

dr inż. Witold Kurski

Instruktor Sportu w Żeglarstwie Nr 3259/I/S/99

Instruktor Żeglarstwa Lodowego PZŻ Nr 29

PODSTAWOWE WIADOMOŚCI O MECHANICE MASZTU ŚLIZGU LODOWEGO

GDAŃSK – PAŹDZIERNIK 2007

Materiały Szkoleniowe dla Instruktorów Żeglarstwa Lodowego.

Prezentowane na Spotkaniu Środowiskowym w Rydze 28.10.2007 r

Skorygowane i uzupełnione w lutym 2015 roku

1 Wstęp

Ślizg lodowy DN stał się, po 70 latach od chwili powstania, bardzo zaawansowaną pod względem technicznym konstrukcją. Dotyczy to w szczególności elastycznych masztów pracujących na granicy utraty stateczności i współpracujących z elastyczną konstrukcją ślizgu. Elastyczność konstrukcji zapewnia sprężysta płozownica. Trenerzy i zawodnicy dopracowali się praktycznych metod doboru masztu i płozownicy odpowiedniej dla danego zawodnika przy konkretnych warunkach lodowych. Tym zagadnieniom są poświęcone prace A. Michalczyka i D. Koseckiego. W tym opracowaniu zawarte są podstawy teoretyczne na których opierał się D. Kosecki pisząc swoją pracę trenerską i przytoczono je w rozdziale 2. W stosunku do opracowania D. Koseckiego rozszerzono wnioski, które można wyciągnąć z analizy zależności geometrycznych i wytrzymałościowych. Wnioski te przytoczono w rozdziale 3.

2 Zależności geometryczne i wzory wytrzymałościowe

W tym rozdziale zostaną przytoczone podstawowe wzory wytrzymałościowe i związki geometryczne, zaś ich synteza zostanie dokonana w rozdziale następnym.

Przyjęto następujące oznaczenia:

- L – długość masztu od pięty do topu [cm].
- H – odległość od pięty masztu do zaczepu sztagu na maszcie [cm].
- EJ – sztywność zginania masztu [$kN \cdot cm^2$].
- E – moduł sprężystości podłużnej materiału masztu [kN/cm^2].
- J – moment bezwładności przekroju poprzecznego masztu [cm^4].

1. Wzór wytrzymałościowy (1).

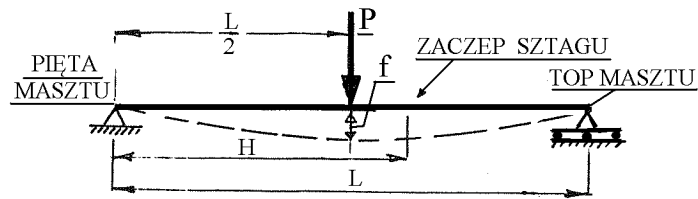
Ugięcie f pod siłą P przyłożoną w środku masztu, tak jak to się praktykuje podczas prób sztywności masztu, (patrz rys. 1)

$$f = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot EJ} \quad (1)$$

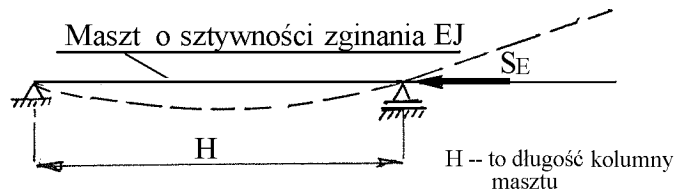
2. Wzór wytrzymałościowy (2).

Siła krytyczna Eulerowska przy której kolumna masztu wybacza się:

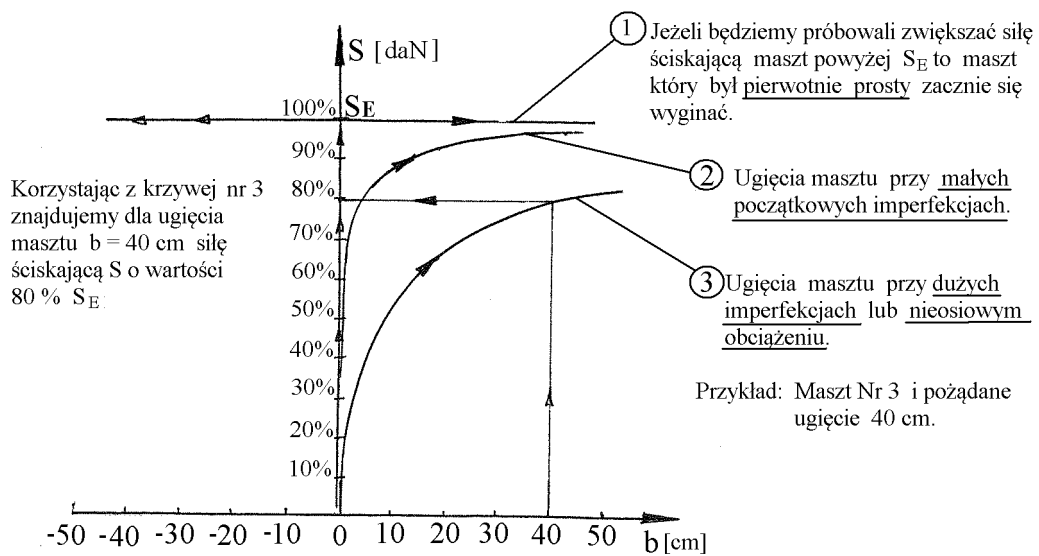
$$S_E = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{H^2} \quad (2)$$



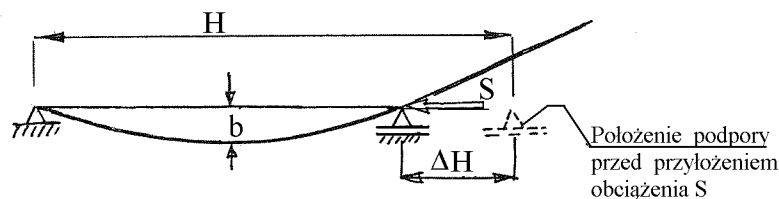
Rysunek 1: Podparcie masztu przy próbie sztywności



Rysunek 2: Model do obliczenia siły krytycznej



Rysunek 3: Zmiany sił i ugięć przy imperfekcjach wykonania masztu i nieosiowym obciążeniu



Rysunek 4: Zbliżenie węzłów masztu przy jego wygięciu

Idealnie wykonany maszt, obciążany osiowo pozostaje prosty aż do chwili przyłożenia siły osiowej o wartości S_E , co przedstawiono na rysunku 3 linią pionową. Przy próbie zwiększenia siły ściskającej nad krytyczną przeszło masztu zaczyna się wyginać, pojawia się strzałka ugięcia b – patrz dwie gałęzie prawie poziomej krzywej na rys. 3. W rzeczywistości maszty nigdy nie są idealnie wykonane i najczęściej obciążenie nie jest przyłożone osiowo. Ze strony tkaniny żagla część obciążenia może działać w poprzek masztu, a siły ze strony want też nie działają w osi masztu. Naciska również bom. Wtedy już przy sile ściskającej wynoszącej ułamek obciążenia krytycznego obserwujemy w środku kolumny ugięcie b . W praktyce wykorzystujemy celowo niesymetryczne obciążenie od want, jak i nacisk bomu, do wcześniejszego spowodowania wygięcia masztu. Ten efekt przedstawiono na rysunku 3. Stąd wniosek, że jeśli chcemy sterować wartością siły ściskającej, przy której osiąga się określoną strzałkę wygięcia masztu, to jest kilka sposobów realizacji tego zadania:

1. W procesie budowy masztu osiągnąć określoną wartość S_E .
2. W czasie eksploatacji zbudowanego masztu stosować wsuwane wkładki zwiększające sztywność zginania a więc i siłę krytyczną.
3. W czasie eksploatacji stosować nieosiowe obciążenie, ale tu przepisy mogą ograniczać rozwiązania.

3. Wzór (3) opisujący zależności geometryczne.

Wzór (3) opisuje zbliżenie ΔH zaczepu sztagu do pięty masztu, jeśli pod wpływem obciążeń środek kolumny masztu wygnie się o wartość b (patrz rys.4):

$$\Delta H = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{1}{H} \cdot b^2 \quad (3)$$

W tabelicy 1 zestawiono wyliczone ΔH w zależności od strzałki wygięcia masztu b dla trzech długości kolumny masztu. To zbliżenie węzłów masztu skutkuje przemieszczeniami zaczepu sztagu na zawietrzną i wzdłuż osi jachtu ku rufie.

4. Zależności dotyczące sił powstających w kolumnie masztu w wyniku sił przechylających

Siły te trzeba wyznaczyć aby móc porównać z obciążeniem jakie przenosi maszt gdy osiąga pożądane wygięcie. Trzeba więc odpowiedzieć na pytanie: jaka siła ściskająca działa na kolumnę masztu podczas żeglugi?

ODPOWIEDŹ: Siła ściskająca maszt S jest wprowadzana na kolumnę przez napięcie want, napięcie tkaniny żagla i napięcie sztagu, ale przyczyny ich powstania są dwie. Są to:

1. Siła przechylająca ślizg, pochodząca od aerodynamicznego działania wiatru na żagiel i wywołująca w olinowaniu siły wewnętrzne, a za miarodajny stan obciążenia przyjmujemy ten, gdy nawietrzna płoza chce oderwać się od lodu.
2. Napięcie szotów.

Oznaczmy przez:

\bar{S} – siła w kolumnie masztu od siły przechylającej ślizg;

$\underline{\bar{S}}$ – siła w kolumnie masztu od napięcia szotów.

W chwili gdy nawietrzna płoza zaczyna odrywać się od lodu, siłę \bar{S} można wyliczyć z

Tabela 1: Zbliżenie węzłów masztu ΔH [cm]

Wartość b [cm]	Maszt H=324 cm	Maszt H=340 cm	Maszt H=354 cm
10	0.76	0.72	0.70
15	1.71	1.63	1.56
20	3.05	2.91	2.79
25	4.76	4.54	4.36
30	6.85	6.53	6.27
35	9.33	8.89	8.54
40	12.18	11.60	11.15
45	15.41	14.68	14.10
50	19.03	18.13	17.42
55	23.02	21.94	21.07
60	27.40	26.11	25.08

warunku równowagi w chwili utraty stateczności ślizgu. Moment od sił ciężkości względem osi obrotu przy wywrotce porównujemy do momentu siły aerodynamicznej. Ostatecznie, po uproszczeniach, warunek ten wygląda następująco:

$$\bar{S} = P_W \cdot n_m = (G + Q) \cdot \left(\frac{0.8 \cdot b}{2} \right) \cdot \frac{1}{H_z} \cdot n_m \quad (4)$$

- P_W – pochodzi od siły przewracającej ślizg, po jej rozdzieleniu na pięć masztu i węzeł zaczepu sztagu
 G – jest ciężarem zawodnika
 Q – jest ciężarem ślizgu wyposażonego
 $(0.8 \cdot b/2)$ – jest ramieniem prostującym
 H_z – jest wysokością nad powierzchnią lodu zaczepu want na maszcie
 n_m – jest mnożnikiem zwanym współczynnikiem wpływu pokazującym ile razy siła osiowa w maszcie jest większa od składowej poziomej siły aerodynamicznej obciążającej węzeł zaczepu wanty na maszcie.

Mnożnik n_m daje się łatwo wyliczyć z zadania statyki jeśli znamy geometrię konstrukcji. Wartość n_m dla ślizgu DN zależy od długości masztu.

Podobnie można wyznaczyć mnożniki dla wanty n_w i dla sztagu n_s . Wynoszą one:

- dla długości kolumny 324 cm: $n_m = 8.24$, $n_w = 2.95$, $n_s = 6.01$;
- dla długości kolumny 334 cm: $n_m = 8.47$, $n_w = 3.03$, $n_s = 6.14$;
- dla długości kolumny 344 cm: $n_m = 8.70$, $n_w = 3.12$, $n_s = 6.26$;
- dla długości kolumny 354 cm: $n_m = 8.92$, $n_w = 3.18$, $n_s = 6.40$.

Przykład: Ciężar ślizgu $Q = 65 \text{ daN}$, ciężar zawodnika $G = 75 \text{ daN}$, razem 140 daN . Rozstaw płóz $b = 242 \text{ cm}$, wysokość $H_z = 340 \text{ cm}$. Współczynnik n_m dla masztu o $H = 344 \text{ cm}$ wynosi $n = 8.7$. Stąd:

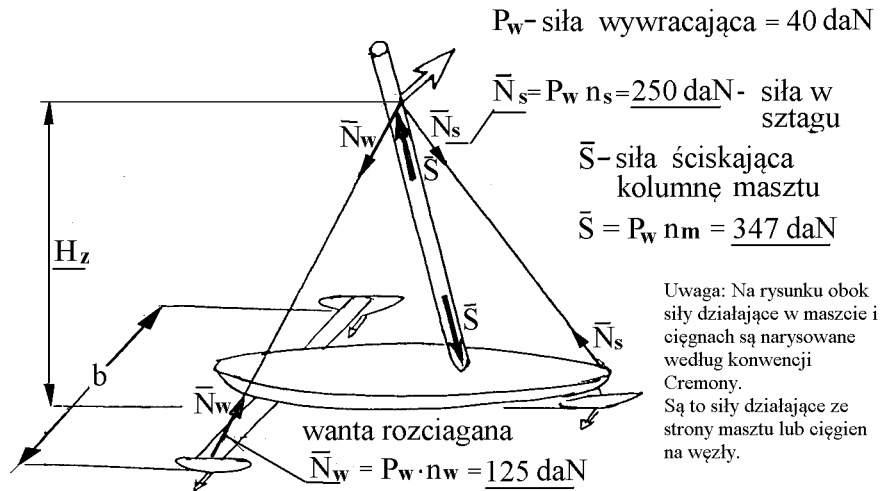
$$\bar{S} = 140 \cdot \frac{0.8 \cdot 242}{2} \cdot \frac{1}{340} \cdot 8.7 = \underline{347 \text{ daN}}$$

Wielkością \bar{S} przy konkretnym ślizgu i zawodniku nie daje się sterować.

Podobnie można wyliczyć siły w sztagu \bar{N}_{sztagu} i w wancie \bar{N}_{wanty} , pochodzące od siły przewracającej ślizg.

$$\bar{N}_{\text{sztagu}} = 140 \cdot \frac{0.8 \cdot 242}{2} \cdot \frac{1}{340} \cdot 6.26 = \underline{250 \text{ daN}}$$

$$\bar{N}_{\text{wanty}} = 140 \cdot \frac{0.8 \cdot 242}{2} \cdot \frac{1}{340} \cdot 3.12 = \underline{125 \text{ daN}}$$



Rysunek 5: Obciążenie masztu i sztagu od siły P_w przewracającej ślizg

Znając S_{dop} możemy określić siłę \bar{S} jaką może wprowadzić do masztu sternik napinając szoty:

$$\bar{S} = S_{dop} - \bar{S} \quad (5)$$

a następnie z warunku równowagi siłę naciągu szota gdy maszt się wygiął, co zostanie przedstawione w następnym rozdziale.

3 Wnioski dotyczące pracy masztu

Przytoczone w poprzednim rozdziale wzory pozwalają na wyciągnięcie nadzwyczaj wielu informacji o pracy masztu ślizgu DN.

3.1 Wyznaczanie siły krytycznej przez próbę zginania

Próba polega na zawieszeniu ciężaru P o znanej wartości w środku masztu (patrz rys. 1). Maszt podparty jest pod piętą i pod topem. Mierzmy strzałkę ugięcia f . Wykorzystując wzór (1) możemy wyznaczyć sztywność zginania EJ .

$$EJ = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot f} \quad (6)$$

którą podstawiamy do wzoru (2) i otrzymujemy :

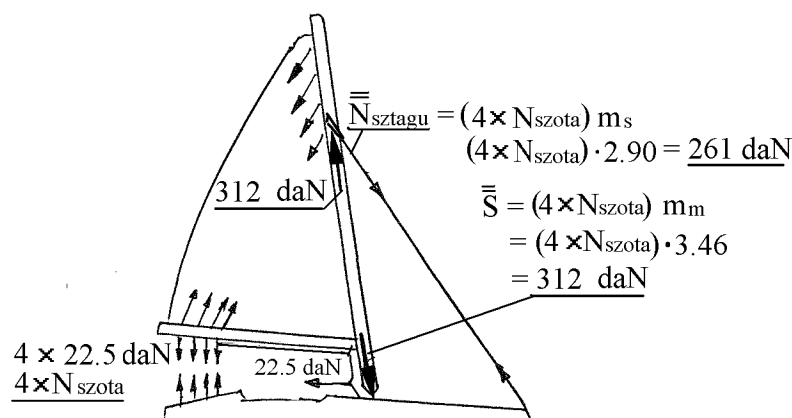
$$S_E = \frac{\pi^2 \cdot P \cdot L^3}{48 \cdot H^2 \cdot f} \quad (7)$$

Przykład: $P = 70$ daN, $L = 480$ cm, $H = 340$ cm, $f = 20$ cm

$$S_E = \frac{\pi^2 \cdot 70 \cdot 480^3}{48 \cdot 340^2 \cdot 20} = \underline{\underline{688}} \text{ daN}$$

Siła Eulerowska kolumny wynosi 688 daN.

Pozostaje kwestia jaką jest określenie, czy maszt o takiej sile krytycznej jest dobry dla konkretnego zawodnika. Tym zagadnieniem D. Kosecki zajął się w swojej pracy trenerskiej [1].



Rysunek 6: Obciążenie masztu i sztagu od napięcia szotów

3.2 Siła w maszcie i olinowaniu od pracy szota

Siła w szocie zwielokrotniona czterokrotnie dzięki bloczkom obciąża bom i następnie poprzez tkaninę żagla obciąża maszt (patrz rys. 6). Z warunków równowagi można określić mnożnik obciążenia m_m , przez który trzeba mnożyć siłę wywieraną na bom przez szoty, aby otrzymać siłę ściskającą w maszcie. Mnożnik ten dla masztu o długości kolumny 344 cm wynosi $m_m = 3.46$. Podobnie można określić mnożnik dla sztagu i wynosi on $m_s = 2.90$, zaś dla wanty mnożnik $m_w = 0$

Cztery siły w szocie wytwarzają w maszcie siłę ściskającą \overline{S} :

$$(N_{szota} \cdot 4) \cdot m_m = \overline{S} \quad (8)$$

Ale \overline{S} nie może być większe niż różnica siły dopuszczalnej S_{dop} i siły już wykorzystanej \overline{S} . A więc największą wartość \overline{S} liczymy ze wzoru:

$$\overline{S} = S_{dop} - \overline{S} \quad (9)$$

stąd :

$$N_{szota} = \frac{\overline{S}}{4 \cdot m_m} \quad (10)$$

Podobnie możemy wyznaczyć siłę w sztagu \overline{N}_{sztagu} pochodzącą od napięcia szotów.

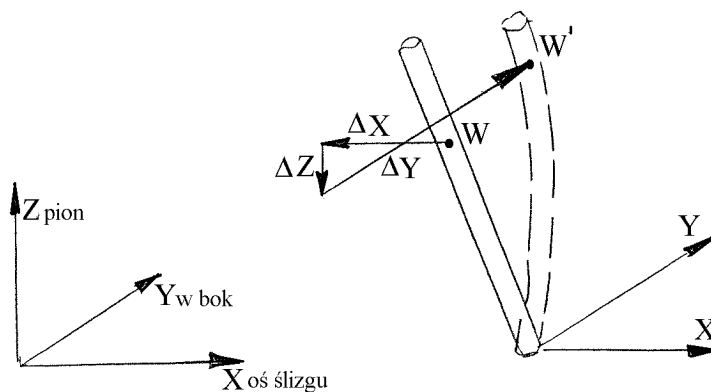
$$\overline{N}_{sztagu} = (N_{szota} \cdot 4) \cdot m_s = N_{szota} \cdot 4 \cdot 2.90 \quad (11)$$

Wniosek: Siły w szocie nie zależą od siły przechylającej ślizg, a więc nawet na postoju w warunkach bez wiatru, gdy postawimy żagiel i naciągniemy szot siłą np. 10 daN, to w maszcie pojawi się siła 13.8 razy większa, to jest 138 daN, a w sztagu 11.6 razy większa, to jest 116 daN.

Przykład:

Niech $S_{dop} = 660 \text{ daN}$ (96 % S_E), wyliczone $\overline{S} = 348 \text{ daN}$, to siła w szocie przy której maszt się wygnie w stopniu pożądanym jest:

$$N_{szota} = \frac{\overline{S}}{4 \cdot m_m} = \frac{S_{dop} - \overline{S}}{4 \cdot m_m} = \frac{660 - 348}{4 \cdot 3.46} = \underline{\underline{22.5 \text{ daN}}} \quad (12)$$



Rysunek 7: Przemieszczenia węzłów odkształconego masztu

$$\overline{N}_{sztagu} = (N_{szota} \cdot 4) \cdot m_s = (22.5 \cdot 4) \cdot 2.90 = \underline{\underline{261 \text{ daN}}} \quad (13)$$

Poniżej w tabeli zestawiono wyniki obliczeń sił w konstrukcji dla ślizgu z przykładu.

	Od siły P_W	Od szota	RAZEM
1. Maszt	348 daN	312 daN	660 daN
2. Sztag	250 daN	261 daN	511 daN
3. Wanta naw.	125 daN	0 daN	125 daN
4. Szot	—	22.5 daN	22.5 daN

3.3 Położenie masztu po jego wygięciu

Zbliżenie zaczepu sztagu do pięty masztu na skutek dużej strzałki wygięcia masztu skutkuje zmianą położenia masztu. Maszt pochyli się na zawietrzną oraz ku rufie. Wielkości przemieszczeń węzła zaczepu sztagu możemy określić podając zmiany współrzędnych X, Y, Z , które oznaczymy przez $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – (patrz rys. 7). Z analizy deformacji przestrzennego układu jakim jest maszt, wanta nawietrzna i sztag wynika, że zbliżenie węzła zaczepu sztagu ku pięcie masztu o 1 cm skutkuje:

1. Przemieszczeniem tego węzła ku rufie o 3.9 cm.
2. Przemieszczeniem tego węzła na zawietrzną o 8.7 cm.
3. Przemieszczeniem tego węzła w dół o 2.18 cm.

Przykład: Maszt o $H = 340 \text{ cm}$ przy strzałce wygięcia $b = 25 \text{ cm}$ „skraca się” o $\Delta H = 5 \text{ cm}$ (patrz Tablica 1). Węzeł zaczepu sztagu przemieści się na zawietrzną o $5 \text{ cm} \cdot 8.7 = 43.5 \text{ cm}$. Sytuację tę przedstawiono na rysunku 8.

Przeprowadzone dalsze analizy, tutaj nie zamieszczone, odnośnie wpływu ugięcia płozownicy na przemieszczenie węzła masztu wykazują, że 2.5 cm ugięcia płozownicy skutkuje tyle samo co 1 cm „skrócenia” kolumny masztu.

3.4 Wymuszanie wygięcia masztu poprzez przyłożenie do masztu momentu gnącego

Zredukowane do węzła 2 siły pochodzące od żagla, sztagu i want wytwarzają wypadkową siłę ściskającą „S”. Od wanty nawietrznej poza siłą ściskającą, wprowadzany jest w węzle 2 dodatkowo moment gnący, który spowoduje wygięcie „b” w środku kolumny. W węźle 1

to jest w pięcie masztu nie ma mimośrodowość dla wprowadzanych sił, który by powodował wprowadzanie momentu.

Mechanika konstrukcji np.[3] podaje wzory na wyznaczenie wartości strzałki ugięcia „b” w środku przęsła dla przypadku belki ściskanej, gdy na jednej podporze wprowadzono moment M_g .

$$b = \frac{M_g}{S} \cdot \left(\frac{1}{\cos u} - 1 \right) \cdot 0.5 \quad (14)$$

Ponieważ moment M_g jest wytwarzany przez siłę N_{wp} działającą na ramieniu r to znaczy $M_w = N_{wp} \cdot r$ więc:

$$b = \frac{N_{wp} \cdot r}{S} \cdot \left(\frac{1}{\cos u} - 1 \right) \cdot 0.5 \quad (15)$$

gdzie:

$$u = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{S}{S_E}} \quad (16)$$

S – jest siłą ściskającą kolumnę masztu,

S_E – jest siłą Eulerowską zwaną również krytyczną, którą można określić z próby zginania.

u – jest parametrem podłużnego zginania. Jest to przetworzony do obliczeń iloraz S/S_E . Przy sile $S = S_E$ wartość tego parametru wynosi $u = 0.5 \cdot \pi = 1.570796$ a przy sile $S = 0.5 \cdot S_E$ wartość tego parametru wynosi $u = 0.5 \cdot \pi \cdot \sqrt{0.5} = 1.570796 \cdot 0.707107 = 1.10720$. Parametr „u” może być określany w radianach lub w stopniach. Wartość $u = 90^\circ$ oznacza siłę krytyczną. Wzór na wartość strzałki ugięcia „b”, możemy zapisać prościej wprowadzając funkcję pomocniczą $F(u)$.

$$F(u) = \left(\frac{1}{\cos u} - 1 \right) \cdot 0.5 \quad (17)$$

i wtedy

$$b = \frac{N_{wp} \cdot r}{S} \cdot F(u) \quad (18)$$

Wyniki obliczeń wartości funkcji $F(u)$ zestawiono poniżej w tabeli.

Tabela 1

S / S_E	0.00	0.50	0.60	0.70	0.80	0.820	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92
$F(u)$	0.00	0.63	0.94	1.47	2.53	2.880	3.33	3.89	4.65	5.70	7.30
S / S_E	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.975	0.980	0.985	0.990	0.995	1.00
$F(u)$	8.45	9.95	12.0	15.3	20.6	24.80	31.20	41.80	63.00	126.7	∞

Jeśli chcemy, aby ugięcie b kolumny masztu wyniosło np 25 cm przy sile S_{dop} równej 95% siły krytycznej, to efektywna długość ramięczka „r” winna być:

$$r = \frac{25 \text{ cm}}{12.0} \cdot \frac{0.95 \cdot S_E}{N_w} \quad (19)$$

Przy $S_E/N_w = 8$ otrzymujemy wynik $r = 15.8$ cm.

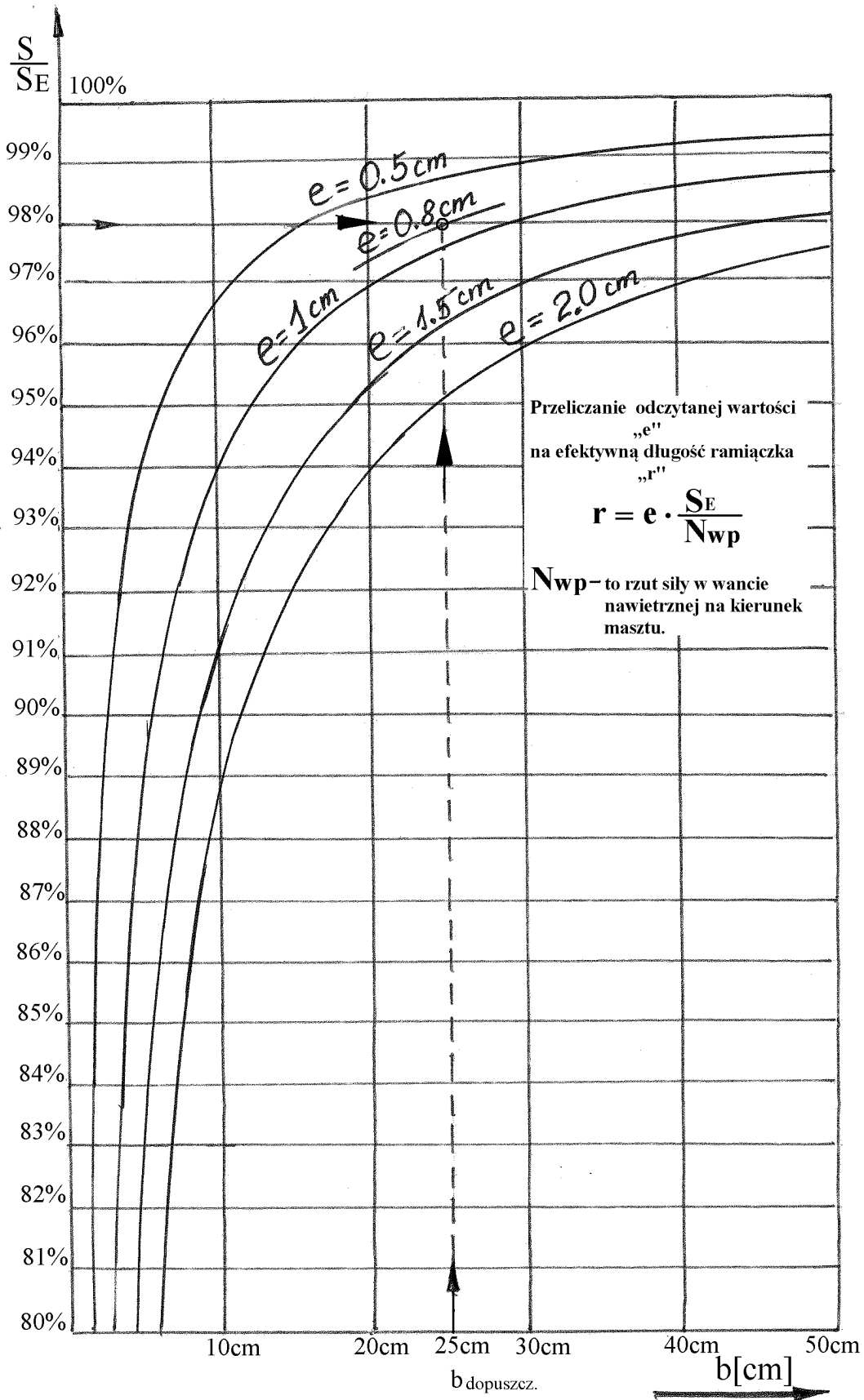
Przez efektywną długość ramięczka rozumiemy odległość mierzona prostopadle od płaszczyzny symetrii masztu do wykorzystywanego aktualnie zaczepu wanty na ramięczku.

Jeśli to samo wygięcie ma być osiągnięte przy 98% siły krytycznej, to:

$$r = \frac{25 \text{ cm}}{31.2} \cdot \frac{0.98 \cdot S_E}{N_w} \quad (20)$$

Przy $S_E/N_w = 8$ otrzymujemy wynik $r = 6.28$ cm.

Iloraz siły Eulerowskiej S_E i składowej pionowej napięcia wanty N_{wp} szacujemy wstępnie na około od 8 do 10. Średnia wartość siły wybaczającej kolumnę masztu DNa to 750 daN,



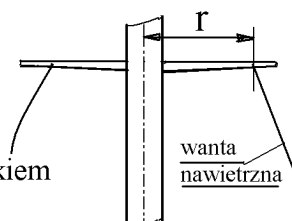
Rysunek 10: Strzałka ugięcia kolumny masztu w zależności od obciążenia, i mimośrodu e

Znaleziona wartość „e” służy do wyznaczenia efektywnej długości ramiączka „r”.

$$r = e \cdot \frac{S_E}{N_{wp}}$$

Siła Eulerowska S_E masztu jest od 6 do 10 razy większa od siły N_{wp} a tylko N_{wp} wytwarza pożądany moment zginający maszt. Dlatego r musi być 6 do 10 razy większe od wyliczonego „e”. Ramiączko zwane bywa również orczykiem

Te zależności wynikają ze ścisłych rozważań inżynierskich.



Rysunek 11: Mocownie wanty do orczyka celem uzyskania wygięcia masztu

a siła N_{wp} to około 40% ciężaru ślizgu wyposażonego do żeglugi wraz załogą. Do kalkulacji potrzebnego mimośrodowego zaczepienia wanty, czyli efektywnej długości ramiączka, można również skorzystać z wykresu (patrz rys. 10) wchodząc siłą S i prowadząc linię poziomą oraz wartością pożądaną strzałki wygięcia b i prowadząc linię pionową aż do przecięcia się prostych. Odczytujemy pomocniczą wartość e , którą następnie zamieniamy na efektywną długość ramiączka „r” korzystając z poniższego wzoru.

$$r = e \cdot \frac{S}{N_{wp}} \quad (21)$$

Wynik będzie ten sam jak z rachunków. Dla wnikliwych czytelników podaję, co należy rozumieć przez wartość „e”. Gdyby na mimośrodku „e” umieścić całą siłę „S” to wytworzyłaby ona taki sam moment gnący jaki wytwarza siła N_w na ramiączku „r”. A więc $S \cdot e = N_{wp} \cdot r$. Analizując wykresy na rys. 10 można stwierdzić, że sensowne wartości siły ściskającej S , przy której uzyskuje się pożądaną wygięcie kolumny masztu na poziomie $b = 25 \text{ cm}$ i więcej zawierają się pomiędzy 96% a 100% siły Eulerowskiej, a średnio jest to 98% S_E . Niezależnie od posiadania tak efektywnego sposobu uzyskiwania pożądanego wygięcia masztu istnieje w praktyce nieco mniej efektywny ale też skuteczny sposób, jakim jest gięcie masztu poprzez nacisk bomu.

Najlepiej jednak dobrać sztywność masztu według idealnych wzorców a możliwości gięcia poprzez użycie ramiączka o mimośrodku „r” lub przez nacisk bomu, zastosować tylko do niezbędnej korekty działania masztu.

Jeśli sztag i wanty są podczipione do trójkąta, bez użycia ramiączka, to uważamy, że praktycznie nie ma mimośrodu obciążenia. Wtedy można wymusić ugięcie masztu przez nacisk bomu. Należy położenie bloczków szotów na bomie i kadłubie dobrać doświadczalnie gdyż rachunki w tym przypadku są bardziej skomplikowane niż w analizie wpływu mimośrodu ramiączka.

4 Pozostałe problemy do zbadania w zakresie mechaniki konstrukcji masztów ślizgów lodowych

1. Wpływ elastyczności masztu na amortyzację ślizgu. Istnieją tu dwa zagadnienia:
 1. Zachowanie się konstrukcji pod wpływem poziomych podmuchów wiatru. Ten problem jest doskonale znany i opanowany w praktyce.
 2. Wpływ elastyczności masztu na odpowiedź ślizgu w ruchu po nierównościach lodu. Nie wiadomo czy istnieje i jak go badać.
2. Badanie wtórnych naprężeń przy zginaniu masztu. Istota problemu występowania naprężeń od wtórnego zginania została teoretycznie dokładnie rozpoznana dla dźwi-

garów lotniczych już w okresie międzywojennym. Problem ten jest ważny dla cienkościennych konstrukcji metalowych jakie spotyka się w budownictwie, lotnictwie i okrętownictwie. Nie wiadomo aby ktokolwiek dokonywał przeliczeń dla masztów ślizgów lodowych. Problem jest ważny dla elastycznych masztów, bo niszczenie cienkiej powłoki masztu nie zaczyna się od rwania włókien w kierunku podłużnym a od niszczenia w kierunku obwodowym, i to od wewnętrznej strony poszycia co ogranicza nośność masztu. Poszycie masztu może być zniszczone od wewnątrz od strony niewidocznej dla obserwatora, a jedynym zauważalnym objawem jest zmniejszenie sztywności masztu.

Problem ten w żeglarstwie nie występuje dla masztów drewnianych, dla masztów aluminiowych nie ma znaczenia jeśli stosuje się przepisowe grubości ścianek przewidziane przez przepisy klasyfikacyjne, a dla masztów wykonanych z laminatu wymaga bardzo wnikliwego podejścia bowiem nie opracowano jeszcze odpowiednich przepisów (przez towarzystwa klasyfikacyjne dla jachtów żaglowych i statków).

3. Potrzeba i rola dodatkowych usztywnień masztów ślizgów lodowych poprzez owantowanie.

Literatura

- [1] Kosecki Dariusz: Dobór masztu ślizgu DN do zawodnika. Praca dyplomowa trenerska obroniona w A.W.F.i S. w Gdańsku w 2002 r.
- [2] Kosecki Dariusz: Kryteria doboru płozownicy ślizgu DN do warunków żeglugi i zalecenia technologiczne. Praca dyplomowa magisterska obroniona w A.W.F.i S. w Gdańsku w 2004 r.
- [3] Naleszkiewicz J.: Zagadnienia stateczności sprężystej. Wydawnictwa Komunikacyjne, Warszawa 1953
- [4] Timoszenko S.: Teoria stateczności sprężystej. Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1966.

Załącznik

Mechanika konstrukcji np.[3] i [4] podaje również dla przypadku belki ściskanej wzory na wyznaczenie wartości kątów obrotu w przekrojach podporowych, gdy na podporze wprowadzono moment M_g . Kąt obrotu φ_2 w miejscu przyłożenia momentu M_g to jest w przekroju „2” określa wzór:

$$\varphi_2 = \frac{M_g \cdot H}{3 \cdot EJ} \cdot \Psi(u) \quad (22)$$

gdzie: $M_g = N_{wp} \cdot r$

$$u = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{S}{S_E}} \quad (23)$$

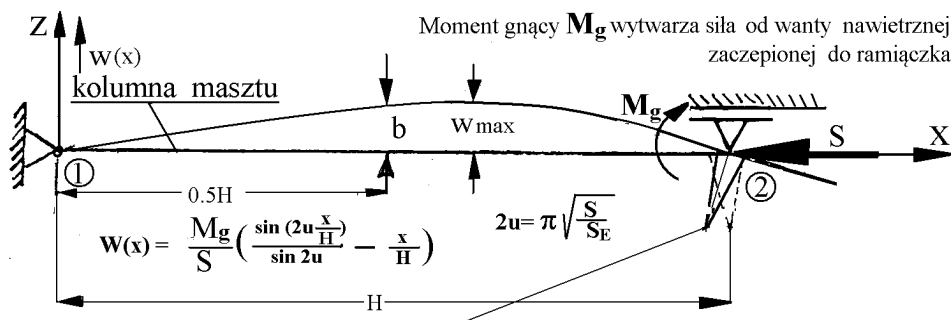
S – jest siłą ściskającą kolumnę masztu,

S_E – jest siłą Eulerowską zwaną również krytyczną, którą można określić z próby zginania.

$\Psi(u)$ to funkcja pomocnicza podłużnego zginania, określona wzorem:

$$\Psi(u) = \frac{3}{2u} \cdot \left(\frac{1}{2u} - \frac{1}{\operatorname{tg} 2u} \right) \quad (24)$$

Parametr u może być określony w radianach lub w stopniach. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli poniżej.



Rysunek 12: Wygięcie ściskanego masztu poprzez wprowadzenie na podporę momentu gnącego

Tabela 2

S / S_E	0.00	0.50	0.60	0.70	0.800	0.820	0.840	0.860	0.880	0.900	0.920
$\Psi(u)$	0.00	1.64	1.95	2.46	3.480	3.819	4.243	4.787	5.512	6.527	8.048
S / S_E	0.930	0.940	0.950	0.960	0.970	0.975	0.980	0.985	0.990	0.995	1.00
$\Psi(u)$	9.135	10.58	12.61	15.65	20.72	24.77	30.85	40.98	61.25	122.0	∞

Przykład:

Niech siła krytyczna masztu o długości kolumny $H = 340$ cm wynosi $S_E = 750$ daN. Ze wzoru na siłę krytyczną

$$S_E = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{H^2} \quad (25)$$

określamy $EJ = 8.788 \cdot 10^6$ daNcm².

Siłę N_{wp} przyjmijmy równą 80 daN, a efektywną długość ramiączka 8 cm czyli moment M_g na podporze wynosi 640 daNcm. Siłę S przyjmijmy na poziomie 96% siły Eulerowskiej. Z tablicy powyżej określamy wartość funkcji $\Psi(u)$ wynoszącą 15.65. Wartości te postawiamy do wzoru poniżej.

$$\varphi_2 = \frac{M_g \cdot H}{3 \cdot EJ} \cdot \Psi(u) \quad (26)$$

Wynik obliczenia:

$$\varphi_2 = \frac{640 \cdot 340}{3 \cdot 8787862} \cdot 15.65 = 0.129 \text{ rad} = 7.40^\circ \quad (27)$$

Dla siły S na poziomie 98% siły eulerowskiej

$$\varphi_2 = \frac{640 \cdot 340}{3 \cdot 8787862} \cdot 30.85 = 0.254 \text{ rad} = 14.6^\circ \quad (28)$$

Dla bardziej wnikliwych czytelników podaję na podstawie piśmiennictwa [3] ogólny wzór na strzałkę ugięcia masztu w dowolnym przekroju „ x ”. Wzór ten był wykorzystany przy obliczaniu ugięcia w środku kolumny masztu to jest dla $x = 0.5 \cdot H$ i w artykule jest pod numerem (14).

$$w(x) = \frac{M_g}{S} \cdot \left(\frac{\sin(2u \cdot \frac{x}{H})}{\sin 2u} - \frac{x}{H} \right) \quad (29)$$

Podstawiając do powyższego wzoru kilka wartości „ x/H ” w otoczeniu środka kolumny np 0.4, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65 mogą się oni przekonać, że maksymalne ugięcia kolumny są w przekrojach „ x ” znajdujących się bliżej podpory obciążonej momentem.

Funkcje $F(u)$ i $\Psi(u)$ z którymi w tym opracowaniu zetknęliśmy się, należą do zbioru funkcji pomocniczych w zagadnieniach podłużnego zginania, które to funkcje zostały opracowane ponad sto lat temu przez Berryego i Bubnowa do analizy bardzo złożonych zagadnień wytrzymałości poszycia okrętu. Gdy zaczęto budować w okresie międzywojennym samoloty

metalowe to z podanych rozwiązań skorzystali konstruktorzy samolotów, a teraz korzystają żeglarze, bowiem maszty bojerów jak i maszty jachtów regatowych, tak się wyginają, że do opisu problemu trzeba korzystać z zaawansowanych teorii. Na wyższych uczelniach technicznych te problemy są wykładane dopiero na studiach magisterskich lub doktoranckich.

Witold Kurski DN P-385
E-mail: wiku@pg.gda.pl