

Statystyczna analiza własności mechanicznych splotów stalowych na podstawie wyników badań wykonanych w laboratorium badawczym materiałów i konstrukcji budowlanych **KS2015**

Mgr inż. Grzegorz Żwirski, dr inż. Stanisław Kańka, Politechnika Krakowska

1. Wprowadzenie

Przedmiotem artykułu jest analiza statystyczna własności mechanicznych splotów stalowych stosowanych między innymi do sprężania konstrukcji betonowych. Analizę przeprowadzono na podstawie wyników badań wykonanych w Laboratorium Badawczym Materiałów i Konstrukcji Budowlanych.

Proces produkcyjny przedmiotowych splotów można podzielić na trzy zasadnicze etapy:

- produkcję walcówki,
- ciągnięcie na zimno,
- splatanie drutów.

Materiał na walcówkę wytapiany jest w konwertorach. Uzyskana stal ma zawartość węgla ok. 1%. Słaby do walcowania na gorąco wytwarzane są obecnie przy zastosowaniu technologii ciągłego odlewania. W wyniku walcowania na gorąco powstaje pręt o średnicy 5–8 mm będący wyjściowym materiałem do ciągnięcia. Regulowany proces chłodzenia w powietrzu po walcowaniu pozwala na uzyskanie wymaganej struktury wewnątrz materiału. Ze względu na dalszy przerób na zimno optymalną jest struktura bainityczna w całej objętości, gdyż ma ona drobny i rozproszony cementyt [2].

Pręt walcowany na gorąco ma na powierzchni warstwę zgorzeliny składającej się z tlenków żelaza FeO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , która uniemożliwia proces ciągnięcia, gdyż tlenki te są twarde i kruche. Z tego względu usuwane są chemicznie podczas trawienia w kwasie solnym lub siarkowym z zastosowaniem inhibitora, aby nie doprowadzić do przetrawień. Następnie na walcówkę o czystej metalicznej powierzchni nakłada się w odpowiednich kąpielach warstwy fosforanów manganu, żelaza lub cynku, które umożliwiają zwiększenie szybkości ciągnięcia oraz wielkości pojedynczych gniotów. Warstwa fosforanów częściowo także chroni powierzchnię przed korozją [2].

Celem procesu ciągnięcia na zimno jest dalsza redukcja przekroju poprzecznego i uzyskanie odpowiednich parametrów wytrzymałościowych. Podczas ciągnięcia metal nie odkształca się równomiernie. Tylko środkowa warstwa poddawana jest czystemu

rozciąganiu, natomiast wszystkie warstwy oddalone od części środkowej podlegają siłom pochodzącym od nacisku normalnego metalu na ciągnio i naprężeniom stycznym wywołanych tarciami, co skutkuje powstaniem trzyosiowego stanu naprężeń. Im warstwa oddalona jest bardziej od osi, tym wpływ tych naprężeń jest większy [3]. W wyniku procesu ciągnięcia ziarna mające orientację przypadkową odkształcają się wzdłużnie i stają się zorientowane zgodnie z kierunkiem rozciągania. Pod wpływem odkształcenia materiał umacnia się, co skutkuje wzrostem własności wytrzymałościowych przy jednoczesnym spadku plastycznych. Jest to zjawiska pożądane.

Drut po przejściu przez ciągadła nawijany jest na szpule, które przemieszczane są do zespołów splatających. Wytwarzany w nich splot jednostronny utworzony jest z jednego drutu rdzeniowego, dookoła którego nawinięta zostaje śrubowo jedna warstwa drutu o jednakowej średnicy [2].

Końcowym etapem jest obróbka termomechaniczna, która polega na przeciągnięciu przez zespoły rozciągające i przejściu splotu przez piec indukcyjny o wysokiej częstotliwości. Stabilizowany splot jest następnie zwijany.

2. Metodyka badań

Własności mechaniczne badanej populacji splotów określono na podstawie statycznej próby rozciągania, która pozwala na wyznaczenie szeregu wielkości charakteryzujących własności mechaniczne oraz analizę jakościową i ilościową po zniszczeniu. Jednoosiowe rozciąganie umożliwia, do pewnego określonego etapu rozciągania, uzyskanie jednorodnego stanu naprężeń w rozciągającym splotcie, co odwzorowuje jego rzeczywiste zachowanie w czasie sprężania konstrukcji [4].

Próba rozciągania wykonywana była zgodnie z normą ISO 6892:2010. Na jej podstawie wyznaczone zostały dla całej badanej populacji badanego materiału następujące parametry:

F_m – największa siła przenoszona przez rozciągany splot,

$F_{0,1}$ – umowna siła przy przyroście nieproporcjonalnym 0,1%,

A_{gt} – całkowite procentowe wydłużenie przy maksymalnej sile,

E – moduł sprężystości.

Do wyznaczenia modułu sprężystości, siły rozciągającej, wywołującej umowne trwałe wydłużenie 0,1% oraz całkowitego procentowego wydłużenia, przy największej sile, zastosowano ekstensometr o rozdzielczości 0,001 mm.

Moduł sprężystości został wyznaczony metodą siecznych wyznaczonych przez punkty leżące na liniowej części wykresu siła wydłużenie. Jako początek wyznaczania modułu sprężystości przyjęto 300 MPa, zaś jako koniec 1200 MPa.

Badanie wykonano wg metody B normy ISO 6892:2010. Oznacza to, że w zakresie odkształceń plastycznych aż do osiągnięcia siły $F_{p0,1}$ sterowanie ruchem trawersy maszyny wytrzymałościowej realizowano za pomocą stałego obciążenia. Po przekroczeniu wartości $F_{p0,1}$ maszyna wytrzymałościowa przełączona została na sterowanie stałą prędkością odkształcenia.

Pojedyncza partia do badań składała się z ośmiu, sześciu lub czterech splotów pochodzących od jednego producenta mających tą samą średnicę. Każdorazowo producent deklarował średnicę zewnętrzną splotu, a także pole powierzchni przekroju. Była ona następnie weryfikowana przed rozpoczęciem próby rozciągania. Badane sploty miały całkowitą długość 700 mm, zaś bazę pomiarową ekstensometru ustawiono na 200 mm. Ekstensometryczny pomiar odkształcenia prowadzono aż do wyznaczenia wartości A_{gt} .

Pomiar siły oraz odkształcenia rejestrowany był za pomocą programu sterującego maszyną wytrzymałościową. Parametry próby rozciągania ustalono następująco:

- do osiągnięcia wartości $F_{0,1}$ – rozciąganie ze stałą szybkością przyrostu obciążenia – 30 MPa/s,
- po wyznaczenie wartości $F_{p0,1}$ – sterowanie przyrostem odkształcenia 0,004/s,
- siła wstępna przed zapięciem ekstensometru – 5 kN.

Szpecially istotne dla możliwości porównywania wyników było zachowanie stałej prędkości przyrostu obciążenia dla całej populacji badanych splotów do osiągnięcia wartości $F_{p0,1}$. Im bowiem większa prędkość rozciągania, tym wyższa wartość umownej granicy plastyczności [1].

W celu uzyskania równomiernego docisku w szczękach maszyny wytrzymałościowej na końce próbek nałożono rury aluminiowe o grubości ścianki 1 mm, które zapobiegały pękaniu splotów w zaciskach maszyny wytrzymałościowej. Wartości F_m , $F_{p0,1}$ zostały odczytane na podstawie wskazań maszyny wytrzymałościowej z dokładnością 1 kN, zaś wartość A_{gt} wyznaczono z dokładnością 0,01%. Statyczną próbę rozciągania przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej o klasie dokładności 1.

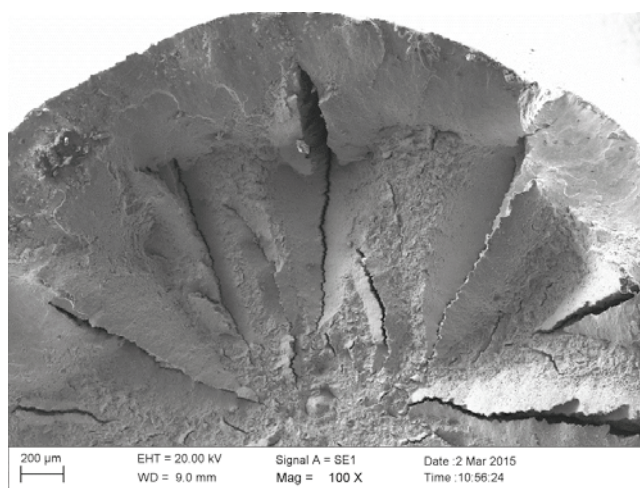
3. Prezentacja wyników

Analizie poddano sploty o następujących średnicach nominalnych:

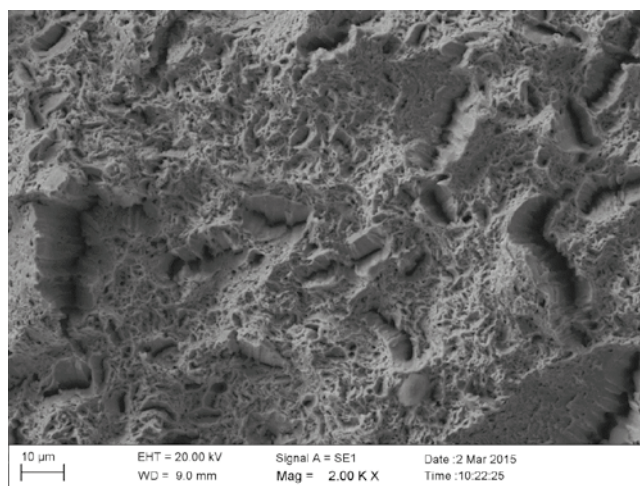
- 12,5 mm,
- 12,9 mm,
- 15,2 mm,
- 15,7 mm.

Dla każdej grupy średnic obliczono wartości średnie wyznaczanych parametrów oraz odchylenia standardowe S i współczynniki zmienności V . Uzyskane wyniki odniesiono do wymagań zwartych w stosownych aprobatkach technicznych.

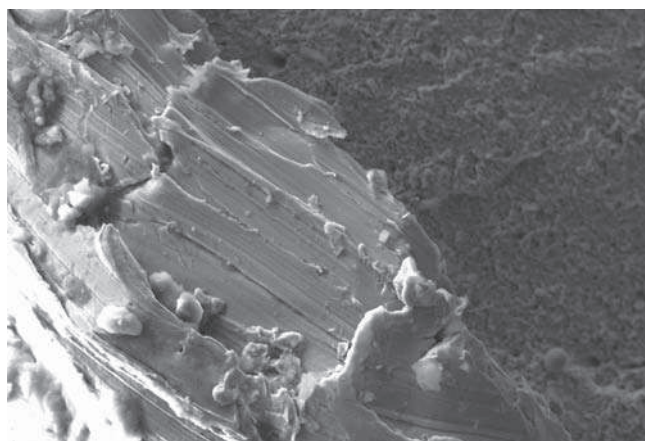
Do porównania wykorzystano sploty stalowe pochodzące od sześciu producentów. Wszystkie uzyskane wyniki spełniały wymagania zawarte w aprobatkach technicznych. Zniszczenie próbek przebiegało wg dwóch schematów. W pierwszym pękały jednocześnie wszystkie druty w splotcie. W drugim zniszczenie rozpoczynało się od pęknięcia drutu o najmniejszej wytrzymałości (po wcześniejszym osiągnięciu wartości F_m) i następnie



Rys. 1. Drut ze splotu $\varnothing 15,7$ mm po zniszczeniu



Rys. 2. Środek drutu ze splotu $\varnothing 15,7$ mm po zniszczeniu



20 μm EHT = 20.00 kV Signal A = SE1 Date : 2 Mar 2015
WD = 8.5 mm Mag = 2.00 K X Time : 10:47:35

Rys. 3. Krawędź drutu ze splotu Ø15,7 mm po zniszczeniu

rozerwaniu pozostałych. Bez względu na schemat zniszczenia, przełom próbki był taki sam. Typowy wygląd przełomu przedstawiono na zdjęciach wykonanych w mikroskopie skaningowym.

Analiza zdjęć wskazuje, iż wewnątrz próbki przełom ma wygląd typowy dla odkształcenia plastycznego. W licznych wgłębieniach znajdują się wtrącenia niemetaliczne. Brzeg próbki wskazuje na przewagę pęknięcia kruchego. Widoczne są płaskie stopnie na powierzchni ograniczone fragmentami płaszczyzn łupliwości. Stan taki spowodowany jest bardzo dużym stopniem gniotu dla zewnętrznych warstw w procesie ciągnięcia. W tablicy 1–4 przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych splotów Y1860S7 o średnicy 12,5 mm.

Tabela 1. Umowna siła przy przyroście nieproporcjonalnym F_{01}

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Umowna siła przy przyroście nieproporcjonalnym F_{01} [kN]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	-	16	163,0	1,7	1,1
F	-	16	163,0	2,9	1,8
N2	-	14	164,2	2,4	1,5
H	-	14	162,7	2,5	1,5

Tabela 2. Rzeczywista siła zrywająca F

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Rzeczywista siła zrywająca F_m [kN]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	$F_m \geq 173$ kN	16	178,1	1,2	0,7
F	$F_m \geq 173$ kN	16	183,6	1,5	0,8
N2	$F_m \geq 173$ kN	14	179,9	1,5	0,8
H	$F_m \geq 173$ kN	14	182,3	1,3	0,7

Tabela 3. Wydłużenie całkowite przy największej sile A_{gt}

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Wydłużenie całkowite przy największej sile A_{gt} [%]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	$A_{gt} \geq 3,5\%$	16	5,8	0,3	5,9
F	$A_{gt} \geq 3,5\%$	16	5,8	0,4	7,3
N2	$A_{gt} \geq 3,5\%$	14	5,5	0,4	8,1
H	$A_{gt} \geq 3,5\%$	14	5,9	0,2	3,9

Tabela 4. Moduł sprężystości podłużnej E

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Moduł sprężystości podłużnej E [GPa]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	$E = 195 \pm 10$ GPa	16	195,7	2,0	1,0
F	$E = 195 \pm 10$ GPa	16	200,0	3,3	1,6
N2	$E = 195 \pm 10$ GPa	14	197,1	2,0	1,0
H	$E = 195 \pm 10$ GPa	14	200,1	3,9	2,0

W tabelach 5–8 przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych splotów Y1860S7 o średnicy 12,9 mm.

Tabela 5. Umowna siła przy przyroście nieproporcjonalnym F_{01}

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Umowna siła przy przyroście nieproporcjonalnym F_{01} [kN]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
A	-	8	177,0	1,6	1,0
H	-	8	164,8	1,2	0,7

Tabela 6. Rzeczywista siła zrywająca F_m

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Rzeczywista siła zrywająca F_m [kN]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
A	$F_m \geq 186$ kN	8	196,8	1,3	0,7
H	$F_m \geq 186$ kN	8	188,3	1,2	0,6

Tabela 7. Wydłużenie całkowite przy największej sile A_{gt}

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Wydłużenie całkowite przy największej sile A_{gt} [%]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
A	$A_{gt} \geq 3,5\%$	8	6,1	0,1	2,2
H	$A_{gt} \geq 3,5\%$	8	5,9	0,2	3,5

Tabela 8. Moduł sprężystości podłużnej E_L

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Moduł sprężystości podłużnej E_L [GPa]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
A	$E=195 \pm 10$ GPa	8	196,9	2,5	1,3
H	$E=195 \pm 10$ GPa	8	196,0	0,8	0,4

W tabelach 9–12 przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych splotów **Y1860S7** o średnicy 15,2 mm.

Tabela 9. Umowna siła przy przyroście nieproporcjonalnym F_{01}

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Umowna siła przy przyroście nieproporcjonalnym F_{01} [kN]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	-	8	247,1	1,1	0,4
F	-	8	250,0	1,3	0,5
W	-	8	243,9	3,3	1,3

Tabela 10. Rzeczywista siła zrywająca F_m

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Rzeczywista siła zrywająca F_m [kN]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	$F_m \geq 259$ kN	8	269,9	0,8	0,3
F	$F_m \geq 259$ kN	8	276,4	0,5	0,2
W	$F_m \geq 259$ kN	8	270,3	0,9	0,3

Tabela 11. Wydłużenie całkowite przy największej sile A_{gt}

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Wydłużenie całkowite przy największej sile A_{gt} [%]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	$A_{gt} \geq 3,5\%$	8	5,6	0,2	3,6
F	$A_{gt} \geq 3,5\%$	8	5,8	0,1	1,3
W	$A_{gt} \geq 3,5\%$	8	6,2	0,5	7,4

Tabela 12. Moduł sprężystości podłużnej E

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Moduł sprężystości podłużnej E [GPa]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	$E=195 \pm 10$ GPa	8	194,6	1,8	0,9
F	$E=195 \pm 10$ GPa	8	199,8	2,9	1,5
W	$E=195 \pm 10$ GPa	8	198,7	4,5	2,2

W tabelach 13–16 przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych splotów **Y1860S7** o średnicy 15,7 mm.

Tabela 13. Umowna siła przy przyroście nieproporcjonalnym F_{01}

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Umowna siła przy przyroście nieproporcjonalnym F_{01} [kN]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	-	8	263	1,4	0,5
F	-	8	261,8	1,0	0,4
A	-	8	256,1	3,1	1,2
N2	-	16	264,7	4,4	1,7
H	$F_{01} \geq 240$ kN	16	262,3	4,1	1,5

Tabela 14. Rzeczywista siła zrywająca F_m

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Rzeczywista siła zrywająca F_m [kN]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	$F_m \geq 279$ kN	8	289,6	1,1	0,4
F	$F_m \geq 279$ kN	8	292,8	0,9	0,3
A	$F_m \geq 279$ kN	8	286,0	0,9	0,3
N2	$F_m \geq 279$ kN	16	290,0	1,5	0,5
H	$F_m \geq 279$ kN	14	288,1	2,6	0,9

Tabela 15. Wydłużenie całkowite przy największej sile A_{gt}

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Wydłużenie całkowite przy największej sile A_{gt} [%]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	$A_{gt} \geq 3,5\%$	8	5,2	0,3	5,7
F	$A_{gt} \geq 3,5\%$	8	6,2	0,2	3,1
A	$A_{gt} \geq 3,5\%$	8	6,0	0,1	1,4
N2	$A_{gt} \geq 3,5\%$	16	5,3	0,3	5,8
H	$A_{gt} \geq 3,5\%$	16	5,5	0,3	5,4

Tabela 16. Moduł sprężystości podłużnej E

Producent	Wymagania na podstawie aprobat technicznych	Liczebność próby n	Moduł sprężystości podłużnej E [GPa]	Odchylenie standardowe S [kN]	Współczynnik zmienności V %
N1	$E=195 \pm 10$ GPa	8	197,3	2,4	1,2
F	$E=195 \pm 10$ GPa	8	198,5	1,7	0,9
A	$E=195 \pm 10$ GPa	8	194,6	0,9	0,5
N2	$E=195 \pm 10$ GPa	16	195,3	2,0	1,0
H	$E=195 \pm 10$ GPa	16	197,5	1,5	0,8

4. Analiza wyników

Porównanie własności wytrzymałościowych wskazuje na nieco mniejszy rozrzut wartości F_m niż F_{01} . W pierwszym przypadku współczynnik zmienności mieści się w przedziale 0,2%–1,0%, w drugim w przedziale 0,4%–1,8%. Wiąże się to z faktem, iż dla wyznaczania umownej siły przy przyroście nieproporcjonalnym 0,1%, prócz odczytów obciążenia dochodzi dodatkowy czynnik niepewności pomiaru związany z pomiarem wydłużenia. Zaznaczyć jednak należy, iż większość aprobat technicznych nie podaje minimalnych wartości dla tego parametru. Minimalnie większy rozrzut wyników F_m i F_{01} ma miejsce wówczas, kiedy badana populacja składa się z dwóch partii pochodzących z różnych wytopów i okresów produkcyjnych. W obu jednak wypadkach współczynniki zmienności są na niskim poziomie. Świadczy to, iż własności wytrzymałościowe są bardzo stabilne nie tylko w obrębie danej partii, ale również całego gatunku i średnicy. We wszystkich przypadkach spełniają one wymagania aprobat technicznych. Nie można też wskazać producenta splotów, dla którego wyniki w znaczący sposób odstawałyby od pozostałych.

Powyższe uwagi należy również odnieść do wartości modułu sprężystości. Współczynnik zmienności zawiera się w przedziale 0,4%–2,2%. Jest to wartość bardzo mała, biorąc pod uwagę fakt, iż do obliczenia wartości modułu konieczne są pomiary siły i wydłużenia. W przypadku wartości F_{01} , F_m oraz m_E na rozrzut wyników nie wpływa schemat zniszczenia badanych próbek.

Własności plastyczne splotów charakteryzują wartości wydłużenia całkowitego przy największej sile. Aprobaty techniczne dla każdej średnicy wymagają, aby były one większe lub równe 3,5%. Wszystkie badane próbki spełniły powyższy warunek, zaś średnie wartości A_{gt} wahają się w granicach 5,2%–6,2%, co jest wielkością znacznie przekraczającą minimalne wymagania. Podobnie jak w przypadku parametrów wytrzymałościowych większy rozrzut wyników ma miejsce wówczas, kiedy badana populacja składa się z dwóch partii pochodzących z różnych wytopów oraz okresów produkcyjnych. Współczynnik zmienności dla wszystkich badanych partii mieści się w przedziale 1,3%–8,1%, co świadczy o nieco większym rozrzucie niż w przypadku parametrów

wytrzymałościowych. Najbardziej stabilnymi własnościami charakteryzowały się sploty produkowane przez producenta A, jednakże badane populacje składały się każdorazowo z jednej partii 8 sztuk. W związku z powyższym nie stanowią one wystarczającej podstawy do formułowania generalnych wniosków. Reasumując należy stwierdzić, iż dla wszystkich producentów własności plastyczne charakteryzowały się stabilnością na zadawalającym poziomie. Na wartość A_{gt} nie miał wpływu schemat zniszczenia próbki.

5. Podsumowanie

Współcześnie produkowane sploty charakteryzują się bardzo dużą stabilnością własności mechanicznych. Spowodowane jest to ciągłym postępowaniem w technologii ich wytwarzania. Dotyczy to zwłaszcza:

- jednorodności struktury oraz składu chemicznego dzięki stosowaniu technologii ciągłego odlewania oraz kontroli zwartości składników stali w trakcie wytopu za pomocą spektrometrów,
- kontroli procesu obróbki cieplnej, przez co uzyskuje się jednorodną strukturę przed procesem ciągnięcia. Ma ona decydujący wpływ na ostateczne własności drutów, z których wytwarzane są sploty,
- uzyskaniu wysokiej tolerancji wymiarowej w procesie ciągnięcia.

Wszystkie badane sploty mają własności mechaniczne, które pozwalają na spełnienie wymagań zawartych w stosownych aprobatkach technicznych.

W trakcie rozciągania w części splotów druty pękały jednocześnie wszystkie, zaś w pozostałych zniszczenie rozpoczynało się od pęknięcia drutu o najmniejszej wytrzymałości, a następnie rozerwaniu pozostałych. Fakt ten jednak nie miał wpływu na wartości wyznaczanych własności mechanicznych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Przybyłowicz K., Fizyczne podstawy odkształcenia plastycznego. Kraków 1989
- [2] Kowalczyk J., Steininger Z., Liny Stalowe. Katowice 1963
- [3] Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E., Przeróbka plastyczna. Podstawy teoretyczne. Katowice 1986
- [4] Katarzyński S., Kocańda S., Zakrzewski M., Badanie własności mechanicznych metali. Katowice 1963

www.przegladbudowlany.pl/archiwum



Archiwum od ręki
 archiwalne spisy treści
 na stronach www