



Seminarium



Instytut Obróbki Plastycznej Zakład Kształtowania Objętościowego i Automatykacji Produkcji

Omówienie wyników badań prostowania

M. Zubczyński, J. Magda, W. Gronowski, B. Czartoryski, Sz. Szkudelski

Poznań, 11.05.2017

Plan prezentacji



1. Wstęp
 2. Opis zjawiska gięcia sprężysto-plastycznego
 3. Opis stanowiska badawczego
 4. Opis badanych próbek
 5. Charakterystyka przeprowadzanych prób
 6. Analiza wyników
 7. Wnioski
- Literatura

Wstęp



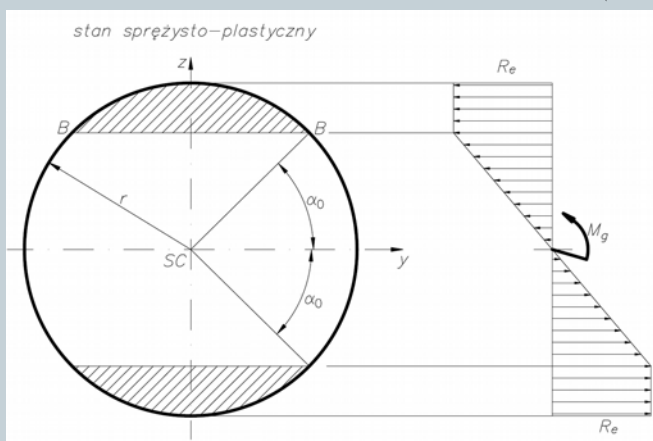
- Zjawisko prostowania prętów krzywoliniowych jest zagadnieniem złożonym.
- Konstrukcja maszyny prostującej i metody prostowania wymaga zbadania tego zjawiska w sposób kompleksowy.
- Stąd zarówno próba ujęcia teoretycznego, jak i obszerne badania praktyczne na specjalnie zaprojektowanym urządzeniu.
- Tak przeprowadzone badania pozwolą na wyciągnięcie wniosków pomocnych w dalszych pracach dotyczących urządzenia do prostowania prętów drążonych.

Opis zjawiska gięcia sprężysto-plastycznego



Wysiętek przekroju (moment gnący M_g) jest zależny od krzywizny $1/\rho$ i dla przekroju kołowego jest równy [1]:

$$M_g = \left(\frac{R_e r^3}{6} \right) \left[3 \left(\frac{\alpha_0}{\sin \alpha_0} \right) + 3 \cos \alpha_0 + 2 \cos^3 \alpha_0 \right],$$



gdzie:

R_e – granica plastyczności [MPa],
 r – promień przekroju kołowego [mm],
 α_0 – kąt określający położenie warstwy BB rozdzielającej uplastycznioną i sprężystą część przekroju [rad].

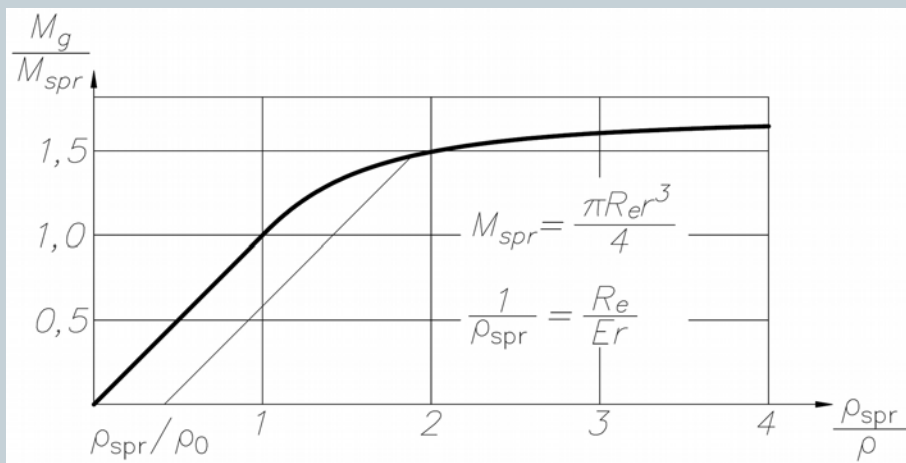
Sprężysto-plastyczne zginanie pręta kołowego [1]

Opis zjawiska gięcia sprężysto-plastycznego



Krzywizna przekroju kołowego dana jest wzorem [1]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{R_e}{E r \sin \alpha_0} ,$$



gdzie:

R_e – granica plastyczności [MPa]

E – moduł Younga [MPa]

R – promień przekroju [mm]

α_0 - kąt określający położenie warstwy BB rozdzielającej uplastycznioną i sprężystą część przekroju [rad]

Opis zjawiska gięcia sprężysto-plastycznego



Wartość trwałej krzywizny $1/\rho_0$ belki można określić analitycznie jako różnicę krzywizny $1/\rho$ oraz krzywizny $1/\rho'$ odpowiadającej sprężystemu odciążeniu [1]:

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho'}$$

Dla przekroju kołowego będzie to zatem:

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{R_e}{E r \sin \alpha_0} - \frac{M_g}{E I_y}$$

Problemem jest zatem przejście z wartości krzywizny na wartość ugięcia. Są one powiązane zależnością [2]:

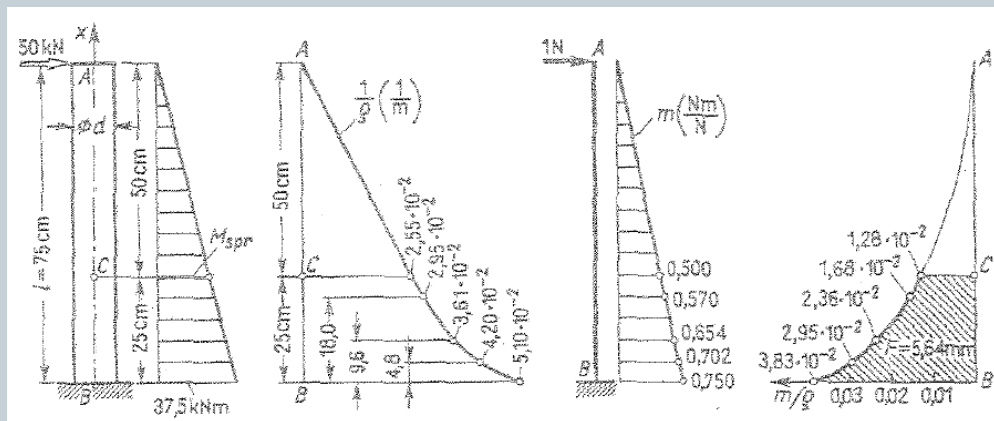
$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{-v''(x)}{[1+(v'(x))^2]^{\frac{3}{2}}} \approx -v''(x)$$



Opis zjawiska gięcia sprężysto-plastycznego



Rozwiązaniem jest całkowanie graficzne, którego przykład przedstawiono poniżej, korzystając z [1]:



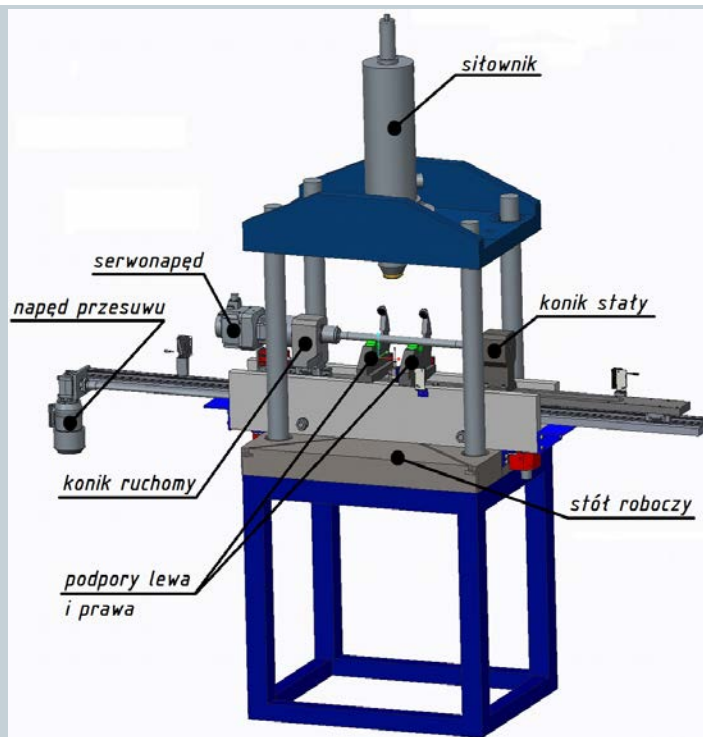
Obliczenie ugięcia belki sprężysto-plastycznej

Opis zjawiska gięcia sprężysto-plastycznego



Należało zatem na podstawie wielu doświadczeń znaleźć zależności matematyczne pozwalające stworzyć w miarę możliwości procedurę obliczeniową, która może pomóc w ocenie krzywizny belki i doborze skoku suwaka służącego jej wyprostowaniu.

Opis stanowiska badawczego



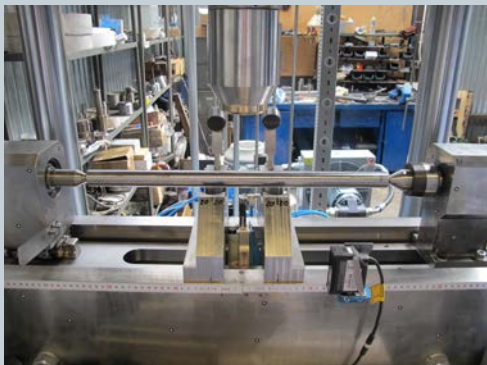
Zaprojektowane i wykonane urządzenie prostujące

Opis stanowiska badawczego

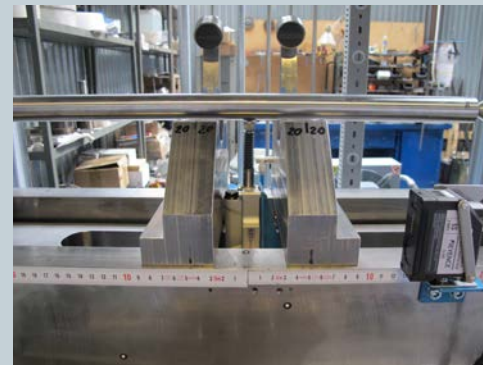


*Panel sterowania urządzenia
prostującego*

Opis stanowiska badawczego



Układ pomiarowy prostowarki przed pomiarem (etap 1.)



Pomiar dokonywany przez czujnik (etap 2.)



Przygotowanie pręta do gięcia/prostowania (etap 3.)



Gięcie/prostowanie pręta (etap 3.)

Opis stanowiska badawczego



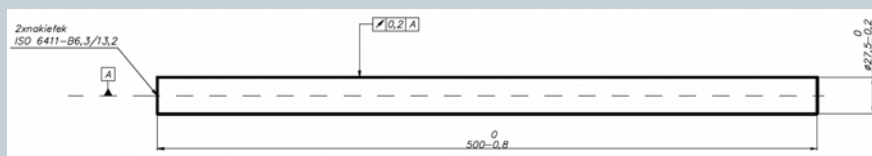
Parametry stanowiska do prostowania:

- Średnica zginanego pręta: 10 – 40 [mm],
- Długość zginanego pręta: maks. 1 100 [mm],
- Maksymalny nacisk: 400 [kN],
- Skok siłownika: 240 [mm],
- Prędkość gięcia: 0,6 [mm/s],
- Prędkości dojazdu 22 [mm/s],
- Prędkość kątowa: $0,4\pi$ [rad/s].

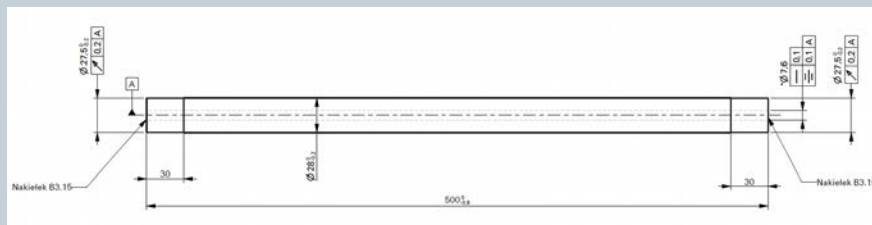
Opis badanych próbek



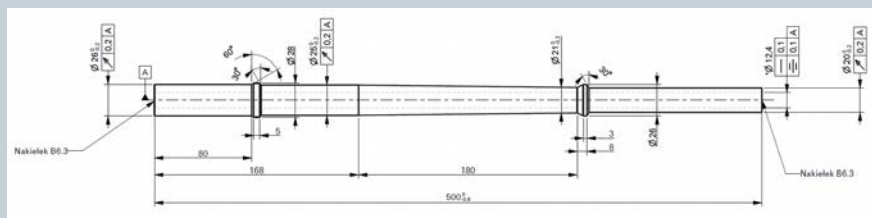
Próbki drążone wykonano ze stali 34HNM (34CrNiMo6) o wytrzymałości R_e ok. 1200 [MPa], natomiast próbki pełne ze stali St3S (S235JR), których R_e wynosi ok. 230 [MPa]. Niektóre ich przykłady zaprezentowano na rys. 10., 11. i 12.



Próbka walcowa pełna



Próbka walcowa drążona z otworem $\Phi 7,6$

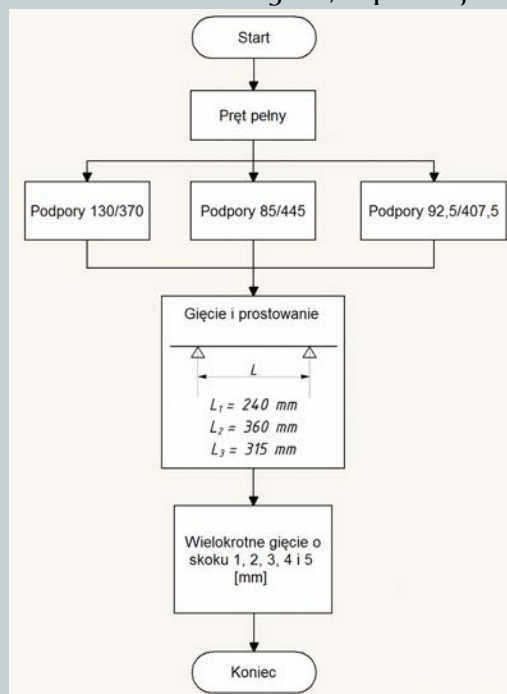


Próbka stożkowa drążona z otworem dużym $\Phi 12,4$

Charakterystyka przeprowadzanych prób



- Jako pierwsze przebadano próbki walcowe zwykłe, o prostej budowie. Uproszczony schemat przedstawiono na rys. 14.



Uproszczony schemat blokowy badań prętów pełnych

Charakterystyka przeprowadzanych prób



- Na podstawie tych badań dążono do sformułowania pewnych tez, które potem weryfikowano doświadczalnie dla przekrojów u budowie bardziej skomplikowanej.
- Badanie próbki w przeważającej większości polegało na jej pomiarze, ugięciu i wielokrotnym prostowaniu, tak by otrzymać pręt prosty.
- Prostowanie przeprowadzano dla trzech założonych przez nas rozstaw podpór: 130/370, 55/445 i 92,5/407,5
- Na podstawie kilkudziesięciu wykonanych próbach gięcia/prostowania utworzono procedurę obliczeniową i ją sprawdzano; po dopracowaniu zaczęła ona zwracać pożądane wyniki.
- Gdy upewniono się co do jej skuteczności, sprawdzono jej działanie na próbkach drażonych i potwierdzono jej użyteczność.
- Ostatnim etapem było prostowanie prętów pogiętych nie celowo, a naturalnie, tj. krzywych w wyniku działania np. obróbki cieplnej.

Analiza wyników



- Na panelu sterującym definiuje się liczbę przekrojów, w których maszyna ma dokonać pomiaru oraz ich położenie.
- System pomiarowy zwraca wyniki w postaci macierzy, którą można otworzyć w programie Excel i poddać dalszej analizie.
- System pomiarowy umożliwia również zapis danych w formacie pożądanym dla systemu eksperckiego.

Analiza wyników

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L	130	210	220	230	250	270	280	290	370
K									
1 0	7,916	6,078	5,848	5,667	5,498	5,621	5,773	6	7,908
2 10	7,962	6,143	5,92	5,733	5,557	5,695	5,853	6,059	7,954
3 20	8,105	6,361	6,145	5,971	5,794	5,919	6,066	6,273	8,075
4 30	8,31	6,713	6,514	6,334	6,17	6,299	6,439	6,611	8,294
5 40	8,611	7,196	7,018	6,864	6,723	6,842	6,957	7,114	8,602
6 50	9	7,804	7,656	7,528	7,4	7,496	7,602	7,734	8,98
7 60	9,443	8,523	8,393	8,288	8,192	8,277	8,345	8,439	9,431
8 70	9,922	9,304	9,215	9,128	9,056	9,12	9,176	9,246	9,95
9 80	10,446	10,158	10,091	10,038	10	10,037	10,065	10,105	10,484
10 90	11,003	11,037	11,002	10,991	10,977	10,992	11,013	11,002	11,036
11 100	11,539	11,899	11,935	11,933	11,95	11,968	11,947	11,901	11,595
12 110	12,073	12,762	12,812	12,853	12,899	12,886	12,855	12,786	12,154
13 120	12,567	13,553	13,663	13,729	13,798	13,783	13,703	13,606	12,664
14 130	13,031	14,294	14,419	14,507	14,61	14,566	14,483	14,359	13,143
16 140	13,43	14,934	15,07	15,184	15,334	15,268	15,168	15,021	13,555
16 150	13,757	15,446	15,622	15,74	15,907	15,843	15,731	15,562	13,9
17 160	13,987	15,829	16,034	16,168	16,341	16,275	16,152	15,971	14,163
18 170	14,143	16,075	16,274	16,434	16,618	16,547	16,428	16,24	14,312
19 180	14,198	16,172	16,374	16,531	16,721	16,657	16,511	16,33	14,377
20 190	14,164	16,115	16,317	16,476	16,67	16,599	16,472	16,292	14,35
21 200	14,031	15,905	16,095	16,27	16,447	16,385	16,267	16,082	14,224
22 210	13,808	15,551	15,73	15,894	16,045	16,016	15,899	15,745	14,008
23 220	13,515	15,056	15,227	15,359	15,507	15,477	15,383	15,238	13,709
24 230	13,129	14,458	14,591	14,706	14,839	14,824	14,748	14,627	13,313
25 240	12,683	13,744	13,858	13,946	14,055	14,05	13,994	13,9	12,873
26 250	12,202	12,971	13,039	13,093	13,165	13,189	13,167	13,1	12,358
27 260	11,686	12,112	12,149	12,183	12,222	12,264	12,268	12,247	11,817
28 270	11,129	11,245	11,247	11,241	11,259	11,309	11,332	11,346	11,267
29 280	10,592	10,375	10,333	10,291	10,285	10,359	10,398	10,445	10,698
30 290	10,052	9,521	9,446	9,382	9,336	9,419	9,489	9,572	10,145
31 300	9,565	8,714	8,618	8,533	8,451	8,552	8,637	8,751	9,623
32 310	9,095	7,988	7,857	7,735	7,641	7,753	7,871	7,997	9,167
33 320	8,706	7,363	7,197	7,064	6,922	7,052	7,18	7,345	8,754
34 330	8,374	6,836	6,654	6,487	6,341	6,496	6,624	6,793	8,404
35 340	8,135	6,453	6,247	6,065	5,899	6,058	6,196	6,382	8,144
36 350	7,993	6,203	5,961	5,794	5,612	5,769	5,916	6,115	7,983
Średnia	11,06	11,14	11,13	11,12	11,12	11,16	11,17	11,18	11,15

Przykładowa tabela z wynikami pomiarów

Analiza wyników

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L	130	210	220	230	250	270	280	290	370
K									
1 0	7,916	6,078	5,848	5,667	5,498	5,621	5,773	6	7,908
2 10	7,962	6,143	5,92	5,733	5,557	5,695	5,853	6,059	7,954
3 20	8,105	6,361	6,145	5,971	5,794	5,919	6,066	6,273	8,075
4 30	8,31	6,713	6,514	6,334	6,17	6,299	6,439	6,611	8,294
5 40	8,611	7,196	7,018	6,864	6,723	6,842	6,957	7,114	8,602
6 50	9	7,804	7,656	7,528	7,4	7,496	7,602	7,734	8,98
7 60	9,443	8,523	8,393	8,288	8,192	8,277	8,345	8,439	9,431
8 70	9,922	9,304	9,215	9,128	9,056	9,12	9,176	9,246	9,95
9 80	10,446	10,158	10,091	10,038	10	10,037	10,065	10,105	10,484
10 90	11,003	11,037	11,002	10,991	10,977	10,992	11,013	11,002	11,036
11 100	11,539	11,899	11,935	11,933	11,95	11,968	11,947	11,901	11,595
12 110	12,073	12,762	12,812	12,853	12,899	12,886	12,855	12,786	12,154
13 120	12,567	13,553	13,663	13,729	13,798	13,783	13,703	13,606	12,664
14 130	13,031	14,294	14,419	14,507	14,61	14,566	14,483	14,359	13,143
15 140	13,43	14,934	15,07	15,184	15,334	15,268	15,168	15,021	13,555
16 150	13,757	15,446	15,622	15,74	15,907	15,843	15,731	15,562	13,9
17 160	13,987	15,829	16,034	16,168	16,341	16,275	16,152	15,971	14,163
18 170	14,143	16,075	16,274	16,434	16,618	16,547	16,428	16,24	14,312
19 180	14,198	16,172	16,374	16,531	16,721	16,657	16,511	16,33	14,377
20 190	14,164	16,115	16,317	16,476	16,67	16,599	16,472	16,292	14,35
21 200	14,031	15,905	16,095	16,27	16,447	16,385	16,267	16,082	14,224
22 210	13,808	15,551	15,73	15,894	16,045	16,016	15,899	15,745	14,008
23 220	13,515	15,056	15,227	15,359	15,507	15,477	15,383	15,238	13,709
24 230	13,129	14,458	14,591	14,706	14,839	14,824	14,748	14,627	13,313
25 240	12,683	13,744	13,858	13,946	14,055	14,05	13,994	13,9	12,873
26 250	12,202	12,971	13,039	13,093	13,165	13,189	13,167	13,1	12,358
27 260	11,686	12,112	12,149	12,183	12,222	12,264	12,268	12,247	11,817
28 270	11,129	11,245	11,247	11,241	11,259	11,309	11,332	11,346	11,267
29 280	10,592	10,375	10,333	10,291	10,285	10,359	10,398	10,445	10,698
30 290	10,052	9,521	9,446	9,382	9,336	9,419	9,489	9,572	10,145
31 300	9,565	8,714	8,618	8,533	8,451	8,552	8,637	8,751	9,623
32 310	9,095	7,988	7,857	7,735	7,641	7,753	7,871	7,997	9,167
33 320	8,706	7,363	7,197	7,064	6,922	7,052	7,18	7,345	8,754
34 330	8,374	6,836	6,654	6,487	6,341	6,496	6,624	6,793	8,404
35 340	8,135	6,453	6,247	6,065	5,899	6,058	6,196	6,382	8,144
36 350	7,993	6,203	5,961	5,794	5,612	5,769	5,916	6,115	7,983
Średnia	11,06	11,14	11,13	11,12	11,12	11,16	11,17	11,18	11,15

Analiza danych



Analiza wyników

		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	L	0	130	210	220	230	250	270	280	290	370	500
K												
1 0			-3,15	-5,06	-5,28	-5,45	-5,62	-5,54	-5,40	-5,18	-3,24	
2 10			-3,10	-4,99	-5,21	-5,38	-5,56	-5,46	-5,32	-5,12	-3,20	
3 20			-2,96	-4,77	-4,98	-5,14	-5,32	-5,24	-5,10	-4,90	-3,08	
4 30			-2,75	-4,42	-4,61	-4,78	-4,95	-4,86	-4,73	-4,57	-2,86	
5 40			-2,45	-3,94	-4,11	-4,25	-4,39	-4,32	-4,21	-4,06	-2,55	
6 50			-2,06	-3,33	-3,47	-3,59	-3,72	-3,66	-3,57	-3,44	-2,17	
7 60			-1,62	-2,61	-2,73	-2,83	-2,93	-2,88	-2,82	-2,74	-1,72	
8 70			-1,14	-1,83	-1,91	-1,99	-2,06	-2,04	-1,99	-1,93	-1,20	
9 80			-0,62	-0,98	-1,04	-1,08	-1,12	-1,12	-1,10	-1,07	-0,67	
10 90			-0,06	-0,10	-0,12	-0,12	-0,14	-0,17	-0,16	-0,17	-0,11	
11 100			0,48	0,76	0,81	0,82	0,83	0,81	0,78	0,73	0,44	
12 110			1,01	1,63	1,69	1,74	1,78	1,73	1,69	1,61	1,00	
13 120			1,50	2,42	2,54	2,61	2,68	2,63	2,53	2,43	1,51	
14 130			1,97	3,16	3,29	3,39	3,49	3,41	3,31	3,18	1,99	
15 140			2,37	3,80	3,94	4,07	4,22	4,11	4,00	3,85	2,40	
16 150			2,69	4,31	4,50	4,63	4,79	4,69	4,56	4,39	2,75	
17 160			2,92	4,69	4,91	5,05	5,22	5,12	4,98	4,80	3,01	
18 170			3,08	4,94	5,15	5,32	5,50	5,39	5,26	5,06	3,16	
19 180			3,13	5,04	5,25	5,42	5,60	5,50	5,34	5,15	3,23	
20 190			3,10	4,98	5,19	5,36	5,55	5,44	5,30	5,12	3,20	
21 200			2,97	4,77	4,97	5,16	5,33	5,23	5,10	4,91	3,07	
22 210			2,74	4,42	4,60	4,78	4,93	4,86	4,73	4,57	2,86	
23 220			2,45	3,92	4,10	4,24	4,39	4,32	4,21	4,06	2,56	
24 230			2,07	3,32	3,46	3,59	3,72	3,67	3,58	3,45	2,16	
25 240			1,62	2,61	2,73	2,83	2,94	2,89	2,82	2,72	1,72	
26 250			1,14	1,84	1,91	1,98	2,05	2,03	2,00	1,92	1,21	
27 260			0,62	0,98	1,02	1,07	1,10	1,11	1,10	1,07	0,67	
28 270			0,07	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,12	
29 280			-0,47	-0,76	-0,79	-0,82	-0,83	-0,80	-0,77	-0,73	-0,45	
30 290			-1,01	-1,61	-1,68	-1,73	-1,78	-1,74	-1,68	-1,60	-1,01	
31 300			-1,50	-2,42	-2,51	-2,58	-2,67	-2,61	-2,53	-2,43	-1,53	
32 310			-1,97	-3,15	-3,27	-3,38	-3,48	-3,40	-3,30	-3,18	-1,98	
33 320			-2,36	-3,77	-3,93	-4,05	-4,20	-4,11	-3,99	-3,83	-2,40	
34 330			-2,69	-4,30	-4,47	-4,63	-4,78	-4,66	-4,55	-4,38	-2,75	
35 340			-2,93	-4,68	-4,88	-5,05	-5,22	-5,10	-4,97	-4,79	-3,01	
36 350			-3,07	-4,93	-5,17	-5,32	-5,51	-5,39	-5,25	-5,06	-3,17	
max		0	3,13	5,04	5,25	5,42	5,60	5,50	5,34	5,15	3,23	0,00
kał			180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
min			-3,15	-5,06	-5,28	-5,45	-5,62	-5,54	-5,40	-5,18	-3,24	
kał			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela po uwzględnieniu średnich

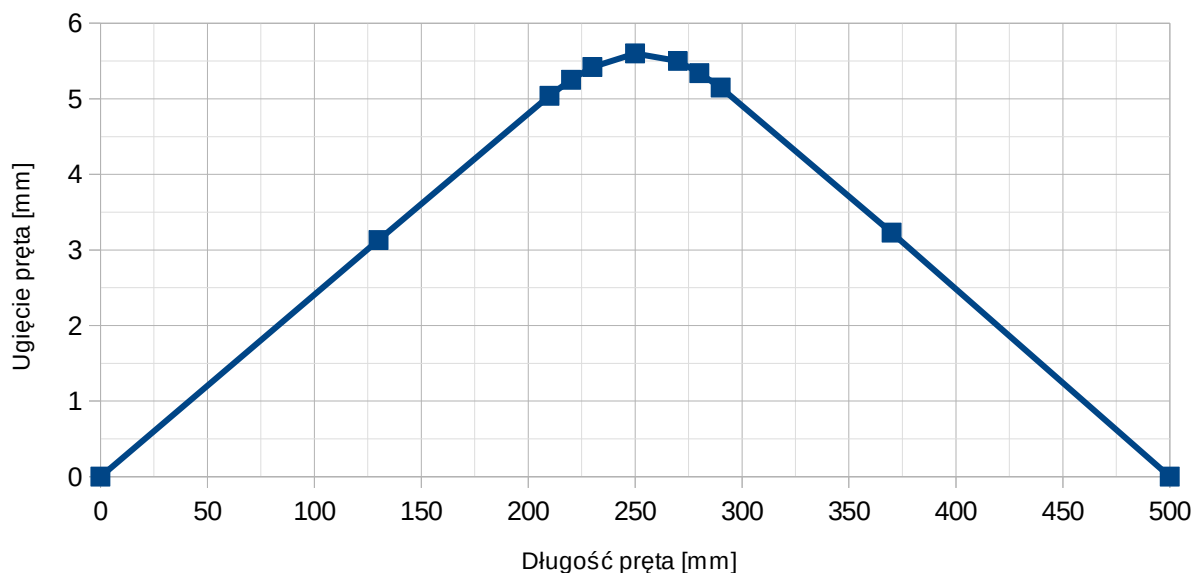
Analiza wyników



Nr	Pomiar przed gięciem	Zadany skok	Pomiar po ugięciu	Różnica pomiarów
1	12,79	0,55	12,79	-0,00
2	12,79	0,60	12,81	0,01
3	12,79	0,65	12,80	0,00
4	12,79	0,70	12,80	0,00
5	12,79	0,73	12,81	0,01
6	12,79	0,80	12,79	0,00
7	12,79	0,85	12,79	0,00
8	12,79	0,95	12,81	0,01
9	12,79	1,05	12,82	0,03

Parametry gięcia

Wykres ugięcia pręta w funkcji jego długości



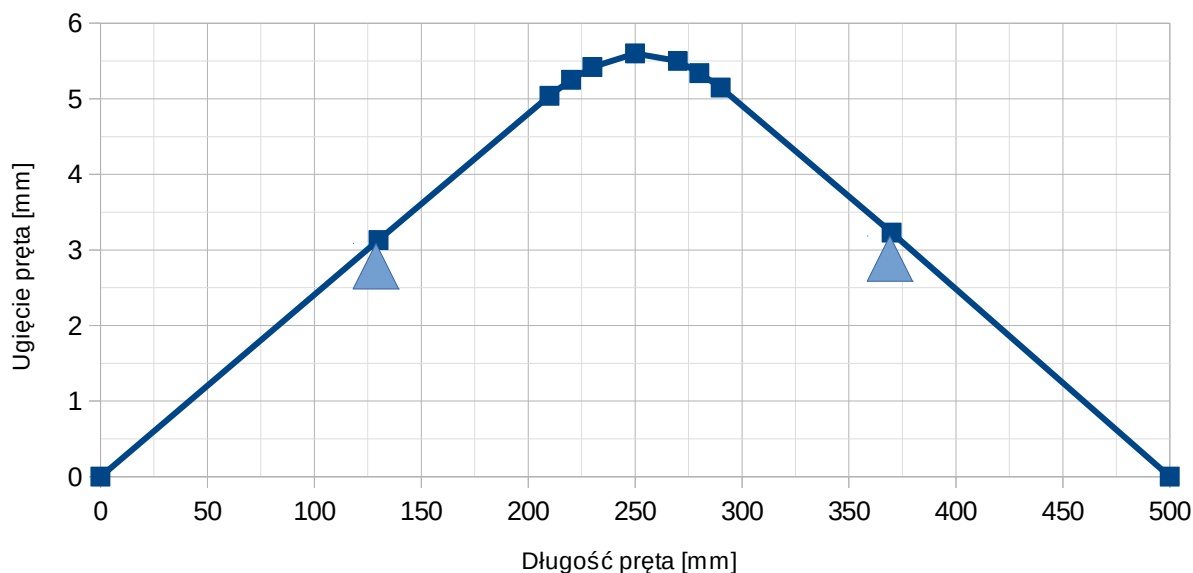
Przykładowa postać wykresu obrazującego wielkość i postać ugięcia badanego pręta po gięciu

Pozycja ustawienia: 250 mm
Pozycja kąta wałka: 180°
Pozycja podpory 1: 130 mm
Pozycja podpory 2: 370 mm
Czas przytrzymania: 5 s

Pomiar przed: 12,86 mm
Zadany skok: 4 mm
Pomiar po: 15,37 mm
Różnica pomiarów: 2,52 mm
Maks.: 5,60 mm (180°)
Min.: -5,62 mm (0°)



Wykres ugięcia pręta w funkcji jego długości



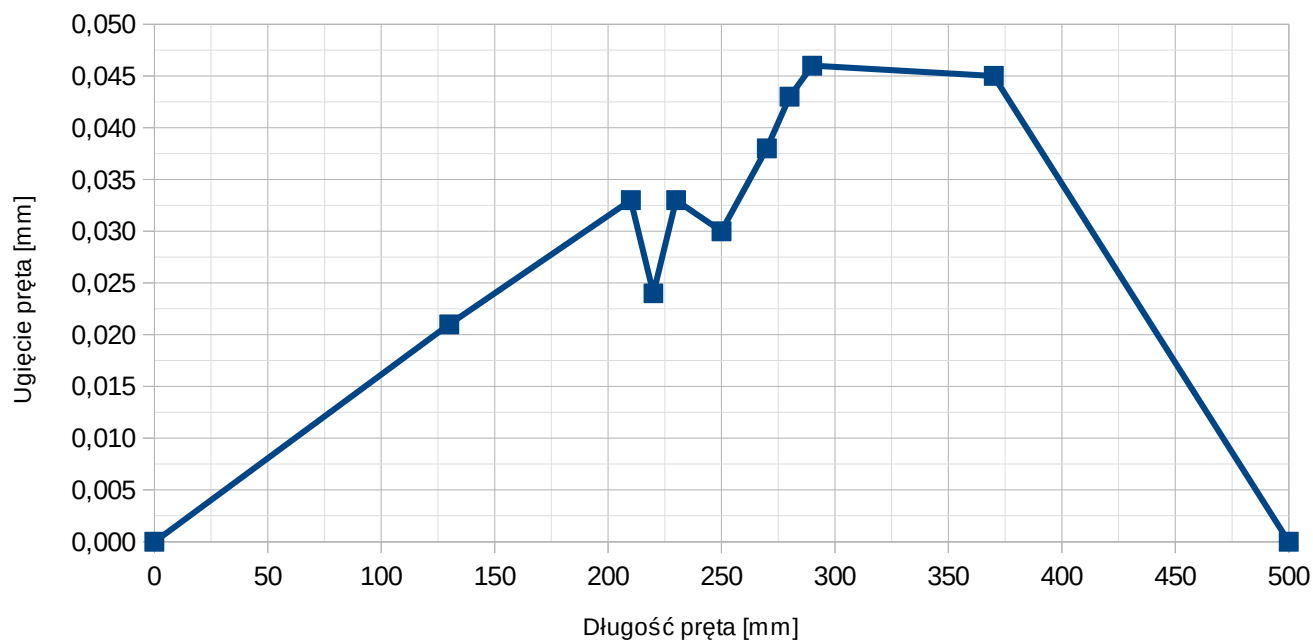
Przykładowa postać wykresu obrazującego wielkość i postać ugięcia badanego pręta po gięciu

Pozycja ustawienia: 250 mm
Pozycja kąta wałka: 180°
Pozycja podpory 1: 130 mm
Pozycja podpory 2: 370 mm
Czas przytrzymania: 5 s

Pomiar przed: 12,86 mm
Zadany skok: 4 mm
Pomiar po: 15,37 mm
Różnica pomiarów: 2,52 mm
Maks.: 5,60 mm (180°)
Min.: -5,62 mm (0°)



Wykres ugięcia pręta w funkcji jego długości

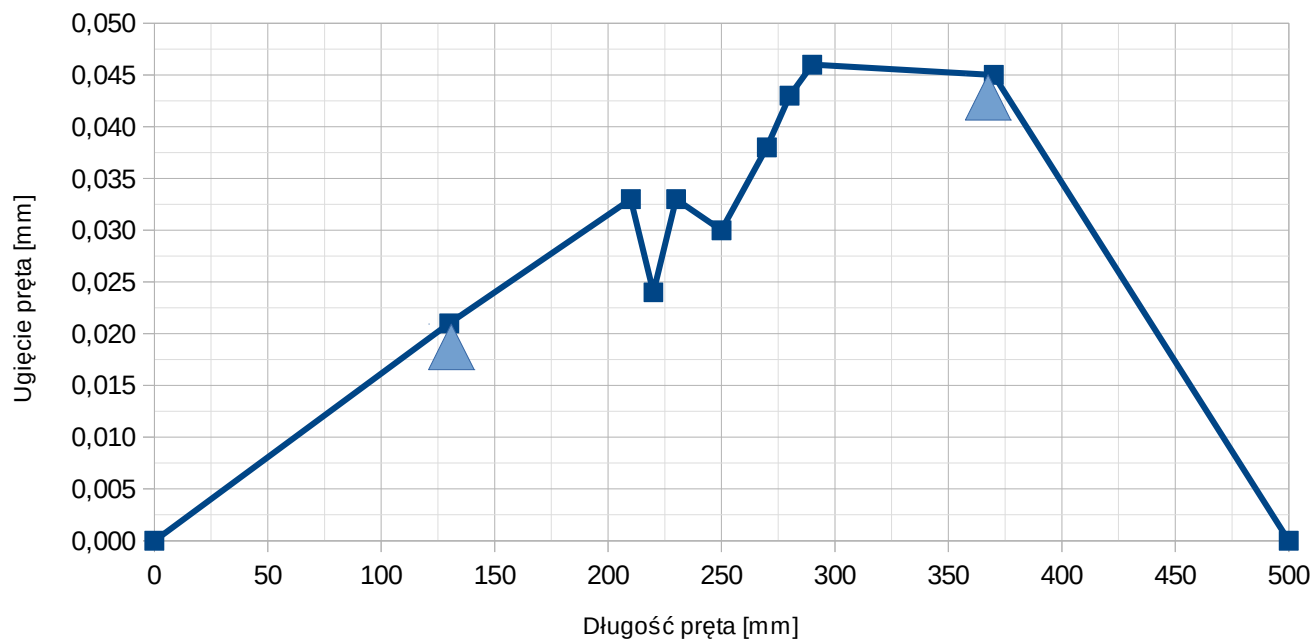


*Przykładowa postać wykresu obrazującego
wielkość i postać ugięcia wyprostowanego pręta po prostowaniu*

Pozycja ustawienia: 250 mm
Pozycja kąta wałka: 10°
Pozycja podpory 1: 130 mm
Pozycja podpory 2: 370 mm
Czas przytrzymania: 5 s



Wykres ugięcia pręta w funkcji jego długości

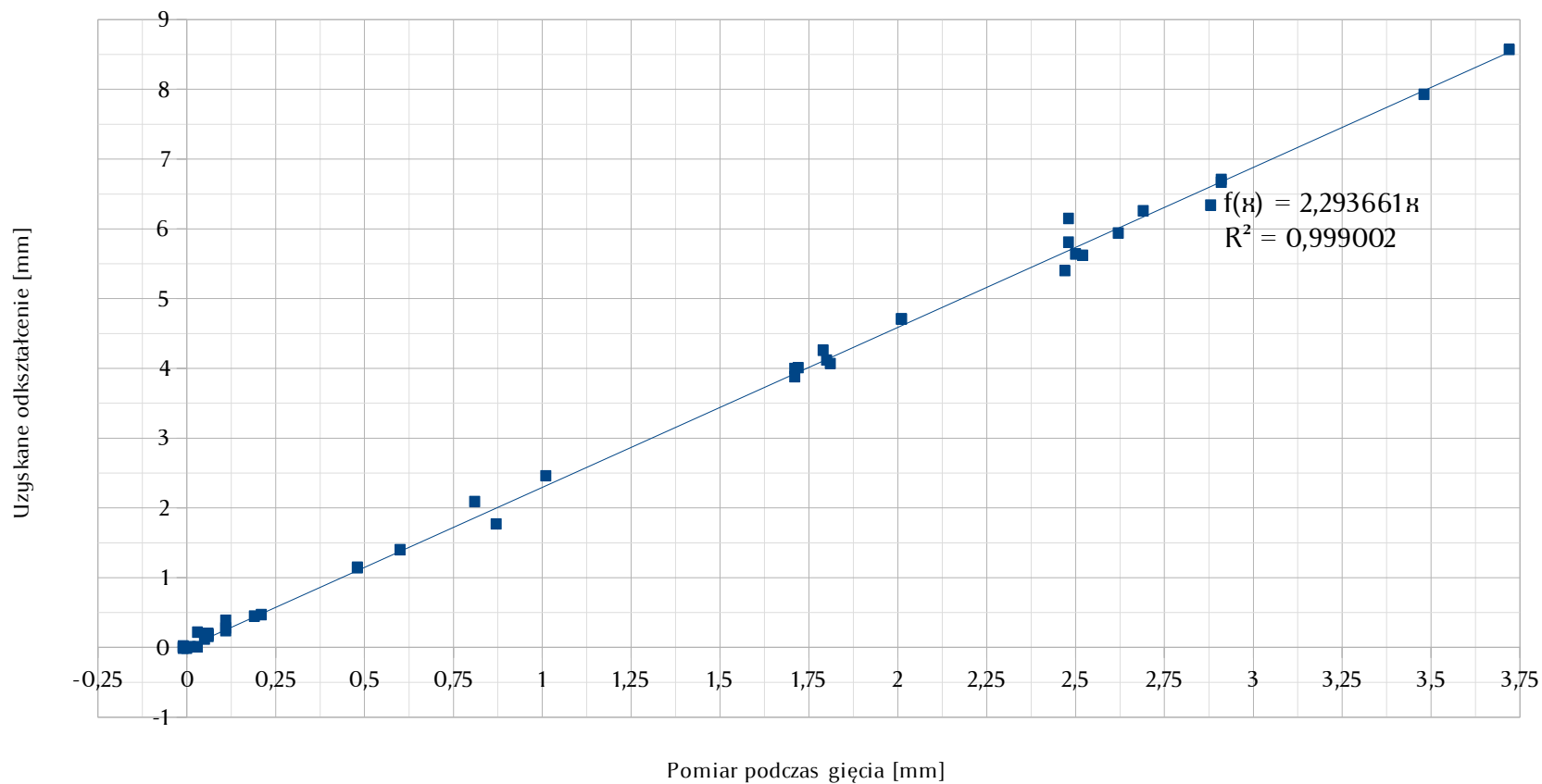


*Przykładowa postać wykresu obrazującego
wielkość i postać ugięcia wyprostowanego pręta po prostowaniu*

Pozycja ustawienia: 250 mm
Pozycja kąta wałka: 10°
Pozycja podpory 1: 130 mm
Pozycja podpory 2: 370 mm
Czas przytrzymania: 5 s



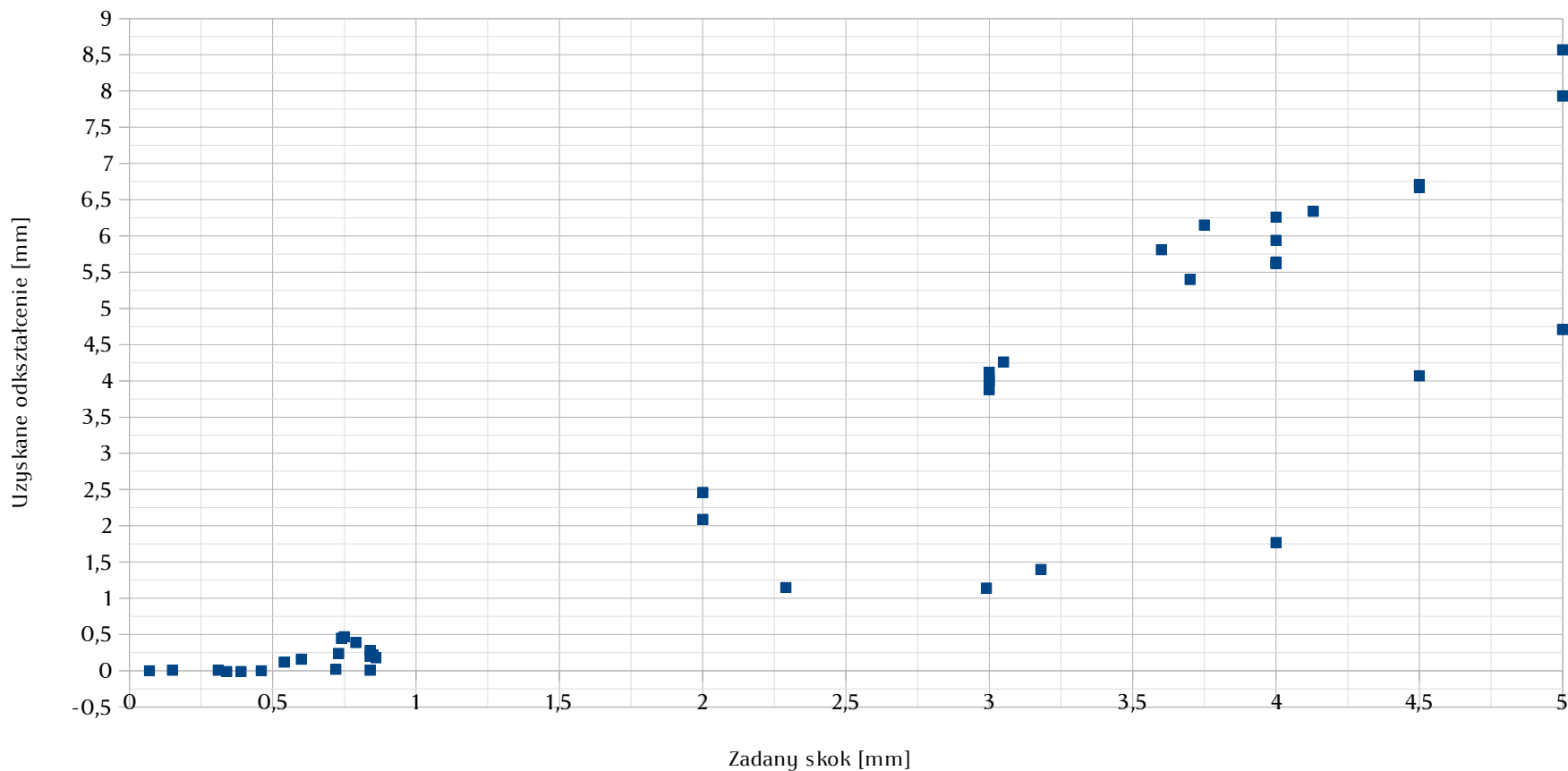
Wykres uzyskanego odkształcenia od pomiarów podczas gięcia i prostowania dla podpór 130/370



Wykres gięcia i prostowania dla podpór 130/370



Wykres uzyskanego odkształcenia w funkcji zadanego skoku



Wykres odkształcenia od skoku dla podpór 130/370

Wnioski



- Obliczenia teoretyczne ugięcia plastycznego nie odpowiadają wynikom doświadczeń;
- Plan badań polegający na wielokrotnym zginaniu i prostowaniu prętów pozwolił wyznaczyć empiryczną zależność odkształcenie/ugięcie, która wspomogła dobór parametrów w obszarze eksperckim;
- Dla wysokich wartości ugięć odkształcenia plastyczne dominują nad sprężystymi i zachowują się bardziej liniowo.



Literatura



- [1] Zbigniew Brzoska *Wytrzymałość materiałów*, Państwowe Wydawnictwo Nauk, Warszawa 1983 r.
- [2] K. Magnucki, W. Szytka *Wytrzymałość materiałów w zadaniach. Pręty, płyty i powłoki obrotowe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, Poznań 2000 r.



Seminarium



Poznań, 11.05.2017

Dziękuję za uwagę.