poprzeczne naprężenia tnące  $\tau_p$ , a złom wzdłużny wzdłużne naprężenia tnące  $\tau_w$ . Powstawanie złomu poprzecznego pociąga za sobą bardzo duże odkształcenia postaciowe, jak przedstawiono powyżej, a więc wymagane są dobre własności plastyczne drutu. W przypadku nie wystarczającej plastyczności wzdłużne włókna próbki przy skręcaniu nie mogą odkształcić się (ulec wydłużeniu) w tak znacznym stopniu i następuje ścięcie w płaszczyźnie równoległej do osi drutu. W pracy jednoznacznie stwierdzono, że druty mające niższe własności plastyczne są bardziej podatne do rozwarstwień w czasie skręcania, niż druty o dobrych własnościach plastycznych.



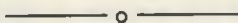
Z punktu widzenia teoretycznego na powstawanie rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skręcania drutów sprężynowych ze stali wysokowęglowych mają zasadniczy wpływ struktura, naprężenia własne i starzenie.

Przeprowadzone przez autora badania metalograficzne na mikroskopie elektronowym wykazały istotny wpływ stopnia rozdrobnienia płytek cementytu w drutach ze stali perlitycznej, ciągniętych po patentowaniu, na podatność do rozwarstwień powierzchniowych w czasie skręcania. Proces rozdrobnienia cementytu zależy od wielkości gniotów pojedynczych i wielkości gniotu sumarycznego. Przy stosowaniu łagodnych gniotów pojedynczych przeważają w procesie ciągnięcia plastyczne ugięcia i obracanie się płytek cementytu w kierunku osi wzdłużnej drutu. Aż do gniotu sumarycznego równego 90% zachowuje się w tym przypadku wyraźna budowa perlityczna. Przy stosowaniu

silnych gniotów pojedynczych po przekroczeniu gniotu sumarycznego ok. 60% w strukturze drutu dominują obszary o rozdrobnionych płytkach cementytu. Druty wykazujące znaczny stopień rozdrobnienia cementytu są znacznie bardziej podatne do rozwarstwień w czasie skręcania, niż druty o dobrze zachowanej budowie perlitycznej.

W drutach ciągnionych o dobrze zachowanej budowie drobnego perlitu ławnej powstają poślizgi w ferrycie, wywołane wzdłużnymi naprężeniami tnącymi przy skręcaniu, niż w strukturze o rozdrobnionych płytkach cementytu. W drutach ciągnionych mocnymi gniotami pojedynczymi nierównomiernie rozłożone sfragmentowane cząstki cementytu wywierają hamujące oddziaływanie na plastyczne odkształcenie ferrytu. W dalszych badaniach byłoby celowe sprawdzenie wpływu wykrytych przez Gridniewa [54, 55] wzdłużnych mikro-pęknięć w drutach ciągnionych na podatność do rozwarstwień w czasie próby skręcania.

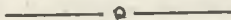
W pracy, poza wpływem wielkości gniotów pojedynczych na proces rozdrobnienia cementytu, wykazano również wpływ kąta ciągnięcia i układu ciągów. Stwierdzono, że druty ciągnięte przez ciągadła o większych kątach ciągnięcia są bardziej podatne do rozwarstwienia przy skręcaniu, niż druty ciągnięte przez ciągadła o małych kątach ciągnięcia. Prawdopodobnie przy dużym kącie ciągnięcia naprężenia gnące u wlotu i wylotu drutu z ciągadła mogą przekraczać wytrzymałość na zginanie płytek cementytu. Odwrotnie przy małych kątach ciągnięcia, płytki cementytu mogą się ugiąć i obracać plastycznie. Założenie autora, że stosując wstępne łagodne ciągi, wywołujące plastyczne uginanie się i obrót płytek cementytu w kierunku osi drutu, będzie można zastosować silniejsze następne gnioty pojedyncze bez wywołania rozdrobnienia cementytu, zostało również potwierdzone w przeprowadzonych badaniach. Druty ciągnięte wg układu ciągów rosnąco-malejących miały nie tylko mniejszą podatność do rozwarstwień przy skręcaniu, ale również lepsze własności plastyczne, niż druty ciągnięte z tą samą ilością ciągów ale o stałych gniotach pojedynczych.



Na powstawanie rozwarstwień przy skręcaniu mają wpływ różne zabiegi technologiczne przeprowadzane na gotowych drutach, jak np.: odpuszczanie, prostowanie, rozciąganie itp. Ponieważ zabiegi te nie mają zasadniczego wpływu na strukturę drutu (pomijając zjawiska submikroskopowe) stwierdzono w pracy, że na podatność do rozwarstwień, poza strukturą, mają wpływ również naprężenia własne i starzenie. Odpuszczanie niskotemperaturowe wywołuje przede wszystkim zjawisko starzenia, a prostowanie rolkowe prawie wyłącznie relaksację naprężeń. W pracy stwierdzono, że odpuszczanie niskotemperaturowe pogarsza własności plastyczne drutów sprężynowych i zwiększa podatność do rozwarstwień w czasie skręcania. Prostowanie natomiast polepsza własności plastyczne i zmniejsza skłonność do rozwarstwień w czasie skręcania. Ponieważ w literaturze wielokrotnie stwierdzono, że prostowanie

wanie rolkowe obniża albo nawet całkowicie likwiduje naprężenia własne, więc można przyjąć, że podatność do rozwarstwień powierzchniowych w czasie skręcania zależy od wielkości naprężeń własnych, a przede wszystkim od naprężeń I rodzaju.

W drutach ciągnionych na powierzchni występują rozciągające naprężenia własne osiowe  $\pm \sigma_L$  i obwodowe  $\pm \sigma_{TO}$ . Naprężenia osiowe nie mają wpływu na tworzenie się wzdłużnych rozwarstwień przy skręcaniu. Natomiast naprężenia obwodowe prostopadłe do wzdłużnych naprężeń tnących  $\tau_w$  mogą obniżyć wielkość naprężenia rozwarstwiającego. Na podstawie przeprowadzonej w pracy analizy można przyjąć, że obwodowe rozciągające naprężenia własne mają istotny wpływ na podatność do rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skręcania. Przeprowadzona przez autora analiza wpływu naprężeń własnych w dalszych badaniach wymagałaby szerszego ilościowego potwierdzenia wpływu wielkości naprężeń własnych na podatność do rozwarstwień w czasie skręcania.



Przeprowadzone badania dają wnikliwą odpowiedź, jakie parametry procesu ciągnięcia wpływają na podatność do rozwarstwień drutów sprężynowych w czasie próby skręcania. Stwierdzono jednoznacznie, że na podatność do rozwarstwień mają wpływ następujące parametry procesu ciągnięcia:

- a) kąt ciągnięcia - im większy, tym większa podatność. Zaleca się stosować kąt  $2\alpha = 7$  do  $10^\circ$ .
- b) gnioty pojedyncze - im większe, tym większa podatność. Zaleca się stosować  $G_p = 12$  do  $14\%$ .
- c) gniot sumaryczny - podatność do rozwarstwień występuje przy gniocie sumarycznym powyżej  $70\%$  i to w tym większym stopniu, im jest on większy.
- d) układ ciągów - najmniejszą podatność mają druty ciągnięte wg układu rosnąco-malejącego. (Wstępne i końcowe ciągi łagodne).
- e) temperatura drutu w czasie ciągnięcia - im niższa, tym mniejsza podatność. Zaleca się stosować jak najlepsze środki smarujące i jak najlepsze chłodzenie ciągadeł i bębnow ciągarskich.
- f) rodzaj obróbki końcowej drutu:
  - odpuszczanie niskotemperaturowe ( $200-250^\circ\text{C}$ ) zwiększa znacznie podatność do rozwarstwień
  - prostowanie rolkowe znacznie obniża podatność
  - prostowanie z następnym odpuszczaniem zwiększa podatność, ale w mniejszym stopniu niż samo odpuszczanie.

Ogólnie na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wszystkie czynniki technologiczne pogarszające plastyczność gotowych drutów zwiększają skłonność do rozwarstwień. Powinno się więc tak prowadzić proces technologiczny ciągnięcia drutu, aby granica plastyczności i sprężystości była jak najniższa, przy założonej wytrzymałości na rozciąganie.

Wynikałoby z tego, że powyższe wielkości, a również wskaźniki  $R_{O,2}/R_m$ ,  $\tau_{O,3}/R_m$  itp. powinny dawać jednoznaczną odpowiedź, czy drut będzie się rozwarstwiał przy skręcaniu czy nie. Z pracy wynika jednak, że nie zawsze wielkości te mogą dać na ten temat odpowiedź. Stosując różne parametry technologiczne produkcji można otrzymywać druty dobre lub złe o tych samych własnościach wytrzymałościowych. Np. stosując układ ciągów rosnąco-malejących i mały kąt ciągnięcia możemy otrzymać druty nierozwarstwiające się pomimo bardzo dużego gniotu sumarycznego (ponad 90%), wysokiej wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności. Przy innych układach ciągów druty mogą się rozwarstwiać w czasie skręcania po mniejszym gniocie sumarycznym, przy niższej  $R_m$ ,  $R_{O,2}$ . Tak samo druty poddane odpuszczaniu w zakresie temperatur 200 do 250°C pomimo wyższych wskaźników  $R_{O,2}/R_m$  czy  $\tau_{O,3}/R_m$  mogą być dobre, pomimo tego, że bezpośrednio po ciągnięciu rozwarstwiały się przy niższych wskaźnikach.

W związku z powyższym stwierdza się, że własności mechaniczne drutów mogą być miernikiem podatności do rozwarstwień, ale tylko dla drutów tego samego gatunku, o tej samej średnicy, ciągniętych z tego samego półwyrobu i o tej samej obróbce końcowej. W takich przypadkach im niższa granica plastyczności  $R_{O,2}$  lub  $\tau_{O,3}$  i im większe przewężenie, tym drut ma mniejszą skłonność do rozwarstwień powierzchniowych przy skręcaniu.

A więc nie tylko wysoki stopień umocnienia drutu ma wpływ na podatność do rozwarstwień przy skręcaniu, ale jak wykazano uprzednio, istotny wpływ mają struktura, naprężenia własne i zjawisko starzenia, mogące występować niezależnie od siebie.

---

Autor pracy przypuszcza, że przeprowadzone badania w pewnym stopniu wypełniły lukę, jaką stanowił brak dokładnego rozeznania o naturze i przyczynach powstawania rozwarstwień powierzchniowych drutów w czasie próby skręcania. Wykorzystanie wyników badań w praktyce przemysłowej powinno przyczynić się do poprawy jakości drutów sprężynowych i zwiększenia użytku drutów nierozwarstwiających się w czasie próby skręcania. Wyniki pracy mogą stanowić również pewien przyczynek do opracowywania technologii produkcji drutów o najwyższych możliwych wytrzymałościach, będących obecnie przedmiotem badań wielu placówek naukowych na całym świecie.

## 9. WNIOSKI KOŃCOWE

1. Rozwarstwienia powierzchniowe drutów sprężynowych przy skręcaniu wywołują wzdłużne naprężenia tnące. Rozwarstwienie w chwili powstawania ma kierunek równoległy do osi drutu. W miarę dalszego skręcania wydłuża się i wygina przechodząc w spiralną ryse. Rozwarstwienie stanowi wzdłużny złom poślizgowy.

2. Krzywe skręcania drutów ulegających rozwarstwieniu charakteryzują się gwałtownym załamaniem krzywej (spadkiem momentu skręcającego) zaraz po pierwszych obrotach. Załamanie krzywej powstaje w chwili utworzenia się rozwarstwiania powierzchniowego.
3. Rozwarstwienie rozprzestrzenia się w czasie skręcania w sposób skokowy, co obrazuje falowy przebieg krzywej skręcania.
4. Długość próbek drutów w czasie skręcania ulega zmianie. Próbki drutów bezpośrednio po obróbce cieplnej o własnościach quasi-izotropowych ulegają wydłużeniu, a próbki drutów ciągnionych o wyraźnej budowie włóknistej ulegają skróceniu. Próbki drutów rozwarstwiających się w czasie skręcania ulegają skróceniu w znacznie większym stopniu (ok. 4-krotnie) niż druty nie rozwarstwiający się.
5. Przyczynami zwiększonej podatności do rozwarstwień powierzchniowych przy skręcaniu drutów sprężynowych ze stali węglowych mogą być:
  - a) struktura
  - b) naprężenia własne
  - c) zjawisko starzenia
- 5.1. Im większy stopień rozdrobnienia cementytu w perlicie, tym większa podatność do rozwarstwień w czasie skręcania. Na proces rozdrobnienia cementytu mają wpływ gnioty pojedyncze, gniot sumaryczny, kąt ciągnięcia i układ ciągów. Najmniejszą podatność do rozwarstwień, a równocześnie najlepsze własności plastyczne uzyskano stosując małe kąty ciągnięcia i łagodne ciągi pojedyncze lub układ ciągów rosnąco-malejących (łagodne ciągi wstępne i końcowe).
- 5.2. Im wyższe na powierzchni rozciągające obwodowe naprężenia własne, tym większa skłonność do rozwarstwień powierzchniowych w czasie skręcania. Podatność do rozwarstwień wyraźnie zmniejsza się po usunięciu naprężeń własnych.
- 5.3. Zjawisko starzenia, na skutek obniżania własności plastycznych, zwiększa skłonność do rozwarstwień w czasie skręcania.
6. Na podatność do rozwarstwień przy skręcaniu drutów sprężynowych ze stali wysokowęglowych mają wpływ następujące parametry procesu ciągnięcia:
  - a) kąt ciągnięcia - im większy, tym większa podatność
  - b) gnioty pojedyncze - im większe, tym większa podatność
  - c) gniot sumaryczny - im większy, tym większa podatność
  - d) układ ciągów - łagodne gnioty wstępne i końcowe obniżają podatność
  - e) temperatura ciągnięcia - im niższa, tym mniejsza podatność
  - f) rodzaj obróbki końcowej drutu:
    - odpuszczanie niskotemperaturowe (200-250°C) zwiększa podatność do rozwarstwień
    - prostowanie rolkowe obniża podatność
    - prostowanie z następnym odpuszczaniem zwiększa podatność, ale w mniejszym stopniu niż samo odpuszczanie.



7. Całość przeprowadzonych badań wykazała, że wszystkie czynniki technologiczne obniżające własności plastyczne gotowych drutów zwiększają skłonność do rozwarstwień powierzchniowych w czasie próby skręcania drutów sprężynowych ze stali wysokowęglowych.

#### ZAKOŃCZENIE

Autor pragnie wyrazić serdeczne podziękowanie Panu prof. dr inż. Z. Wusatowskiemu za wiele cennych uwag udzielonych w toku wykonywania pracy, Panu dr inż. A. Kwaśnickiemu za przeprowadzenie badań wytrzymałościowych na skręcanie w Katedrze Mechaniki Technicznej Politechniki Śląskiej oraz Pani doc. dr hab. inż. Ł. Cieślakowej i Panu doc. dr hab. inż. A. Maciejnemu za pomoc w interpretacji wyników badań metalograficznych.

Wyrazy wdzięczności autor kieruje również tą drogą Kierownictwu BISRA w Sheffield w Anglii, a w szczególności Panom T.W. Johnsonowi, B.M. Armstrongowi i dr D. Dulieu oraz Panu G. Gravesowi ze "Spring Research Association" w Sheffield za umożliwienie i pomoc w przeprowadzaniu własnych badań w czasie pobytu w Anglii.

Poza tym autor serdecznie dziękuje Panu dr hab. inż. Z. Steiningerowi i wszystkim kolegom i współpracownikom z Centralnego Laboratorium Przemysłu Wytwarzania Metalowych w Zabrze za pomoc w toku prowadzenia wieloletnich badań będących przedmiotem niniejszej pracy.

## OZNACZENIA STOSOWANE W PRACY

- $A_{100}$  - wydłużenie względne w % na długości pomiarowej  $L_0 = 100$  mm
- $d$  - średnica drutu w mm
- $G_p$  - gniot pojedynczy w %
- $G_s$  - gniot sumaryczny w %
- $I_0$  - biegunowy moment bezwładności przekroju kołowego  $I_0 = \pi d^4/32$
- $L_0$  - początkowa długość pomiarowa w mm
- $M_u$  - moment skręcający niszczący w N . mm
- $M_{sr}$  - moment skręcający rozwarstwiający w N . mm
- $M_{0,3}$  - moment skręcający na umownej granicy plastyczności na skręcanie ( $\gamma = 0,3\%$ ) w N . mm
- $M_{0,03}$  - moment skręcający na umownej granicy sprężystości na skręcanie ( $\gamma = 0,03\%$ ) w N . mm
- $N_s$  - liczba skręceń
- $N_{su}$  - liczba skręceń niszcząca próbkę
- $R_m$  - wytrzymałość na rozciąganie w  $N/mm^2$
- $R_e$  - wyraźna granica plastyczności w  $N/mm^2$
- $R_{0,2}$  - umowna granica plastyczności w  $N/mm^2$
- $R_{0,02}$  - umowna granica sprężystości w  $N/mm^2$
- $R_s$  - wytrzymałość na skręcanie w  $N/mm^2$
- $R_{sr}$  - naprężenie rozwarstwiający przy skręcaniu w  $N/mm^2$
- $Z$  - przewężenie względne w %
- $\gamma$  - kąt odkształcenia postaciowego w rad.
- $\epsilon$  - wydłużenie względne w %
- $\lambda_s$  - zmiana długości próbki drutu przy skręcaniu,  $+\lambda_s$  - wydłużenie
- $\lambda_g$  - skrócenie, w %
- $\rho$  - promień dowolnego punktu na przekroju drutu w mm
- $\sigma$  - naprężenie normalne w  $N/mm^2$
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - naprężenia główne w  $N/mm^2$
- $\sigma_L$  - naprężenia własne osiowe w  $N/mm^2$   $+\sigma_L$  - rozciągające,  $-\sigma_L$  - ściskające
- $\sigma_T$  - naprężenia własne styczne w  $N/mm^2$ ,  $+\sigma_T$  - rozciągające,  $-\sigma_T$  - ściskające
- $\sigma_{TO}$  - naprężenia własne obwodowe w  $N/mm^2$
- $\tau$  - naprężenia styczne (tnące) w  $N/mm^2$
- $T_p$  - poprzeczne naprężenia tnące przy skręcaniu działające w płaszczyznach prostopadłych do osi drutu w  $N/mm^2$ .

- $\tau_w$  - wzdłużne naprężenia tnące przy skręcaniu działające w płaszczyznach równoległych do osi drutu w  $N/mm^2$
- $\tau_e$  - granica plastyczności przy skręcaniu w  $N/mm^2$
- $\tau_{0,3}$  - umowna granica plastyczności przy skręcaniu w  $N/mm^2$
- $\tau_{0,03}$  - umowna granica sprężystości przy skręcaniu w  $N/mm^2$
- $\varphi$  - kąt skręcenia w rad.
- $\varphi = \frac{\varphi}{L_0}$  - jednostkowy kąt skręcenia w rad.
- $\tau_{rz}$  - rzeczywiste naprężenie styczne w  $N/mm^2$ .

## LITERATURA

- [1] Godecki L.: Wstępna analiza wpływu parametrów procesu ciągnięcia na własności drutów sprężynowych. Sprawozdanie CLPWM 19/2/67, Zabrze, 1967.
- [2] Godecki L.: Wstępna analiza własności wytrzymałościowych na skręcanie drutów sprężynowych. Sprawozdanie CLPWM 58/5/67, Zabrze, 1967.
- [3] Godecki L.: Wpływ układu ciągów na własności drutów sprężynowych. Sprawozdanie CLPWM 41/3/68a, Zabrze, 1968.
- [4] Godecki L.: Sprawozdanie z badań wytrzymałościowych drutów sprężynowych przeprowadzonych w BISRA w Anglii. Sprawozdanie CLPWM 41/3/68b, Zabrze, 1968.
- [5] Godecki L.: Wpływ starzenia naturalnego, odpuszczania i prostowania na własności drutów sprężynowych. Sprawozdanie CLPWM 141/12/68. Zabrze, 1968.
- [6] Godecki L.: Sprawozdanie z badań metalograficznych drutów sprężynowych przeprowadzonych w BISRA w Anglii. Sprawozdanie CLPWM 31/5/69. Zabrze, 1969.
- [7] Godecki L.: Analiza zjawisk zachodzących przy skręcaniu drutów. Sprawozdanie CLPWM 54/7/69. Zabrze, 1969.
- [8] Godecki L.: Naprężenia własne w drutach sprężynowych. Sprawozdanie CLPWM 69/9/69. Zabrze, 1969.
- [9] Godecki L.: Wpływ gniotów wstępnych i końcowych na własności drutów sprężynowych. Sprawozdanie CLPWM 10/2/70. Zabrze, 1970.
- [10] Godecki L.: Wire Industry, nr 421, 1969, str. 47.
- [11] Godecki L.: Wire Industry, nr 422, 1969, str. 151.
- [12] Godecki L.: Wire Industry, nr 423, 1969, str. 241.
- [13] Godecki L.: Wire Industry, nr 425, 1969, str. 419.
- [14] Godecki L.: Wire Industry, nr 426, 1969, str. 524.
- [15] Godecki L.: Biuletyn Techniczny ZPWW, nr 7, 1968, str. 13.
- [16] Godecki L.: Biuletyn Techniczny ZPWW, nr 11, 1968, str. 15.
- [17] Godecki L.: Biuletyn Techniczny ZPWW, nr 5, 1969.
- [18] Godecki L.: Biuletyn Techniczny ZPWW, nr 9, 1969.
- [19] Godecki L.: Biuletyn Techniczny ZPWW, nr 11, 1969.
- [20] Szapasznikow N.A.: Mechaniczeskije ispytanije metalżow. Moskwa 1951, str. 137.
- [21] Katarzyński S., Kocańda S., Zakrzewski M.: Badania własności mechanicznych metali. WNT Warszawa, 1967, str. 240.
- [22] Bielażew M.W.: Wytrzymałość materiałów. MON, Warszawa, 1956.
- [23] Wasatowski Z.: Archiwum Hutnictwa, t. 1, 1956, str. 283.
- [24] Wasatowski Z.: Podstawy walcowania, Katowice, 1960 r.
- [25] Wasatowski Z.: Zeszyty naukowe Pol.Śl. Mechanika 2, Gliwice, 1955.
- [26] Kunda B.: Praca doktorska, Pol.Śl., Gliwice, 1955.

- [27] Timoshenko: Strength of Materials. New York, 1950.
- [28] Swift H.W.: Engineering, nr 4, 1947, str. 253.
- [29] Nadai A.: Theory of Flow a. Fracture of Solids. New York, 1950.
- [30] Stüwe H.P., Asbeck H.O.: Arch. Eisenhütt. nr 2, 1969, str. 125.
- [31] Steininger Z.: Wady drutu stalowego. Katowice, 1966.
- [32] Rachstadt A.G.: Prużynnyje spławy. Mietałkurgija, Moskwa, 1965.
- [33] Potemkin K.D.: Tiermiczeskaja obrabotka i wołoczenije vysoko procznoj prowołoki. Mietałkurgizdat, Moskwa, 1963.
- [34] Krautmacher H., Greis F.: Stahl u. Eisen, nr 25, 1962.
- [35] Bleiløb F., Schücher E.: Stahl u. Eisen, nr 20, 1957.
- [36] Wistreich I.G.: Metal. Treat. a Drop. Forg. nr 20, 1963, str. 98.
- [37] Steininger Z.: Wire Industry, nr 382, 1965, str. 963.
- [38] Schultz E.H., Füngel W.: VDE nr 100, 1964, str. 1427.
- [39] Zitkow E.I., Pospiechow F.P.: Stalnyje kanaty, Moskwa, 1965.
- [40] Schwier F.: Stahl u. Eisen, nr 20, 1959.
- [41] Eisenhuth C.: Draht-Welt, nr 10, 1963.
- [42] Eisenhuth C.: Stahl u. Eisen, nr 23, 1963.
- [43] Krautmacher H., Freis F.: Stahl u. Eisen, nr 13, 1965.
- [44] Godecki L., Mierzejewski L.: Biuletyn Techniczny ZPWW, nr 4, 1966.
- [45] Zubow W., Graczew S.: Struktura i swojstwa stalnoj prużynnoj lenty. Mietałkurgija, Moskwa, 1964.
- [46] Karonskij W.M., Kurdjumow G.W., Perkas M.D.: Fiz. Mietałł. Mietałłowied. Tom 15, nr 2, 1963, str. 244.
- [47] Kardonskij W.M., Kurdjumow G.W., Perkas M.D.: Mietałłowied. Tiermoobr. Mietałł. nr 2, 1964, str. 2.
- [48] Embury I.D., Fisher R.M.: Acta Metalurgica, Tom 14, nr 2, 1966, str. 147.
- [49] Embury I.D., Keh A.S., Fisher R.M.: Transact. Metall. Soc. AIME, Tom 236, 1966, str. 1252.
- [50] Chandhok V.K., Kasak A., Hirth I.P.: Transaction ASM, Tom 59, 1966, str. 288.
- [51] Gridniew W.M.: Stalnyje Kanaty - Zbornik Trudow nr 4, Kiew, 1967, str. 348.
- [52] Maurer K.I., Rosegger R.: Berg- u. Hüttenmännische Monatshefte nr 9, 1967, str. 412.
- [53] Nemeč I.: Wytrzymałość i sztywność części stalowych. WNT, Warszawa, 1968.
- [54] Gridniew W.N. i inni: Ostatocznyje naprażenija i ustałość prowołoki. Zbornik trudow. Czermetinformacja, Moskwa, 1967, str. 13.
- [55] Gridniew W.N. i inni: Ostatocznyje naprażenija i ustałość prowołoki. Zbornik trudow. Czermetinformacja, Moskwa, 1967, str. 18.
- [56] Houdremont E.: Handbuch der Sonderstahlkunde. Berlin, 1956, str. 209.
- [57] Polakowski N.H.: J. Iron Steel Inst. 1952, str. 369.
- [58] Füngel W.: Stahl u. Eisen. nr 25, 1956.
- [59] Schwier F.: Stahl u. Eisen. nr 2, 1952.
- [60] Chromik H.: Biuletyn Techn. ZPWW nr 23, 1961.
- [61] Grabek J.: Praca dyplomowa AGH - 1965.
- [62] Mankher G.: Draht Welt nr 11, 1964.

- [63] Tulenkow F.K.: Stal nr 9, 1964.
- [64] Tulenkow F.K., Gajduczenko B.I.: Stal nr 3, 1964.
- [65] Tulenkow F.K.: Czernaja Metałł. Iz WUZ nr 5, 1964.
- [66] Tulenkow F.K.: Stalnyje Kanaty nr 2. Zbornik Trudow. Kijew 1965 str. 364.
- [67] Tulenkow F.K.: Stalnyje Kanaty nr 2. Zbornik Trudow. Kijew 1965 str. 367.
- [68] Tulenkow F.K.: Stalnyje Kanaty nr 4. Zbornik Trudow. Kijew 1967 str. 337.
- [69] Nishioka T.: J. Japan Institute of Metals. Vol. 21 nr 9, 1957, str. 540.
- [70] Nishioka T.: J. Japan Institute of Metals. Vol. 22 nr 1, 1958, str. 26.
- [71] Nakamura K.: J. Mechanical Laboratory (Japan). Vol. 15, nr 6. 1961, str. 515.
- [72] Dahl W.: Arch. Eisenhütt. nr 9, 1968, str. 657.
- [73] Klimes A.: Hutni druhovyroba. nr 1, 1962.
- [74] Klimes A.: Hutni druhovyroba nr 10, 1965.
- [75] Perlin I.L.: Teoria wołoczenija. Moskwa 1957, str. 23.
- [76] Krasilnikow L.A.: Stal nr 6, 1966.
- [77] Gajduczenko B.I., Tulenkow K.I.: Ostatocznyje naprjażenija i ustatok prowołoki. Zbornik trudow. Czermetinformacija, Moskwa, 1967. str. 25.
- [78] Kozłow W.T., Wysoczin W.D.: Stalnyje Kanaty nr 3, Zbornik Trudow Kijew, 1966, str. 376.
- [79] Kozłow W.T., Wysoczin W.D.: Stalnyje Kanaty nr 4, Zbornik Trudow Kijew, 1967, str. 302.
- [80] Bühler H., Kreher P.: DRAHT, nr 8, 1968, str. 531.
- [81] Bühler H., Kreher P.: Arch. Eisenhütt. Tom 39, 1968, str. 545.
- [82] Peiter A.: DRAHT, nr 4, 1963, str. 175.
- [83] Peiter A.: DRAHT, nr 10, 1963.
- [84] Peiter A.: Draht-Welt, nr 7, 1964.

## W y k a z   t a b l i c

będących w posiadaniu autora i stanowiących archiwum pracy

1. Wyniki badań wytrzymałościowych na rozciąganie i skręcanie (do rozdziału 3).
2. Wyniki badań wytrzymałościowych na rozciąganie i skręcanie - Wskaźniki (do rozdziału 3).
3. Zestawienie układów ciągów (do rozdziału 5).
4. Własności drutów gotowych  $\emptyset$  1,2 mm, ciągnionych wg różnych układów ciągów (do rozdziału 5).
5. Jakość skręceń drutów  $\emptyset$  1,2 mm ciągnionych wg różnych układów ciągów i przez ciągadła o różnym kącie ciążeń wg [3].
6. Jakość skręceń drutów  $\emptyset$  1,2 mm ciągnionych wg różnych układów ciągów i przez ciągadła o różnym kącie ciągnienia 1,2.
7. Wpływ odpuszczania i prostowania na jakość skręceń wg [5].
8. Wpływ odpuszczania i prostowania na jakość skręceń wg [9].
9. Średnie wartości nierozwarstwiających się i rozwarstwiających się drutów przy próbie skręcania wg badań wg [5].

## ANALIZA PRZYCZYN POWSTAWANIA ROZWARSTWIEŃ POWIERZCHNIOWYCH DRUTÓW SPRĘŻYNOWYCH ZE STALI WYSOKOWĘGLOWYCH PODCZAS PRÓBY SKRĘCANIA

### S t r e s z c z e n i e

Druty sprężynowe ze stali węglowych po próbie skręcania nie powinny wykazywać spiralnych rozwarstwień powierzchniowych. Warunek ten jest szczególnie uciążliwy do dotrzymania, ponieważ zagadnienie rozwarstwiania się drutów przy skręcaniu nie było dotychczas w sposób wystarczający przebadane.

Celem badań omówionych w pracy było udzielenie odpowiedzi na dwa następujące pytania:

- jaka jest natura i jakie są przyczyny teoretyczne rozwarstwiania się drutów w czasie próby skręcania?
- jak należy prowadzić proces technologiczny produkcji drutów, aby uniknąć rozwarstwiania się ich przy próbie skręcania?

W pracy przeanalizowano stan naprężeń i zjawiska występujące przy skręcaniu drutów oraz charakter krzywych skręcania. Zbadano wpływ gniotu sumarycznego, gniotów pojedynczych, układu ciągów, kąta ciągnięcia, struktury i końcowej obróbki drutów (odpuszczanie i prostowanie) na własności mechaniczne i podatność do rozwarstwień powierzchniowych przy skręcaniu. Stwierdzono istotny wpływ struktury drutu po ciągnięciu, naprężeń własnych i zjawiska starzenia na skłonność do rozwarstwień.

## АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ РАССЛОЕНИЙ ПРУЖИННЫХ ПРОВОЛОК ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ, ПРИ ИСПЫТАНИИ НА СКРУЧИВАНИЕ

### Р е з ю м е

Пружинные проволоки из углеродистой стали после испытания на скручивание не должны давать спиральных поверхностных расслоений. Это условие особенно трудно соблюдать, так как проблема расслоения проволок при скручивании до сих пор по - настоящему, не исследована.



Целью испытаний, изложенных в данной работе, является ответ на следующие два вопроса:

- какова суть и каковы теоретические причины расслоения проволок во время испытания на скручивание?
- как должен протекать технологический процесс продукции проволоки, чтобы избежать её расслоения при испытании на скручивание.

В работе проанализировано состояние напряжений и явления, выступающие при скручивании проволок, а также характер скручивания.

Исследовано влияние суммарного обжатия, а также единичных обжатий, угла волочения, структуры и окончательной обработки проволок (отпуск и правка) на механические свойства и податливость к поверхностным расслоениям при скручивании.

Доказано существенное влияние структуры проволоки после волочения остаточных напряжений и явления старения на способность к раскраиванию.

#### ANALYSIS OF SURFACE DELAMINATIONS REASONS OF HIGH-CARBON STEEL SPRING WIRES DURING THE TORSION TEST

#### S u m m a r y

The spring wire of carbon steel after the torsion test should not show spiral surface delaminations. It is especially heavy to stand by this condition, because the problem of wire delamination during the torsion was not up to the present sufficiently investigated.

The investigations discussed in the work intended to answer the following two questions:

- what is the nature and what are the theoretical reasons of wire delamination during the torsion test?
- how should the technological process of wire production be carried on in order to avoid wire delamination during the torsion test?

In the work have been analysed the state of stresses and the phenomena which appear during the wire torsion so as the character of torsion curves. One investigated the effect of total draft, single drafts, drafts system, drawing angle, structure and final wire working strain-ageing and straightening) on the mechanical properties and the flexibility for surface delaminations during the torsion.

One stated the essential effect of the structure of wire after drawing so as the effect of residual stresses and ageing phenomena on the susceptibility for delaminations.

**ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ**

ukazują się w następujących seriach:

- A. AUTOMATYKA
- B. BUDOWNICTWO
- Ch. CHEMIA
- E. ELEKTRYKA
- En. ENERGETYKA
- G. GÓRNICtwo
- IS. INŻYNIERIA SANITARNA
- JO. JĘZYKI OBCE
- MF. MATEMATYKA-FIZYKA
- M. MECHANIKA
- NS. NAUKI SPOŁECZNE
- H. HUTNICWO

BIBLIOTEKA GŁÓWNA  
Politechniki Śląskiej

3353

72/4