



PROSTA WAGA LABORATORYJNA

Wykonując doświadczenia chemiczne czy samodzielnie przygotowując roztwory fotograficzne, korzystamy z przepisów wymagających precyzyjnego odważania różnych substancji. Opisana w niniejszym artykule waga umożliwia, przy starannym wykonaniu, uzyskanie dużej dokładności ważenia niewielkich ilości substancji chemicznych.

Poświęćmy najpierw nieco uwagi **teorii ważenia**, zrozumienie której umożliwi zorientowanie się od czego zależy wykonanie precyzyjnej wagi. Na rys. 1 podano schemat zastępczy ramienia wagi. Na osi środkowej zawieszono jest ramię. Na osiach AA' i BB' są zawieszono szalki. Jeśli masa przedmiotów na lewej szalce, po zrównoważeniu jest równa masie przedmiotów na prawej szalce, to mówimy, że waga jest **rzetelna**. Z analizy warunków równowagi ramienia wynikają 2 warunki rzetelności wagi: osie OO', AA' i BB' muszą być dokładnie równoległe, a długości półramion wagi muszą być równe (OA = OB).

W rzeczywistości nie udaje się wykonać idealnej wagi i nawet waga laboratoryjna ma pewien błąd ważenia.

Na rys. 2 pokazano przekrój ramienia wagi. Jeśli obie szalki są jednakowo obciążone, to ramię zajmuje położenie poziome. Przy nieznacznym niezrównoważeniu ramię odchyli się o kąt α . Można obliczyć to odchylenie:

$$\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \frac{\Delta m \cdot l}{(m_0 + 2m_0 + 2m_1) \cdot d} \quad (1)$$

gdzie m_0 – masa ramienia,
 m_0 – Masa szalki,
 m_1 – masa ważonego przedmiotu,
 Δm – niezrównoważenie (różnica mas przedmiotów na obu szalkach).

$l_1 = l_2 = l$ – długość półramienia,
 d – odległość punktu zawieszenia ramienia od linii łączącej punkty zawieszenia szalek (na rysunku grubość ramienia).

Jak wynika z tego wzoru dokładność ważenia zależy głównie od stosunku l/d , który powinien być jak największy. Natomiast dla uzyskania dużej czułości, przy ważeniu lekkich przedmiotów, również masa szalek i ramienia powinna być jak najmniejsza.

Ramię wagi można traktować jak wahadło fizyczne. Jak wiadomo okres drgań takiego wahadła określa się wzorem:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{m \cdot g \cdot d}} \quad (2)$$

J – jest momentem bezwładności ramienia względem osi zawieszenia i określa się jako suma mas poszczególnych punktów przez kwadraty ich odległości od osi.

Jeśli zaniedbać masę ramienia, to można przyjąć:

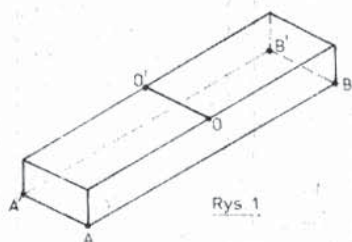
$I = 2(m_0 + m_1)l^2$
 $m = 2m_0 + 2m_1$ – masa wahadła fizycznego (masę ramienia zaniedbujemy)

$g = 981 \text{ cm/s}^2$ – przyspieszenie ziemskie,
 d – odległość środka ciężkości od osi wahadła (pokrywa się z wielkością d w poprzednim wzorze).

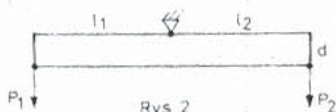
Po podstawieniu tych wartości otrzymujemy:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{2(m_0 + m_1) \cdot l^2}{2g(m_0 + m_1) \cdot d}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \sqrt{\frac{l}{d}} \quad (3)$$

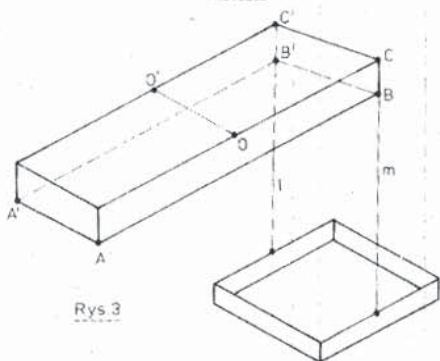
Jak wynika z tego wzoru przy zwiększaniu stosunku l/d wydłuża się okres wahań, jednak wpływ długości l jest większy niż d . Z tego powodu lepiej stosować krótkie ramie.



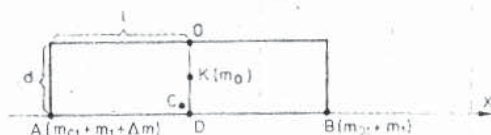
Rys. 1



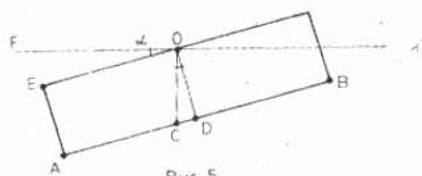
Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4



Rys. 5

Wahania ramienia tłumione są tarciem występującym w zawieszeniu osi ramienia. Gdy wzrasta stosunek l/d zmniejsza się również moment skręcający ramię i rola tarcia zwiększa się. Z tego powodu, przy dużym l/d , zwykle łożyska ślizgowe ze względu na duże tarcie nie nadają się i stosuje się swobodne zawieszenie. W wagach analitycznych środek ramienia leży na ostrzu pryzmatu wykonanego z agatu lub ze stali. Również do zawieszania szalek stosuje się pryzmaty.

W warunkach amatorskich takie pryzmaty są oczywiście niedostępne. W proponowa-

nej wadze oś ramienia stanowią ostrza dwóch igieł do szycia. Takie prymitywne rozwiązanie zapewnia jednak wystarczającą dla amatora-chemika dokładność (rzędu $0,2 \pm 0,5$ g).

Załóżmy, że osie nie są równoległe (rys. 3), niech prawa szalka będzie zawieszona za pomocą dwu pasków (Na rysunku przedstawione są schematycznie jako linie l i m). Połóżmy na szalce jakiś przedmiot. Jeśli znajdzie się on bliżej paska l to jest on silnie naciągnięty a pasek m słabiej. Moment skręcający ramię w prawo obliczamy mnożąc siłę naciągającą pasek l przez długość osi OO' od linii działania tej siły (na rysunku odcinek $O'C'$) i dodając iloczyn siły naciągającej pasek m przez OC . Na rysunku $OC > O'C'$. Jeśli więc położymy przedmiot bliżej paska m to będzie on silnie naciągnięty i moment skręcający ramię w prawo zwiększy się. Tak więc równowaga ramienia zależy od położenia przedmiotu na szalce. Aby tego uniknąć oś BB' powinna być równoległa do osi OO' , na której jest zawieszono ramię. Przeprowadzając analogiczne rozumowanie dla lewej szalki dochodzimy do wniosku, że wszystkie 3 osie powinny być równoległe: $AA' \parallel BB' \parallel OO'$. Załóżmy że wszystkie 3 osie są równoległe (rys. 2). W warunkach równowagi moment skręcający ramię w lewo jest równy momentowi skręcającemu w prawo.

$P_1 l_1 = P_2 l_2$; podstawiając $P_1 = m_1 g$, $P_2 = m_2 g$ po uproszczeniu otrzymamy:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

Jeśli chcemy, aby przy równowadze masy były równe $m_1 = m_2$, to powinno być $l_1 = l_2 = l$ (długość półramion wagi powinny być równe).

Obieramy układ współrzędnych jak na rys. 4. W punkcie K (środek geometryczny prostokąta) znajdzie się środek ciężkości ramienia – można więc założyć, że w tym punkcie skupiona jest masa ramienia m_0 .

W punkcie B umieszczamy masę prawej szalki m_{01} i ważonego przedmiotu m_1 , a w punkcie A masę lewej szalki m_{01} i ważonego przedmiotu $m_1 + \Delta m$.

Jeśli dane są współrzędne 3 punktów A, B, K to, jak wiadomo z fizyki, współrzędne wypadkowego środka ciężkości określa się według wzorów:

$$x_G = \frac{m_A x_A + m_B x_B + m_K x_K}{m_A + m_B + m_K} \quad (4)$$

$$Y_C = \frac{m_A Y_A + m_B Y_B + m_K Y_K}{m_A + m_B + m_K} \quad (5)$$

podstawiamy wartości mas i współrzędnych:

$$\begin{aligned} X_A &= -1 & X_B &= 1 \\ Y_A &= 0 & Y_B &= 0 \\ m_A &= m_{01} + \Delta m & m_B &= m_{01} + m_1 \\ X_K &= 0 \\ Y_K &= d/2 \\ m_K &= m_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_A + m_B + m_K &= 2m_{01} + 2m_1 + m_0 + \Delta m \approx \\ &\approx 2m_{01} + 2m_1 + m_0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} X_C &= \frac{(m_{01} + m_1 + m)(-1) + (m_{01} + m_1)1}{m_0 + 2m_{01} + 2m_1} \approx \\ &= \frac{-\Delta m \cdot l}{m_0 + 2m_{01} + 2m_1} \end{aligned} \quad (7)$$

$$Y_C = \frac{-\frac{d}{2} m_0}{m_0 + 2m_{01} + 2m_1} \quad (8)$$

Jeśli jest spełniony warunek $m_{01} > m_0$ to można przyjąć $Y_C \approx 0$ (C leży na linii AB) co uprości dalsze obliczenia. Ramię wagi zawieszona w punkcie O zajmie takie położenie,

aby linia poprowadzona od punktu zawieszania O do środka ciężkości C była skierowana pionowo w dół (rys. 5).

Ponieważ $OF \perp OC$; $OE \perp OD$, więc:

$$\alpha = \angle EOF = \angle COD,$$

Od = d; zgodnie z obliczeniami:

$$\cos \alpha = \frac{\Delta m \cdot l}{m_0 + 2m_{01} + 2m_1} \quad (9)$$

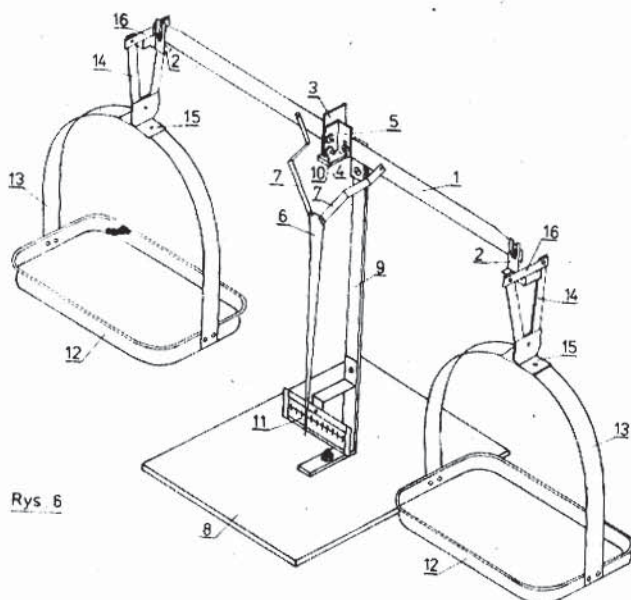
stąd

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{CD}{OD} = \frac{\Delta m \cdot l}{(m_0 + 2m_{01} + 2m_1) d} \quad (10)$$

Dla małego niezrównoważenia Δm można przyjąć $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$

$$\alpha \approx \frac{\Delta m \cdot l}{(m_0 + 2m_{01} + 2m_1) d} \quad (11)$$

Na rysunku 6 przedstawiony jest model wagi. Jako szalki zastosowane są dwie przykrywki blaszane (12). Brzegi ich są połączone kabłąkiem (13), do środkowej części kabłąka zaś przynitowano widełki (14) i blaszki (15). Cała szalka wisi na ostrzu sprężystej blaszki (16), która jest przynitowana do widełek. Ostrze to wchodzi do dwóch trójkąt-



Rys. 6

nych wycięć blaszki kształtowej (2) przykręconej do ramienia (1). Oś ramienia stanowią ostrza dwu igieł (4); wchodzi one w odpowiednie wgłębienia kątownika (10), który jest przykręcony do stojaka (9). Igiły przylutowane są do płytki (3), płytka zaś przykręcona jest do kątownika (5), który zamocowany jest do środkowej części ramienia.

Prostokątne otwory w ramieniu (rys. 7) i odpowiednie wycięcia w blaszkach kształtowych (rys. 9) i kątowniku (rys. 12) umożliwiają regulację położenia kątownika (5) i blaszek kształtowych (2) – a więc w ten sposób uzyskuje się regulację długości półramion wagi i wysokości zawieszenia szalek w stosunku do poziomu ostrzy igieł. Strzałka (6), za pomocą wygiętych blaszek (7), połączona jest z ramieniem. Blaszki (7) są luźno przynitowane do strzałki co umożliwi nieznacznie obrócić strzałkę (regulacja położenia zerowego).

Ramię (rys. 7) wycinamy z blachy grubości około 0,8 mm. Po wykonaniu otworów blachę zaginamy wzdłuż linii przerywanej w celu zwiększenia sztywności ramienia. Blaszki kształtowe wycinamy według rys. 8. Trójkątne wycięcia będą wyznaczały oś zawieszenia szalek – należy więc je wykonać starannie. Zaginamy wzdłuż linii przerywanych tak, aby otrzymać blaszkę jak na rys. 9. Następnie przygotujemy płytkę (rys. 10) i kątownik (5) przedstawiony na rys. 12. Otwory \varnothing 3 mm wywiercone w płytce (3) powinny pasować do odpowiednich otworów kątownika, gdyż podczas montażu płytka będzie skręcona z kątownikiem (rys. 13). Teraz do płytki przylutujemy 2 igły do szycia średniej wielkości (rys. 11). Lutowanie może sprawić trochę trudności. Aby igły nie przesunęły się, można nacisnąć na płytce pilnikiem iglakiem 2 równoległe rowki. Płytkę kładziemy na kawałku szkła lub porcelany, rowki po zwilżeniu chlorkiem cynku cynuemy; kładziemy na nie igły i lutujemy je lekko dociskając małym wkrętakiem. Zwracamy uwagę, aby igły były równoległe, a ich ostrza wystawały z płytki na jednakową odległość, około 5 mm. Oczywiście podczas lutowania trzeba zachować odpowiednio środki ostrożności (płytkę silnie nagrzewa się).

Kątownik (10) wykonamy z płaskownika długości 65 mm (rys. 14). Wgłębienia a, b będą stanowiły oparcie dla ostrzy igieł (oś wagi). Przykładając ostrza przylutowanych

poprzecznie igieł do kątownika zaznaczamy miejsca na te wgłębienia (tak, aby ich odległość była dokładnie równa odległości ostrzy). Po napunktowaniu ostrożnie wiercimy dwa wgłębienia głębokości 0,5–1 mm wiertłem \varnothing 2 mm.

Stojak (rys. 15) wykonamy z płaskownika grubości około 2,5 mm o długości 290 mm. Otworu „a” na razie nie wywiercimy (jego położenie zależy od długości strzałki).

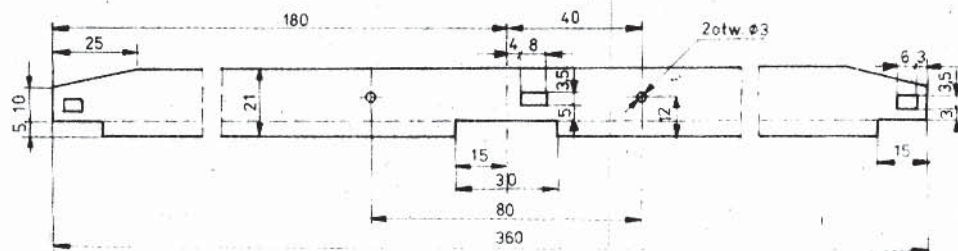
Podstawę wagi zrobimy z prostokątnego kawałka sklejk grubości 4 mm (orientacyjne wymiary 15 × 20 cm). Do podstawy przykręcimy stojak wkrętem M4 z łbem stożkowym – w środku podstawy wiercimy odpowiedni otwór. Do górnej części stojaka przykręcimy kątownik (10) wkrętem M4 z nakrętką.

Strzałkę zrobimy z cienkiej blachy (rys. 19), następnie wycinamy dwie blaszki (rys. 20), zaginamy je tak, jak na rys. 21 i luźno nitujemy aluminiowymi nitami \varnothing 2 mm do strzałki.

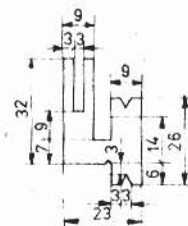
Wykonamy teraz skalę. W tym celu z cienkiej blachy (grubości około 0,3 mm) wytniemy blaszkę (rys. 16). Z blachy grubości 0,5 mm, lub z metalowej taśmy wytniemy drugą blaszkę (rys. 17) i zagniemy ją wzdłuż linii przerywanych. Na pasku kartonu (65 × 15 mm) narysujemy skalę. Karton kładziemy na szerszej blaszce, zaginamy ją wzdłuż linii przerywanych i mocno ściskamy kleszczami. Następnie obie blaszki nitujemy nitami aluminiowymi \varnothing 3 mm (rys. 18).

Płytkę (3) z igłami przykręcimy wkrętami M3 do kątownika (rys. 13), który przymocujemy do środkowej części ramienia. Natomiast na końcach ramienia przykręcimy blaszki (2) również wkrętami M3, ale z podkładkami. Ze względu na późniejszą regulację, zamiast zwykłych nakrętek lepiej zastosować tu nakrętki motylkowe.

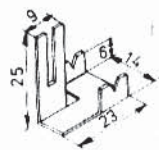
Na szalki można użyć 2 pokrywek od pudełek blaszanych, możemy też kupić małe podstawki do doniczek z tworzywa sztucznego, albo też wykonać samodzielnie szalki z cienkiej blachy. Ze względu na sposób zawieszenia ramię wagi nie powinno zbyt odchyłać się od poziomego położenia. Szalki powinny więc nisko wisieć (odległość od płaszczyzny, na której stoi waga do dolnej powierzchni szalki nie może przekraczać 4 cm, przy poziomym położeniu ramienia). W związku z tym wymiary kabłąka i widełek zależą od wymiarów szalki. Mając 2 pod-



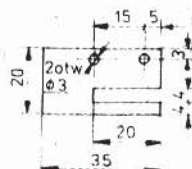
Rys 7



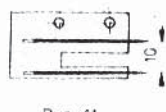
Rys 8



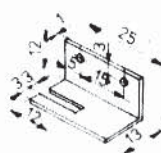
Rys 9



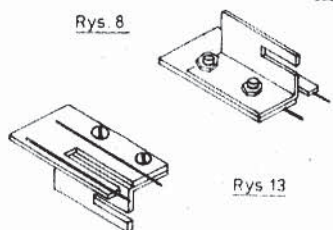
Rys 10



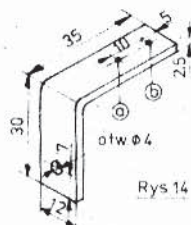
Rys 11



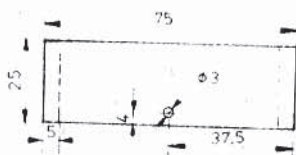
Rys 12



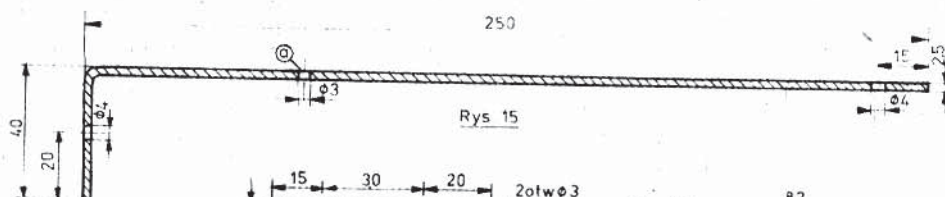
Rys 13



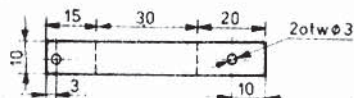
Rys 14



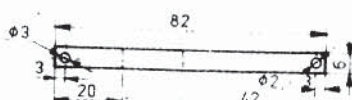
Rys 15



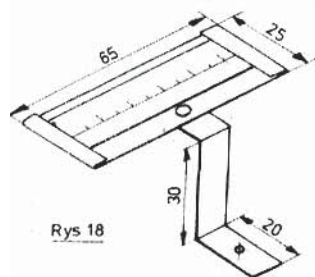
Rys 16



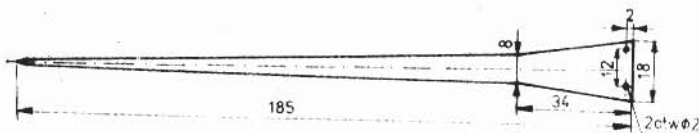
Rys 17



Rys 18



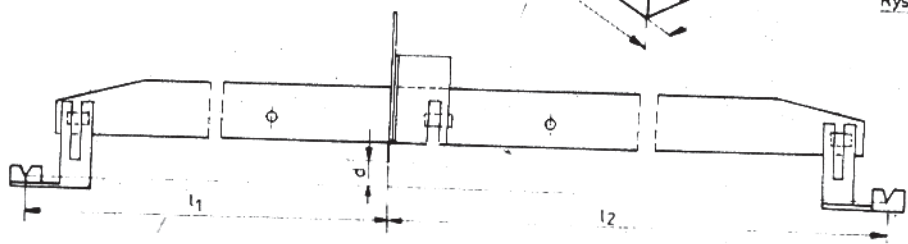
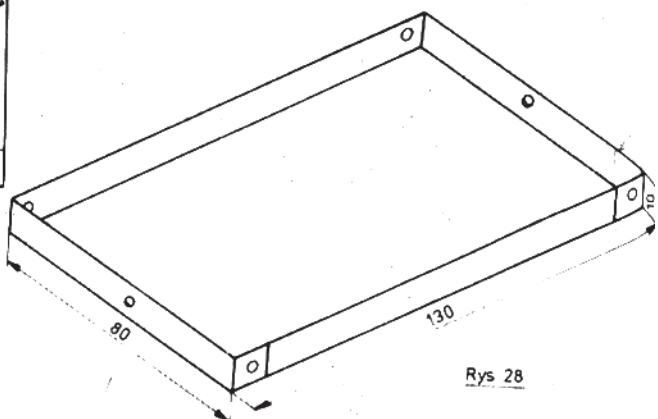
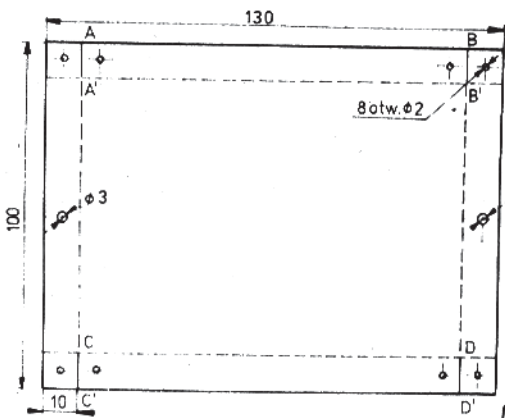
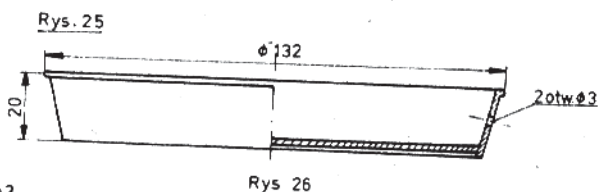
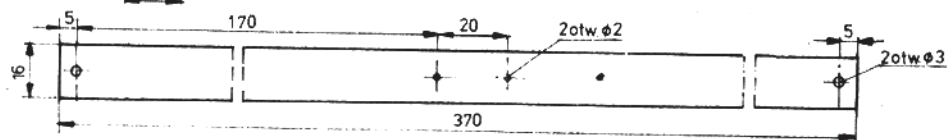
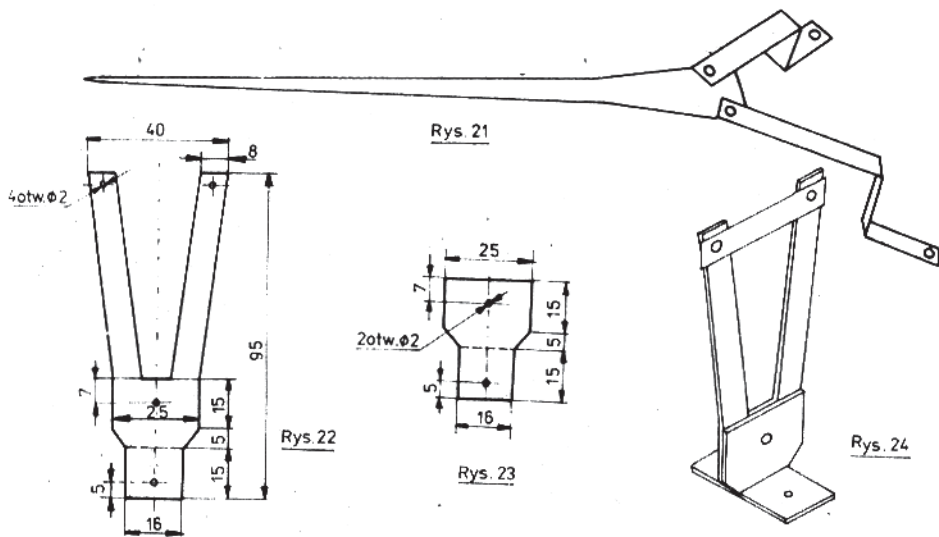
Rys 19



Rys 20

stawki do doniczek o średnicy 13 cm wywiercimy w ich powierzchni bocznej 2 otwory $\varnothing 3$ mm (rys. 26). Z taśmy metalowej szerokości około 16 mm wykonamy 2 kabłąki (rys. 25) i odpowiednio wyginając kabłąk przykręcimy jego końce do szalki wkrętami M3.

Możemy również wykonać szalki z cienkiej blachy grubości np. 0,3 mm. W tym celu wycinamy prostokąt (rys. 27), rozcinamy odcinki AA', BB', CC' i DD', zaginamy wzdłuż linii przerywanych i boki nitujemy nitami aluminiowymi $\varnothing 2$ mm (rys. 28). Następnie przynitujemy końce kabłąka (rys. 25).



Jeśli na szalki użyjemy blaszanych pokryw, to długość kabłąków zależy będzie od wymiarów szalek.

Widelki wytniemy według rys. 22 z blachy grubości 0,5 mm, lub cieńszej. Długość widełek została dopasowana do opisanych szalek – jednak przed przynitowaniem ich do kabłąka lepiej sprawdzić wysokość zawieszania szalek. Następnie wytniemy blaszkę wzmacniającą widelki (rys. 23), zagniemy ją, oraz widełki wzdłuż linii przerywanych i przynitujemy blaszkę do widełek (rys. 24).

Sprężyste blaszki zrobimy z kawałka płaskiej sprężyny, np. od starego budzika. Najpierw lekko zeszlifujemy ich środki tak, aby otrzymać ostrze. Po odłamaniu kawałków sprężyny o odpowiedniej długości, ich końce wyżarzamy, przebijemy w nich otwory i przynitujemy do widełek (rys. 24) tak, aby ostrze było skierowane do środka. Gotowe widełki nitujemy do środkowej części kabłąka (rys. 6).

Po zakończeniu montażu wagi możemy zabrać się do jej regulacji. Przed tym jednak odmierzymy linijką odległości l_1 i l_2 (rys. 29) i przesuwamy blaszki kształtowe w ten sposób, aby te odległości były równe. Odległość d powinna wynosić 1–3 mm. Przy mniejszej odległości d dokładność wagi będzie większa, ale trudniej będzie zrównoważyć ramię. Kątownik (5) powinien być prostopadły do ramienia.

Ustawiając ramie w położenie poziome zawieszamy szalki na wycięciach blaszek kształtowych, a ostrza igieł wstawiamy do wgłębień kątownika (10). Kładąc na szalki drobne przedmioty równoważymy wagę. Jeśli ostrze blaszki sprężystej opiera się tylko na jednym wycięciu blaszki kształtowej, to zdejmujemy ramie i odpowiednio odginamy blaszkę kształtową. Powtórnie ustawiamy ramie, zawieszamy szalki i równoważymy wagę. Obserwujemy ostrza igieł. Jeśli tylko jedno ostrze wchodzi we wgłębienie a drugie jest podniesione do góry, wyginamy lekko środek ramienia (podniesiona igła powinna być po wklęsłej stronie zagęścia). Gdy już oba ostrza igieł leżą we wgłębieniach zdejmujemy ramie i wkretami M3 lekko przykręcamy blaszki (7) połączone ze strzałką. Ustawiamy położenie szalki i po wywierceniu otworu w stojaku (a – na rys. 15) przykręcamy skalę. Strzałkę odpowiednio wyginamy tak,

Spis części i materiałów

Lp.	Nazwa części	Materiał (wymiar w mm)	szk.	nr rys.
1	Ramię	bl.st. ∇ 0,8	1	7 i 29
2	Blaszka kształtowa	bl.st. ∇ 0,8	2	9
3	Płyta	bl.st. ∇ 1	2	10
4	Igła	stal	2	11 i 13
5	Kątownik	bl.st. ∇ 1	1	12
6	Strzałka	bl.st. ∇ 0,3	1	19 i 21
7	Blaszka	bl.st. ∇ 0,5	1	20 i 21
8	Podstawa	sklejka ∇ 4 15 x 20 cm	1	6
9	Stojak	plastownik st. 12 x 2,5	1	15
10	Kątownik	plastownik st. 12 x 2,5	1	14
11	Skala	bl.st.	1	18
12	Szalka	bl.st.	2	27 i 28
13	Kabłąk	taśma st. 16 x 0,5	2	25
14	Widelki	bl.st. ∇ 0,5	2	22
15	Blaszka	bl.st. ∇ 0,5	2	23
16	Blaszka sprężysta	sprężyna płaska	2	24
17	Szalka	tworzywo sztuczne	2	26
18	Wkręt M3	stal	8	
19	Nakrętka M3	stal	5	
20	Nakrętka M3 motylkowa	stal	3	
21	Podkładka do nakr. M3	stal	3	
22	Wkręt M4	stal	1	
23	Wkręt M4 z łbem stożkowym	stal	1	
24	Nakrętka M4	stal	2	
25	Nit aluminiowy \varnothing 2			
26	Nit aluminiowy \varnothing 3			

aby przechodziła w niewielkiej odległości od skali, nie dotykając jej. Równoważymy wagę, a strzałkę ustawiamy w położeniu zerowym.

Następnie wstawiamy na obie szalki 2 jednakowe odważniki, np. po 100 g. Jeśli np. prawa szalka przechyli się w dół, to prawe półramie jest za długie. Zdejmujemy więc ramie, nieznacznie przesuwamy blaszki kształtowe, znów równoważymy wagę itd. Regulacja wymaga cierpliwości. Po jej zakończeniu mocno dokręcamy wkretu mocujące blaszki kształtowe i kątownik (5) tak, aby nie uległy one przesunięciu.

W modelu wykonanym przez autora 100,5 g na lewej szalce równoważy się z 100 g na prawej (błąd ważenia 0,5%). Przy pustych szalkach 0,2 g odchyła położenie równowagi strzałki o około 1,5 cm. Dla porównania – fabryczne wagi laboratoryjne mają dokładność 10 mg, natomiast wagi analityczne 0,1 mg.

Józef Zieliński