

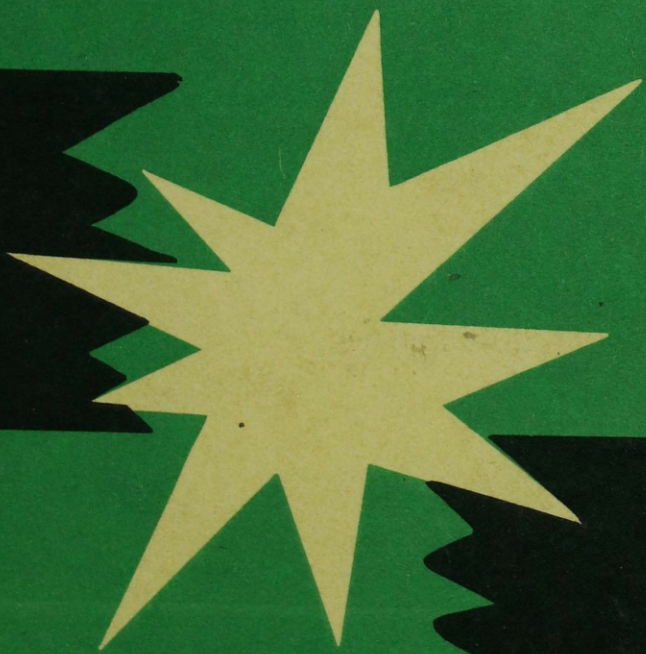
Grey Scale #13



A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



# MECHANICZNE DZIAŁANIE WYBUCHU NA ELEMENTY KONSTRUKCJI



J. MAKAREWICZ

J. RUTKOWSKI



Colour Chart #13

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Inches 1 2 3 4 5 6 7 8  
Centimetres 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19



**MECHANICZNE DZIAŁANIE  
WYBUCHU NA ELEMENTY  
KONSTRUKCJI**

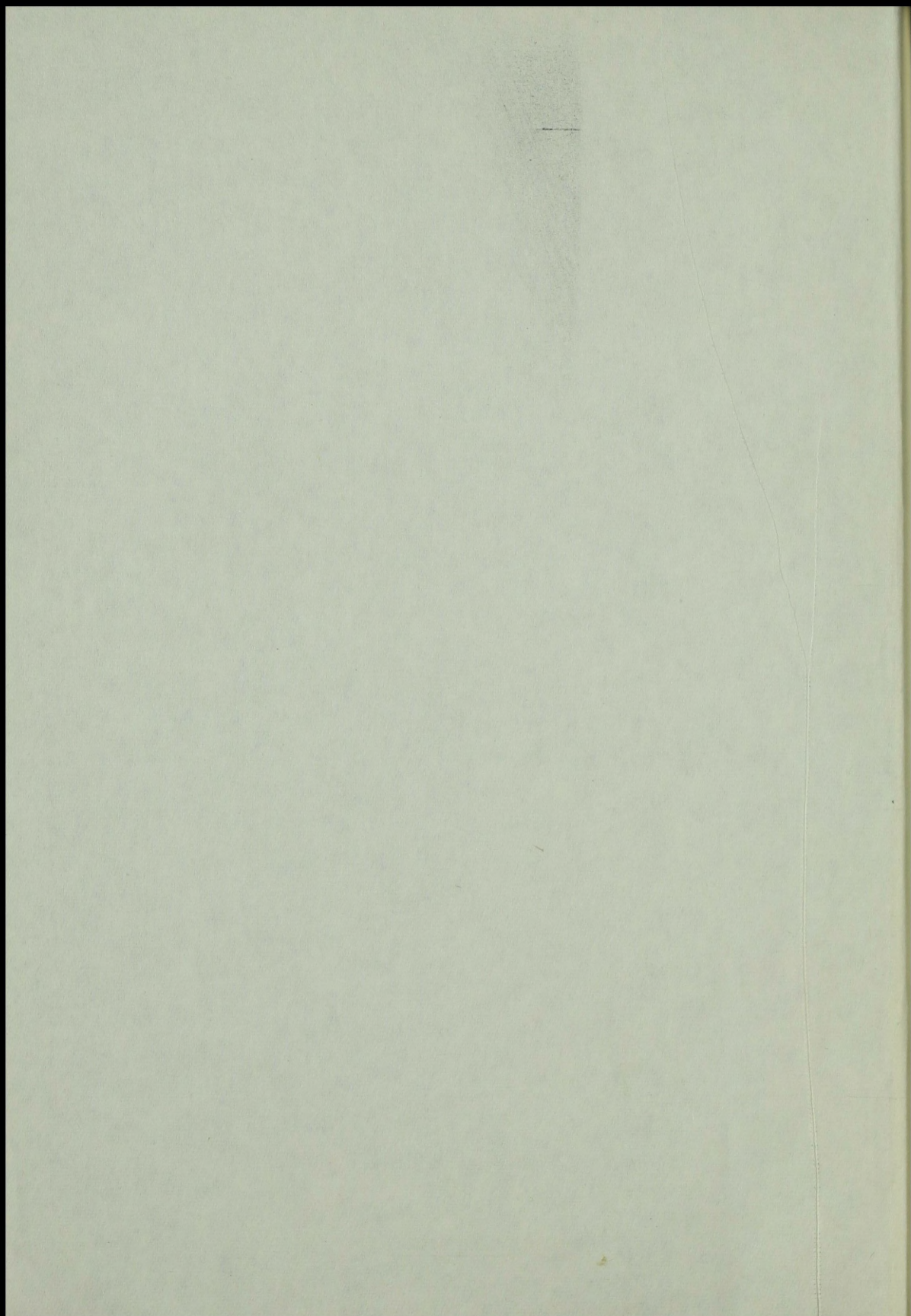


**J. MAKAREWICZ**

**J. RUTKOWSKI**

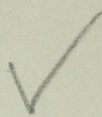
MECHANICZNE DZIAŁANIE WYBUCHU  
NA ELEMENTY KONSTRUKCJI

WARSZAWA 1973



WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA  
im. Jarosława Dąbrowskiego

---



Józef Makarewicz \* Jerzy Rutkowski

# MECHANICZNE DZIAŁANIE WYBUCHU NA ELEMENTY KONSTRUKCJI

WARSZAWA - 1973

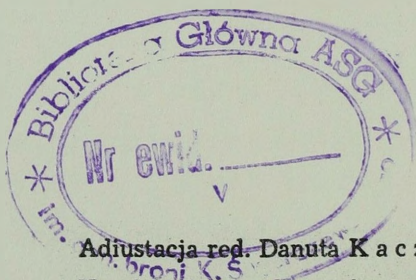
Opiniodawcy:

płk doc. dr inż. Zbigniew Palkij-Grechowicz

ppłk mgr inż. Bronisław Hukało

26067

Okładkę projektowała Maria Boczkowska



Adjustacja red. Danuta Kaczmarczyk

Korekta Danuta Paszkowska

---

Wykonano w Wydziale Wydawniczym WAT. Nakład 105 + 25 egz.  
Format A-5. Papier offset. kl. III 70 g. Rękopis oddano do druku  
dnia 24 VIII 1973 r. Druk ukończono w październiku 1973 r.  
OW-VI-10736 zam. nr 188/S/73.

## S P I S   T R E Ś C I

|  |    |
|--|----|
| Wstęp.....   | 7  |
| Rozdział 1. DYNAMICZNE WŁAŚCIWOŚCI NIEKTÓRYCH MATERIA-<br>LÓW BUDOWLANYCH .....                              | 9  |
| 1.1. Drewno .....  | 13 |
| 1.2. Metale .....  | 17 |
| 1.3. Beton .....   | 20 |
| 1.4. Żelbet .....  | 22 |
| Rozdział 2. DZIAŁANIE WYBUCHU ŁADUNKÓW KONTAKTOWYCH MA-<br>TERIAŁU WYBUCHOWEGO NA ELEMENTY KONSTRUKCJI ..... | 24 |
| 2.1. Impuls jednostkowy i impuls pełny .....   | 29 |
| 2.2. Prędkość cząsteczek niszczonej przegrody .....  | 34 |
| 2.3. Prędkość krytyczna .....  | 36 |
| 2.4. Wzory obliczeniowe .....  | 37 |
| 2.4.1. Wzory obliczeniowe dla kontaktowych ładunków<br>wydłużonych .....                                     | 39 |
| 2.5. Charakter niszczenia i współczynnik $\chi$ .....  | 40 |
| Rozdział 3. DZIAŁANIE WYBUCHU ŁADUNKÓW MATERIAŁU WYBUCHO-<br>WEGO Z ODLEGŁOŚCI NA ELEMENTY KONSTRUKCJI ..    | 42 |
| 3.1. Niszczenie elementów konstrukcji z materiałów kru-<br>chych .....                                       | 42 |
| 3.2. Niszczenie elementów konstrukcji z materiałów cią-<br>gliwych .....                                     | 48 |
| 3.2.1. Ładunek kulisty .....   | 53 |
| 3.2.2. Ładunek wydłużony w kształcie walca .....   | 54 |
| 3.2.3. Ładunek wydłużony w kształcie walca umieszczony<br>równolegle do osi belki .....                      | 55 |
| 3.3. Niszczenie elementów konstrukcji z materiałów nie-<br>jednorodnych .....                                | 58 |
| 3.3.1. Wybijanie betonu z elementów żelbetowych .....  | 59 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.3.2. Określenie ciężaru kulistego ładunku materiału<br>wybuchowego .....                                   | 63  |
| 3.3.3. Określenie ciężaru wydłużonego ładunku ma-<br>teriału wybuchowego .....                               | 64  |
| 3.3.4. Wybijanie betonu z elementów żelbetowych z<br>założonym odkształceniem stali zbrojeniowej ..          | 71  |
| 3.3.5. Przebijanie elementów żelbetowych .....   | 74  |
| Rozdział 4. BEZPIECZNE ŁADUNKI .....   | 80  |
| 4.1. Bezpieczne ładunki kontaktowe .....   | 80  |
| 4.2. Technika określania bezpiecznych odległości i bez-<br>piecznych ładunków przy wybuchu w powietrzu ..... | 85  |
| 4.2.1. Bezpieczne odległości i bezpieczne ładunki przy<br>wybuchu skupionych ładunków w powietrzu .....      | 87  |
| 4.2.2. Bezpieczne odległości i bezpieczne ładunki przy<br>wybuchu wydłużonych ładunków w powietrzu .....     | 88  |
| Rozdział 5. PRZYKŁADY OBLICZEŃ DZIAŁANIA WYBUCHU ŁADUN-<br>KÓW KONTAKTOWYCH I Z ODLEGŁOŚCI .....             | 90  |
| 5.1. Działanie skupionych ładunków kontaktowych .....  | 90  |
| 5.2. Działanie wydłużonych ładunków kontaktowych .....   | 93  |
| 5.3. Działanie ładunku kontaktowego .....  | 95  |
| 5.4. Działanie ładunków z odległości .....   | 96  |
| 5.5. Niszczenie elementów betonowych i żelbetowych .....   | 101 |
| 6. Tabele .....  | 105 |
| LITERATURA .....   | 113 |

## WSTĘP

W niniejszym skrypcie podane są w sposób syntetyczny materiały pozwalające z dostateczną dla praktyki dokładnością rozwiązywać niektóre zadania i problemy inżynierskie, związane z niszczeniami.

Skrypt zawiera krótką charakterystykę dynamicznych właściwości niektórych materiałów oraz metody wyznaczania mechanicznego działania wybuchu na elementy konstrukcji. Przytoczone w końcowej części skryptu przykłady rozwiązanych zadań pozwolą Czytelnikowi na lepsze zrozumienie zagadnień związanych z niszczeniami.

Dla ułatwienia techniki obliczeń podano niezbędne tabele wartości parametrów niektórych materiałów budowlanych i materiałów wybuchowych.

Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page. The text is arranged in several paragraphs and is mostly centered horizontally. A small red mark is visible near the top center of the page.

## Rozdział 1.

### DYNAMICZNE WŁAŚCIWOŚCI NIEKTÓRYCH MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

Dynamiczne obciążenie generowane wybuchem ładunku materiału wybuchowego w odróżnieniu od statycznego jest krótko - trwałe i zmienne w czasie.

Dla gazowych produktów wybuchu można w przybliżeniu przyjąć, że ciśnienie na przegrodę zmienia się w czasie według wzoru

$$p = p_f \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^{\gamma-1}$$

gdzie:  $p_f$  - maksymalne ciśnienie cząsteczek gazu;

$\tau$  - czas działania obciążenia na przegrodę.

Wartości te określone są wzorami

$$p_f = p_o \left(\frac{R_o}{r}\right)^{\gamma-1} \cos^2 \alpha$$

$$\tau = \left(\frac{1}{w} + \frac{1}{u_o}\right) R_o$$

$$w = \frac{p_o}{\rho_o u_o} ; \quad u_o = \sqrt{2gQ\varepsilon}$$

gdzie:  $\rho_o$  - gęstość materiału wybuchowego;

$w$  - prędkość przemieszczania powierzchni rozlotu;

- $u_0$  - prędkość cząsteczek na powierzchni ładunku;
- $p_0$  - ciśnienie na powierzchni ładunku;
- $R_0$  - promień ładunku;
- $Q$  - jednostkowa energia reakcji chemicznej;
- $\nu$  - wykładnik potęgi (dla ładunku kulistego  $\nu = 3$ ; wal-cowego  $\nu = 2$ ; płaskiego  $\nu = 1$ ).

Zmiana ciśnienia podczas działania powietrznej fali ude-rzeniowej na przegrodę posiada złożony charakter, jednakowoż w przybliżeniu może być przedstawiona w postaci wzoru

$$p = p_f \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^n$$

- gdzie:  $p_f$  - ciśnienie na czole fali uderzeniowej;  
 $\tau$  - czas działania fazy nadciśnienia;  
 $n$  - wykładnik potęgowy przyjmowany w zależności od intensywności działania fali w przedziałach od 1 + 5 i więcej lub  $n = 1,9 \sqrt{\Delta p_f}$ .

Orientacyjny czas działania fazy nadciśnienia przy wy-buchu kulistych ładunków działających w powietrzu może być określony wzorem

$$\tau = 10^{-3} \sqrt[6]{C} \sqrt{r} \quad [\text{sek}]$$

Jak wynika z podanych zależności, czas działania wybu - chowego obciążenia wywołanego wybuchem MW jest bardzo krótki, rzędu tysięcznych części sekundy, natomiast przy wybuchu ładunków jądrowych czas ten jest większy, rzędu dziesiątych części sekundy lub sekund. Zgodnie z przyjętą w mechanice bu-dowli klasyfikacją, wszystkie obciążenia działające na kons-trukcje w czasie, przy znacznym wzroście sił bezwładności, za-liczone są do obciążeń dynamicznych, które z kolei dzielą się na okresowe i nieokresowe, długo-i krótkotrwałe.

Podane właściwości obciążeń wybuchowych pozwalają na za-szeregowanie ich do krótkotrwałych nieokresowych obciążeń dy-namicznych.

Charakter oddziaływania obciążenia wybuchowego jest pod wieloma względami podobny do obciążenia uzyskiwanego przy uderzeniu z dużą początkową prędkością twardego ciała o przegrodę.

Różnica między obu obciążeniami polega na tym, że przy obciążeniu wybuchowym masa elementu obciążanego praktycznie się nie zmienia, podczas gdy przy udarowym obciążeniu masa elementu wzrasta o wielkość masy udarowej. Wyjątkiem są tu elementy rozmieszczone w wodzie i gruntach, ze względu na współmierność gęstości elementu i ośrodka.

Różnica ta uwidacznia się przy konieczności względnie - nia sił bezwładności, które są proporcjonalne do wielkości masy.

W związku z tym należy stwierdzić, że elementy konstrukcji przy obciążeniu dynamicznym będą się zachowywać inaczej jak przy obciążeniu statycznym.

Doświadczenia wykazują, że i charakterystyki wytrzymałościowe tego samego materiału poddanego obciążeniu statycznemu i dynamicznemu są różne.

Przeprowadzone w tym zakresie badania wykazały, że wytrzymałość materiałów w przypadku szybko zmieniających się odkształceń różni się od wytrzymałości statycznej z wolno zachodzącymi odkształceniami.

Dynamiczne moduły sprężystości metali oraz ciał stałych, sprężystych o strukturze krystalicznej, bardzo mało różnią się od wartości statycznych. Oznacza to, że w przypadku sprężystych odkształceń ciał stałych, wpływ prędkości odkształcenia jest niewielki. W ciałach organicznych o dużych cząsteczkach, takich jak guma, masy plastyczne, wysokie polimery, a także w cieczach przechłodzonych (szkło, asfalt), wpływ prędkości odkształcenia jest znaczny już w zakresie sprężystym.

Przy zwiększeniu prędkości odkształceń granica plastyczności rośnie, przy czym wzrost ten jest szczególnie wyraźny w materiałach o dokładnie określonej granicy plastyczności, na przykład w żelazie lub niskowęglowej stali.

Wytrzymałość doraźna na rozciąganie oraz naprężenia niszczące zależą od prędkości przebiegu odkształceń i rosną ze zwiększeniem prędkości. Przy niszczeniu materiału z dużą prędkością odkształcania wielkość odkształceń plastycznych jest na ogół mniejsza niż przy niszczeniu w takich samych warunkach z mniejszą prędkością. Wynika z tego, że zmienia się postać krzywej całego odcinka, gdzie materiał pracuje w zakresie odkształceń plastycznych.

Jeżeli wywołać nagle naprężenie, przewyższające statyczną granicę plastyczności, płynięcie nie nastąpi od razu, lecz po upływie pewnego czasu, który zależy od wielkości naprężeń i własności materiału (opóźnienie plastyczne).

Przy nagłym wywołaniu naprężenia przewyższającego doraźną wytrzymałość statyczną, zniszczenie następuje po upływie pewnego czasu (wytrzymałość trwała).

Jakkolwiek wpływ prędkości odkształcenia na wytrzymałość materiału jest znany, dokładny mechanizm jego działania dotychczas nie został dostatecznie zbadany. Sprężystemu odkształceniu ciał stałych nie towarzyszą istotne, nieodwracalne zmiany w strukturze krystalicznej materiału. Zachodzi tylko zmiana odległości między cząsteczkami przy równoczesnej zmianie pola sił wzajemnego oddziaływania, ale względne rozmieszczenie cząsteczek jest w zasadzie zachowane. Wpływ prędkości odkształcenia w tym przypadku nie jest więc sprawą istotną. W związkach o dużych cząsteczkach, na przykład w polimerach typu gumy, przejście od nieuporządkowanego rozmieszczenia cząsteczek o największej entropii do bardziej uporządkowanego ze zmniejszoną wartością entropii wymaga pewnego okresu czasu.

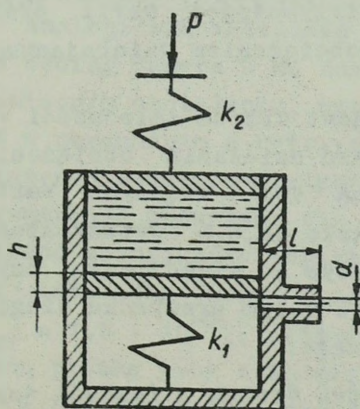
Przy bardzo dużej prędkości przebiegu odkształceń ważny jest wpływ wzajemnego oddziaływania pomiędzy atomami każdej cząsteczki oraz wzajemne oddziaływanie wzdłuż linii lokalnych wiązań między cząsteczkami, natomiast składowa odkształcenia, która jest wywołana zmianą entropii na skutek relaksacji może być pominięta.

Odształceniom plastycznym towarzyszą nieodwracalne zmiany w strukturze materiału. Mogą to być przemieszczenia nieprawidłowości struktury, na przykład dyslokacja - przemieszczania cząsteczek na skutek termodyfuzji, albo dowolny proces związany ze znacznym przemieszczeniem cząsteczek względem siebie w pewnej skończonej objętości, co wymaga określonego czasu. Zrozumiałe więc jest, że przy dużej prędkości odkształcenia, realizacja wymienionych procesów nie nadąża za odkształceniem, które wobec tego powstaje w znacznej mierze w wyniku sprężystej zmiany odległości między cząsteczkami, podczas gdy przy małej prędkości odkształcenia spowodowałyby przemiany nieodwracalne.

### 1.1. Drewno

Drewno posiada dość złożoną organiczną strukturę skła - dającą się z dwóch zasadniczych części: elastycznych włókien i miazgi wypełniającej przestrzeń między włóknami.

Przy wolno przyłożonym obciążeniu na element drewniany, włókna elastyczne przejmują niemalże całe obciążenia na siebie. Na schemacie modelu materiału sprężysto-plastycznego rolę włókien spełniają sprężyny  $k_1$  i  $k_2$ .



Rys.1.1. Schemat modelu ciała sprężysto-plastycznego

Miazga w tym układzie jest w stanie przyjąć tylko pewną część szybko przyłożonego obciążenia. W związku z tym przy odpowiednio szybkim obciążeniu drewna, pracują nie tylko włókna ale i wypełniająca je miazga. W miarę zwalniania procesu obciążenia miazga traci właściwości wytrzymałościowe i wyłącza się z pracy, a obciążenia w pełni przejmuje na siebie szkielet włóknisty.

Miazgę w schemacie modelu ciała sprężysto-plastycznego obrazuje ciecz zawarta między tłokami.

Należy mieć na uwadze to, że procesy zachodzące w drewnie przy jego obciążeniu są bardziej złożone niż jak to pokazano na schemacie modelu ciała sprężysto-plastycznego.

Elastyczne właściwości drewna zależą od stanu w jakim ono się znajduje, a w pierwszym rzędzie od stanu miazgi. W normalnych warunkach temperaturowych i niedużej wilgotności, drewno posiada ograniczone właściwości elastyczne, ponieważ miazga będąca wypełniaczem jest w stanie kruchym. Przy podwyższeniu temperatury i wilgotności wypełniacz (miazga) rozmiękcza się i drewno staje się elastyczne.

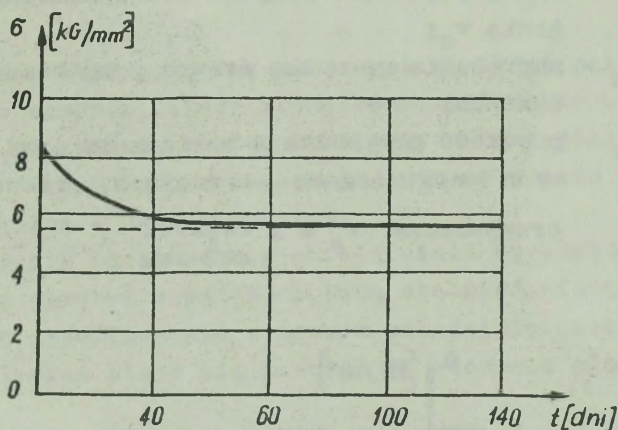
W związku z pewnymi właściwościami budowy drewna, odkształcenia wywołane obciążeniem zewnętrznym mogą przebiegać w różny sposób. Przy stosunkowo niedużych stałych obciążeniach, powstające odkształcenia stopniowo zanikają i cały system powraca do równowagi. Przekroczenie pewnego określonego przedziału obciążenia dla danego drewna powoduje odkształcenia trwałe i zniszczenie elementu.

Graniczne naprężenie, poniżej którego element wytrzymałoby obciążenie dowolnie długi okres czasu, nazwano długotrwałą wytrzymałością drewna. Przedziałem tym jest prosta, do której asymptotycznie zbliża się krzywa charakteryzująca zależność granicznych przedziałów wytrzymałości serii próbek znajdujących się pod długotrwałym obciążeniem działającym aż do momentu ich zniszczenia.

Na rysunku 1.2 przedstawiona jest krzywa zależności wytrzymałości drewna sosnowego od czasu działania obciążenia. Asymptota tej krzywej odcina na osi rzędnych wartość  $\sigma = 5,4 \text{ kg/mm}^2$ , co stanowi około 64,5 % wytrzymałości otrzymanej przy obciążeniu działającym ze standardową szybkością. Wartość  $\sigma = 5,4 \text{ kg/mm}^2$  jest w tym przypadku długo-trwałą wytrzymałością drewna sosnowego.

Przy rozpatrywaniu wytrzymałości drewna w funkcji szybkości obciążenia okazuje się (patrz rys.1.3), jak należało te-

go oczekiwać, że ze wzrostem szybkości obciążenia wytrzymałość drewna podwyższa się, rośnie moduł  $E$  i granica sprężystości materiału  $\sigma_s$ .



Rys.1:2. Zależność wytrzymałości drewna sosnowego od czasu działania obciążenia

Wyrażna różnica w zależności  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  uwidacznia się przy standardowych szybkościach obciążenia i przy długotrwałym obciążeniu elementu.

Analogiczną zależność obserwuje się i przy rozciąganiu.

Według danych E.M. Znamieńskiego, dla suchej sosny, przy dynamicznym obciążeniu, wytrzymałość na zginanie wzrasta o 25 % w porównaniu z wytrzymałością jaką obserwuje się przy obciążeniu powolnym-statycznym, natomiast przy rozciąganiu, wytrzymałość podwyższa się tylko o 5 %. Znamieński podaje, że wielkość granicznego odkształcenia przy zginaniu udarowym jest taka jak przy standardowych statycznych badaniach ( $\epsilon_{gr} = 7,5 \cdot 10^{-3}$ ), natomiast praca jednostkowa niszcząca badaną próbkę przy zginaniu udarowym zwiększa się o 55 %.

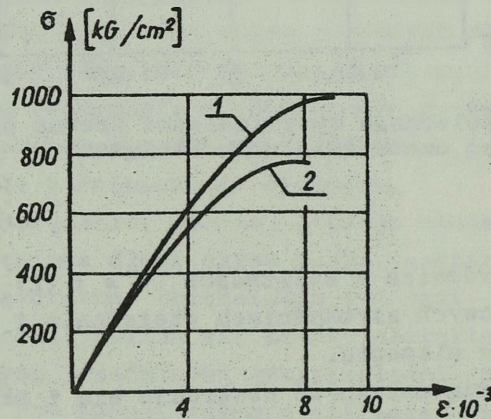
W.P. Dutow poleca niżej podany wzór do określenia ilościowych zmian charakterystyki wytrzymałościowej drewna w zależności od prędkości przyłożenia obciążenia  $v_u$ .

$$R_d = R_n \left( 1 + 0,1 \log \frac{v_u}{v_s} \right)$$

gdzie:  $R_d$  - obliczeniowa (normalna) wytrzymałość dla odpowiedniej prędkości przyłożenia dynamicznego obciążenia  $v_u$ ;

$R_n$  - naprężenia normalne drewna przy standardowych badaniach;

$v_s$  - prędkość przyłożenia obciążenia przy standardowych statycznych badaniach, przeważnie jest przyjmowana  $v_s = 1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2 \text{ sek}}$ .



Rys.1.3. Wpływ prędkości obciążenia na charakter funkcji  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  dla sosny przy rozciąganiu; 1-szybkie obciążenie przy badaniach na prasie; 2-krzywa zależności  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  przy wolnym obciążeniu

Ponieważ prędkość narastania obciążenia przy badaniach dynamicznych waha się w granicach

$$v_u = (10^2 + 10^5) \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2 \text{ sek}}$$

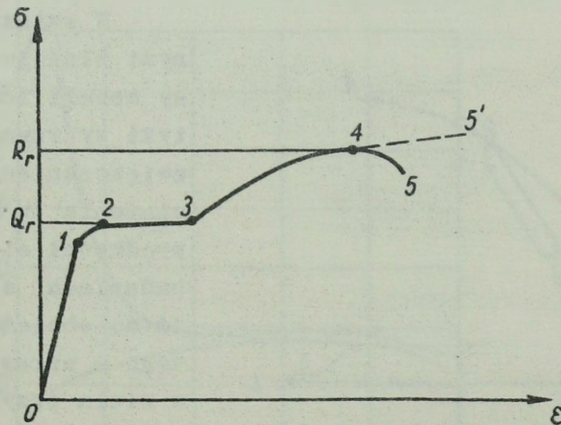
to ze wzoru podanego przez Dutowa wynika, że normalna wytrzymałość w tym przypadku będzie  $1,2 + 1,5$  razy większa od wytrzymałości jaką uzyskuje się przy badaniach standardowych.

## 1.2. Metale

Metale charakteryzują się złożonymi siatkami polikrystalicznymi. Do momentu, kiedy zewnętrzne obciążenie nie przekroczy pewnej wielkości, siatka krystaliczna pozostaje nie naruszona i w związku z tym zachowana jest zależność liniowa między obciążeniem a odkształceniem.

Opierając się na schemacie modelu ciała sprężysto-plastycznego, rolę sprężyn w metalach będą spełniać siatki krystaliczne. Przy przekroczeniu w pewnym przedziale obciążenia, siatka krystaliczna staje się podobna do elementu plastycznego.

Etapy pracy siatki krystalicznej przedstawione są na rys.1.4, gdzie odcinek (0 - 1) stanowi zakres odkształceń sprężystych, odcinek krzywej (2 - 3) jest granicą plastyczności, natomiast na odcinku (3 - 4) następuje wzmocnienie materiału.



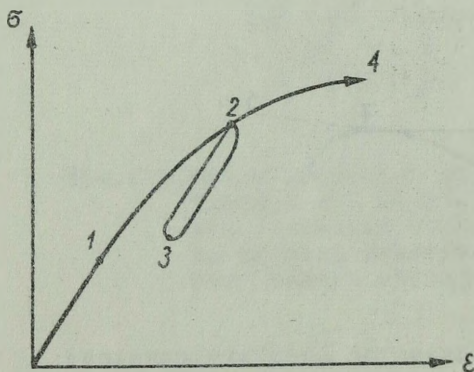
Rys.1.4. Przykładowy wykres rozciągania stali miękkiej: 0-1-strefa odkształceń sprężystych; 1-granica sprężystości; 1-2-strefa przejściowa; 2-3-granica plastyczności; 3-4-strefa wzmocnienia materiału; 4-granica wytrzymałości; 4-5-strefa miejscowego płynięcia materiału i niszczenia badanej próbki materiału

Stanu materiału za punktem (3) nie można w sposób prosty pokazać na ekwiwalentnym schemacie ciała sprężysto-plastycznego. Na odcinku krzywej (3-4) razem ze wzrostem naprężeń wzrastają odkształcenia. W punkcie (4) następuje miejscowe płynięcie materiału, tworzy się tzw. szyjka i w tym miejscu badana próbka jest zniszczona. Na odcinku (4-5) następuje spadek naprężeń, chociaż faktycznie działające naprężenia w badanej próbce rosną, biorąc pod uwagę siły przypadające na zmniejszającą się powierzchnię poprzecznego przekroju.

Opisana zależność  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\varepsilon)$  na rys.1.4 odnosi się do stali miękkich i brązu.

Dla większości innych metali, wyraźnej granicy między strefą sprężystości i granicą plastyczności praktycznie wykazać nie można. W tych materiałach siatka polikrystaliczna jest niedoskonała i ta niedoskonałość jest tym większa, im mniejsze są kryształy. Dlatego tym materiałom podaje się umowną granicę sprężystości, pomijając pewne odkształcenia nieprzekraczające założonego przedziału.

Przykładowy wykres rozciągania takich materiałów może być zilustrowany jak rys.1.5.

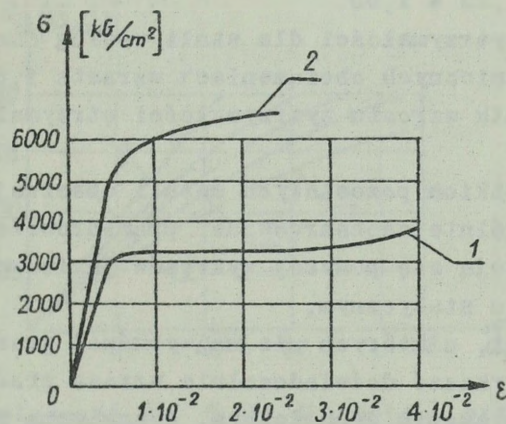


Rys.1.5. Przykładowy wykres rozciągania metalu z umowną granicą sprężystości: 1-umowna granica sprężystości, pętla histerezy; 2-3-krzywa odciążenia; 3-2-krzywa obciążenia (równoległa od 0-1)

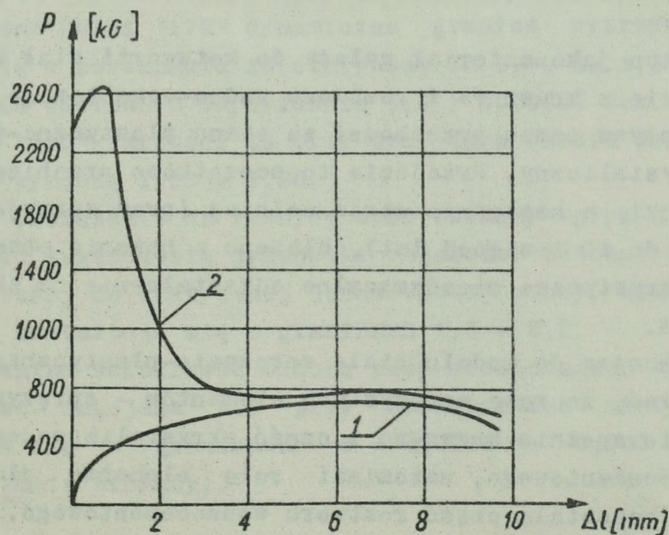
W związku z wykazami -nymi właściwościami budowy metali ich charakterystyki wytrzymałościowe ze zwiększeniem prędkości obciążenia (w porównaniu do prędkości stosowanych przy badaniach standardowych) aż do obciążenia wybuchowego - wzrastają, przy tym w wielu przypadkach może zmieniać się także i charakter wykresu  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\varepsilon)$ .

Na rys. 1.6 i 1.7 przytoczone są wykresy

rozciągania miękkiej stali przy obciążeniach statycznych i udarowych. Z wykresów tych wynika, że dla stali miękkiej (patrz rys.1.6) granica plastyczności w przypadku obciążenia udarowego wzrasta prawie dwukrotnie.



Rys.1.6. Wykres rozciągania próbek miękkiej stali według badań R. Nadziejewoja: 1- przy badaniach statycznych; 2- w warunkach obciążenia udarowego przy szybkości uderzenia 44 + 48 m/sec



Rys.1.7. Wykresy rozciągania stali miękkiej według Odinga: 1- przy statycznych badaniach; 2- przy obciążeniu udarowym

Dla stali posiadającej  $0,08 + 0,8\%$  węgla według danych N.N.Dawidienkova dynamiczna granica plastyczności w porównaniu do statycznej wzrasta  $1,2 + 1,43$  razy. Według danych z innych eksperymentów dla takich stali stosunek ten waha się w przedziale  $1,23 + 1,90$ .

Granica wytrzymałości dla stali według danych Dawidienkova przy dynamicznych obciążeniach wzrasta 1,5 raza. Taki sam współczynnik wzrostu wytrzymałości otrzymali amerykańscy uczeni.

Dla wszystkich pozostałych metali obserwuje się podobne zależności. Ogólnie zaobserwowane prawidłowości: wykresy dynamiczne znajdują się powyżej wykresów jakie otrzymuje się przy obciążeniu statycznym.

Dla metali, u których nie ma wyraźnej granicy plastyczności, można wykazać doświadczalnie wzrost granicy wytrzymałości przy obciążeniu dynamicznym. Dynamiczna granica wytrzymałości dla aluminium przewyższa 1,2 a dla miedzi 1,3 razy granicę wytrzymałości przy obciążeniach statycznych.

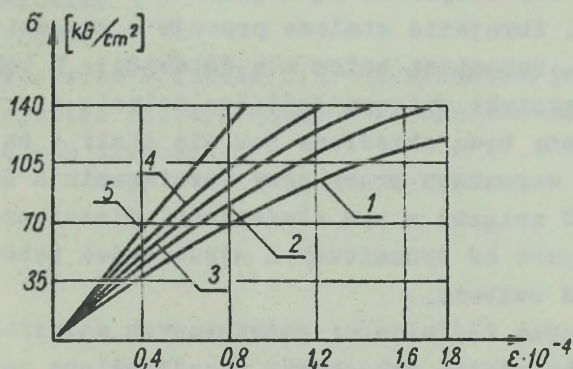
### 1.3. Beton

Beton jako materiał należy do kategorii ciał złożonych. Składa się z kruszywa i roztworu wodno-cementowego, który w miarę upływu czasu przechodzi ze stanu plastyczno-płynnego w stan krystaliczny. Przejście to początkowo przebiega w sposób szybki, a następnie coraz wolniej (przy sprzyjających warunkach do 10 i więcej lat), dlatego w betonie obserwuje się charakterystyczne nieodwracalne odkształcenie na skutek jego pęcznienia.

Wracając do modelu ciała sprężysto-plastycznego, można powiedzieć, że rolę sprężystych elementów - sprężyn  $k_1$  i  $k_2$  w betonie spełnia kruszywo i część skryształizowanego roztworu wodnocementowego, natomiast rolę elementu plastycznego spełnia pozostała część roztworu wodnocementowego.

Na rys.1.8 podana jest zależność pewnych odkształceń betonu od naprężeń ściskających przy różnych prędkościach ob-

ciężenia. Z rysunku widać, że ze wzrostem prędkości naprężeń wielkości odkształceń plastycznych zmniejszają się. Przy momentalnym obciążeniu, odkształcenia betonu są sprężyste.



Rys.1.8. Zależność  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  dla betonu przy obciążeniu próbek: 1-w czasie 60 sek; 2-w czasie 30 sek; 3-w czasie 15 sek; 4-w czasie 5 sek; 5-przy obciążeniu momentalnym

Z danych opublikowanych przez niektórych autorów wynika, że dla betonu marki "175" dynamiczna granica wytrzymałości zwiększa się w porównaniu ze statyczną od 1,09 do 1,84 razy przy trwaniu uderzenia odpowiednio 0,9 i 0,00025 sek. Dla betonu marki "450" wartości te przy tym samym czasie działania obciążenia wynoszą 1,13 + 1,85.

Dynamiczne obciążenie ma również dość istotny wpływ na pracę potrzebną do zniszczenia jednostki objętości betonu. Stosunek dynamicznej do statycznej jednostkowej pracy niszczącej dla betonu kształtuje się w granicach 1,5 + 2,2.

Maksymalna ściśliwość betonu przy obciążeniach dynamicznych jest mniejsza niż przy obciążeniach statycznych, która waha się w granicach  $\epsilon = 0,0015 + 0,003$  (1,5 + + 3 mm na metr bieżący).

#### 1.4. Żelbet

W żelbecie zespolone są w jeden monolit beton i zbrojenie stalowe. Zbrojenie stalowe pracuje w zasadzie w strefie rozciąganej, natomiast beton - w ściskanej. W takim przypadku charakterystyki wytrzymałościowe żelbetu i przy dynamicznym obciążeniu będą określone jak dla stali i betonu, przy czym stal w warunkach pracy przy rozciąganiu a beton - przy ściskaniu. W związku z tym właściwości dynamiczne żelbetu będą nie mniejsze od dynamicznych właściwości betonu wchodzącego w skład żelbetu.

Dynamiczne właściwości podstawowych materiałów budowlanych przy obciążeniu wybuchowym przedstawione są w tabeli 1.1.

Tabela 1.1

| Materiały<br>i<br>odkształ-<br>cenia    | C h a r a k t e r y s t y k i |                           |                           |                                 |
|---|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|
|   | $\frac{R_d}{R_s} = k_R^d$     | $\frac{E_d}{E_s} = k_E^d$ | $\frac{Q_d}{Q_s} = k_Q^d$ | $\frac{A_m^d}{A_m} = k_{A_m}^d$ |
| 1                                       | 2                             | 3                         | 4                         | 5                               |
| Drewno                                  | 1,2 + 1,6                     | 1,25 + 1,30               | -                         | 1,35 + 2,0                      |
| Zginanie                                |                               |                           |                           |                                 |
| Rozciąganie                             | 1,1 + 1,3                     | 1,25 + 1,30               | -                         | 1,35 + 2,0                      |
| Żelazo i<br>miękką stal                 | 1,12 + 2,0                    | 1,0 + 1,1                 | 2                         | 1,9 + 2,0                       |
| Rozciąganie                             |                               |                           |                           |                                 |
| Stal mająca<br>0,08 % do<br>0,8 % węgla | 1,08 + 1,5                    | 1,0 + 1,05                | 1,2 + 1,9                 | 1,3 + 2,0                       |
| Rozciąganie                             |                               |                           |                           |                                 |
| Beton                                   |                               |                           |                           |                                 |
| "175"                                   | 1,84 + 2,0                    | 1 + 1,47                  | -                         | 1,5 + 2,20                      |
| "450"                                   | 1,85 + 2,0                    | 1 + 1,33                  | -                         | 1,5 + 2,15                      |

Oznaczenia do tabeli:

R - granica wytrzymałości;

E - moduł sprężystości;

Q - granica plastyczności;

$A_m$  - praca jednostkowa potrzebna na zniszczenie jednostki objętości materiału.

Indeksy przy podanych wartościach oznaczają:

d - dynamiczne;

s - statyczne.

Dane przytoczone w tabeli 1,1 są orientacyjne i wymagają dokładniejszego sprecyzowania w każdym konkretnym przypadku wykonywanych niszczeń.

## Rozdział 2

### DZIAŁANIE WYBUCHU ŁADUNKÓW KONTAKTOWYCH MATERIAŁU WYBUCHOWEGO NA ELEMENTY KONSTRUKCJI

Rozpatrywanie działania wybuchu na elementy konstrukcji zaczniemy od ładunków kontaktowych, tj. takich, które przy - najmniej jedną swoją płaszczyzną przylegają do niszczonego elementu.

Rozpatrywać będziemy dwa ładunki: ładunek w postaci prostopadłościanu o podstawie  $b \times b$  oraz ładunek w kształcie walca o średnicy  $b$ , oba ładunki o wysokości  $H$  spełniają nierówność

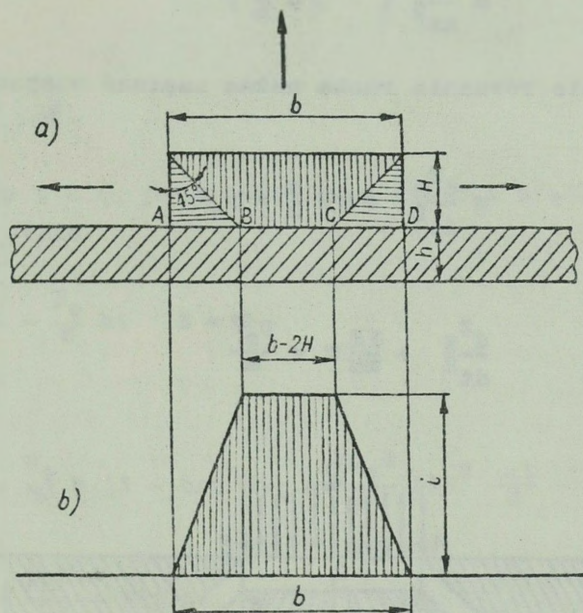
$$b > 2H$$

Dla uproszczenia obliczeń założymy, że w ładunku umiejscowionym na płycie metalowej o grubości  $h$  detonacja ma przebieg natychmiastowy. Nie biorąc pod uwagę wielkości przemieszczenia płyty jako całości w procesie jej niszczenia, obraz rozlotu gazów powybuchowych dla obu rozpatrywanych ładunków można przedstawić jak na rys.2.1.

Cząsteczki produktów wybuchu, zakreskowane poziomo, będą poruszać się prostopadle do bocznych ścianek ograniczających ładunek, natomiast cząsteczki ładunku zakreskowane pionowo - -prostopadle do górnej powierzchni ograniczającej ładunek.

Wykażemy obecnie, że wielkość przemieszczenia niszczonego elementu w czasie działania produktów powybuchowych można pominąć i że obraz rozlotu gazów powybuchowych będzie taki jak pokazano na rys.2.1.

Obciążenie płyty działaniem wybuchu ładunku w kształcie walca, równomiernie rozłożone w centralnej części płyty i malejące w kierunkach do krawędzi ładunku (rys.2.1) zamienimy



Rys.2.1. Schemat do określenia obciążenia płyty przy wybuchu ładunku bezpośrednio przyłożonego w przypadku gdy  $b \geq 2H$ : a) schemat rozmieszczenia ładunków na płycie; b) wykres impulsów jednostkowych działających na płytę

dla uproszczenia dalszych rozważań na obciążenie równomier - nie rozłożone na całej płaszczyźnie pod ładunkiem. Przy takiej zamianie, ogólne obciążenie okaże się większe od rzeczywistego, a w związku z tym i obliczone przemieszczenie będzie także większe od rzeczywistego.

Na kolistą powierzchnię o promieniu  $x$  działa w czasie  $\tau$  stałe w czasie i jednakowe we wszystkich punktach płaszczyzny ciśnienie produktów wybuchu  $p_0$ . Pod działaniem tego ciśnienia, pewna część płyty (zakreskowana promieniście) bę-

dzie wprowadzona w ruch. Działaniu ciśnienia produktów wybuchu będą przeciwstawiać się siły bezwładności i siły sprężyste materiału

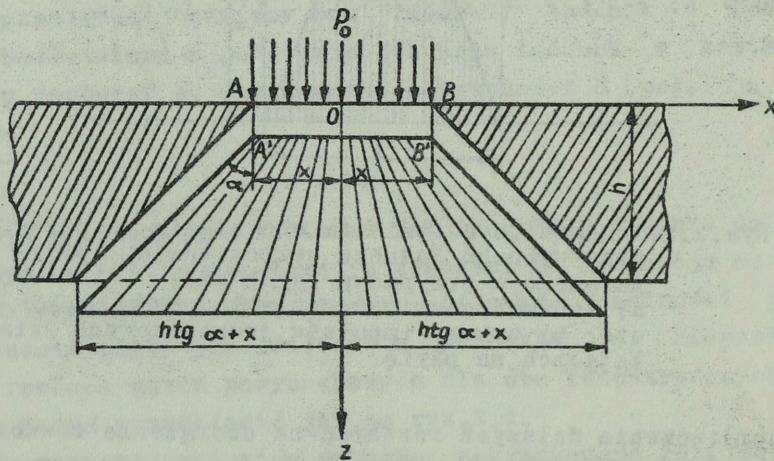
$$m \frac{d^2 z}{dt^2} ; \quad FE \frac{z}{h} ;$$

w tym układzie równanie ruchu można zapisać w sposób następujący

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + FE \frac{z}{h} = p_0 F$$

lub

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{FE}{mh} z = \frac{p_0 F}{m}$$



Rys.2.2. Schemat do określania przemieszczenia elementu płyty w czasie działania obciążenia od wybuchu ładunku kontaktowego

Ogólne rozwiązanie tego równania ma postać

$$z = A \cos \omega t + B \sin \omega t + \frac{p_0}{E} h$$

przy tym prędkość

$$z' = \frac{dz}{dt} = -A\omega \sin \omega t + B\omega \cos \omega t$$

gdzie

$$\omega = \sqrt{\frac{FE}{mh}}$$

Ponieważ przy  $t = 0$ , przemieszczenie  $z = 0$  i prędkość  $z' = 0$ , to wartości stałe

$$A = -\frac{p_0}{E} h; \quad B = 0$$

Wobec tego

$$z = \frac{p_0}{E} h (1 - \cos \omega t) = \frac{2p_0 h}{E} \sin^2 \frac{\omega t}{2} \quad (2.1)$$

$$z' = \frac{p_0 h \omega}{E} \sin \omega t \quad (2.2)$$

Przemieszczenie i prędkość elementu płyty w momencie zakończenia działania produktów wybuchu będą równe

$$z_\tau = \frac{2p_0 h}{E} \sin^2 \frac{\omega \tau}{2}$$

$$z'_\tau = \frac{p_0 h \omega}{E} \sin \omega \tau$$

Przy założeniu, że cząsteczki zawarte w stożku, którego tworząca z powierzchnią płyty tworzy  $45^\circ$ , są wprowadzane w ruch w związku z tym masa materiału będącego w ruchu wyniesie

$$m = \frac{\pi}{3} (h+x)^3 \rho - \frac{\pi}{3} x^3 \rho = \pi h^3 \rho \left[ \frac{1}{3} + \frac{x}{h} + \left(\frac{x}{h}\right)^2 \right]$$

gdzie  $\rho$  - gęstość materiału płyty

$$F = \tau x^2$$

$$\omega = \sqrt{\frac{FE}{mh}} = \frac{a_m u_x}{h} \quad (2.3)$$

gdzie:  $a_m = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  prędkość rozprzestrzeniania się dźwięku i fali uderzeniowej w materiale;

$$u_x = \frac{\frac{x}{h}}{\sqrt{\frac{1}{3} + \frac{x}{h} + \left(\frac{x}{h}\right)^2}} \quad (2.4)$$

Czas działania obciążenia w centralnej części płyty (rys.2.1 odcinek BC) równy jest czasowi potrzebnemu do tego, aby powierzchnia rozlotu przemieszczająca się w głąb ładunku z prędkością  $w_0$  przeszła drogę, która w danym przypadku ( $b > 2H$ ) równa jest wysokości ładunku  $H$  i doszła do przegrody, a więc

$$\tau = \frac{H}{w_0} = \frac{H}{p_0} \rho_0 u_0 \quad (2.5)$$

gdzie:  $\tau$  - czas działania gazów powybuchowych ładunku;

$$w_0 = \frac{p_0}{\rho_0 u_0};$$

$p_0$  - początkowe ciśnienie działające w gazach powybuchowych;

$\rho_0$  - gęstość początkowa gazów powybuchowych;

$u_0$  - prędkość początkowa cząsteczek gazów powybuchowych.

Posługując się zależnościami (2.3); (2.4) i (2.5) wzory na przemieszczenie i prędkość przemieszczenia elementu niszczonego przybiorą postać

$$z_{\tau} = \frac{2p_0 h}{E} \sin^2 \left( \frac{u_x}{2} \frac{a_m}{w_0} \frac{H}{h} \right)$$

$$z_{\tau}' = \frac{p_0}{E} u_x a_m \sin \left( \frac{u_x}{2} \frac{a_m}{w_0} \frac{H}{h} \right)$$

## 2.1. Impuls jednostkowy i impuls pełny

Niszczony element w czasie działania obciążenia wybuchowego zachowuje się jak przegroda nieruchoma. Na środkowym odcinku BC (rys.2.1) płyta jest obciążona ciśnieniem produktów wybuchu  $p_0$  w czasie  $\tau$ . Impuls jednostkowy działający w tej części płyty może być określony wzorem

$$i = p_0 \tau = H \rho_0 u_0$$

gdzie

$$w_0 = \frac{p_0}{\rho_0 u_0} ; \quad \tau = \frac{H}{w_0} \quad (2.6)$$

Na odcinkach bocznych AB i CD czas działania produktów wybuchu, a w związku z tym i impulsy jednostkowe będą malały liniowo aż do zera w punktach AD. Przykładowy wykres działania impulsów jednostkowych na powierzchnię płyty jest pokazany na rys.2.1b.

Pełny impuls działający na płytę równy jest objętości wykresu impulsów jednostkowych i wynosi:

- dla ładunku w kształcie prostopadłościanu

$$V = \frac{1}{3} w (F_1 + F_2 + \sqrt{F_1 F_2})$$

$$I_0 = \frac{1}{3} \pi \left[ b^2 + (b - 2H)^2 \sqrt{b^2 (b - 2H)^2} \right] =$$

$$= \frac{1}{3} \pi \left[ b^2 + (b - 2H)^2 + b(b - 2H) \right]$$

- dla ładunku w kształcie walca;

$$V = \frac{1}{3} \pi w (R^2 + r^2 + R r)$$

$$I_0 = \frac{1}{3} \pi \left[ \left( \frac{b}{2} \right)^2 + \left( \frac{b - 2H}{2} \right)^2 + \frac{b}{2} \left( \frac{b - 2H}{2} \right) \right] =$$

$$= \frac{\pi}{12} \pi \left[ b^2 + (b - 2H)^2 + b(b - 2H) \right]$$

Po przekształceniach otrzymamy

$$I_0 = \frac{1}{3} H \rho_0 u_0 \left[ 3b^2 - 6bH + 2H^2 \right]$$

$$I_0 = \frac{\pi}{12} H \rho_0 u_0 \left[ 3b^2 - 6bH + 4H^2 \right]$$

Wprowadzając do powyższych wzorów ciężar ładunku C

$$C_0 = V \gamma = b^2 H \rho_0 g$$

$$C_0 = V \gamma = \frac{\pi b^2}{4} H \rho_0 g$$

oraz wartość stałą  $A = \frac{u_0}{2 \pi g}$  otrzymamy w obu przypadkach wzór

$$I = \frac{2}{3} \pi A C \mu$$

gdzie:  $\mu = 3 - 6\frac{H}{b} + 4\left(\frac{H}{b}\right)^2$  - wielkość zależna od stosunku wymiarów ładunku.

U w a g a: Wyprowadzone wzory na  $i$ ,  $I$  oraz  $\mu$  aktualne są dla ładunków spełniających nierówności  $b \geq 2H$ . Dla ładunków, których wymiary spełniają nierówności  $b < 2H$ , wartości odpowiednich impulsów będą określone niżej podanymi wzorami, które wynikają z danych przedstawionych na rys.2.3.

$$i = \frac{b}{2} \rho_0 u_0$$

$$I_0 = \frac{1}{6} b^3 \rho_0 u_0$$

$$I_0 = \frac{\pi}{24} b^3 \rho_0 u_0$$

Wprowadzając do powyższych wzorów  $C, A$  i  $\mu$  otrzymamy dla obu ładunków wzór ogólny

$$I = \frac{2}{3} \pi A C \mu$$

gdzie

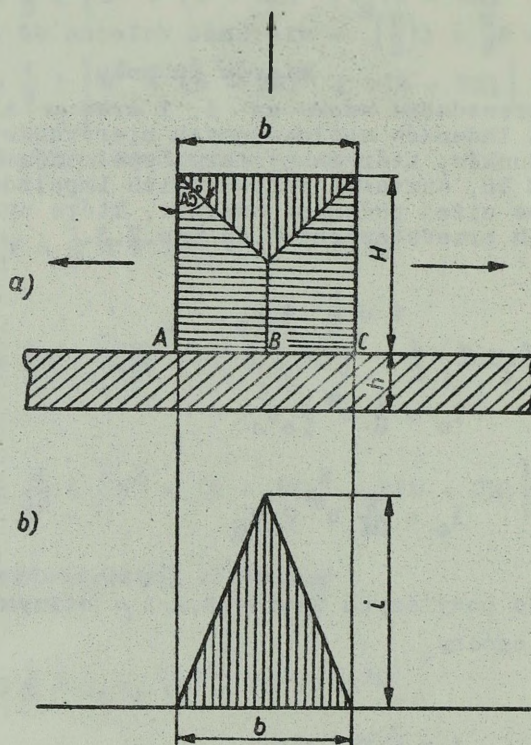
$$\mu = \frac{b}{2H}$$

Z zestawienia otrzymanych wzorów na impulsy i współczynnik  $\mu$  widać, że dla dowolnego stosunku  $\frac{b}{H}$  przy obu ładunkach można posługiwać się wzorem

$$I = \frac{2}{3} \pi A C \mu \quad (2.7)$$

biorąc  $\mu$  odpowiednio

$$\mu = \left\{ \begin{array}{ll} 3 - 6\frac{H}{b} + 4\left(\frac{H}{b}\right)^2 & \left(\frac{b}{H} \geq 2\right) \\ \frac{b}{2H} & \left(\frac{b}{H} < 2\right) \end{array} \right\} \quad (2.8)$$



Rys.2.3. Schemat do określenia obciążenia na przegrodę od wybuchu ładunku kontaktowego w przypadku kiedy  $b < 2H$ :  
 a) ułożenie ładunku na płycie i jego oddziaływanie; b) wykres działania impulsów jednostkowych na płytę

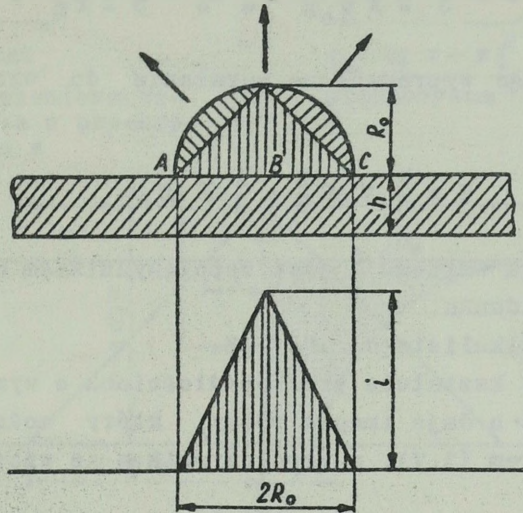
Wartości współczynnika  $\mu$  dla niektórych  $\frac{b}{H}$  podane są w tabeli 2.1.

T a b e l a 2.1.

| $\frac{b}{H}$ | $\frac{1}{10}$ | $\frac{1}{2}$ | 1    | 2    | 3     | 4    | 5    | 10   | 20   |
|---------------|----------------|---------------|------|------|-------|------|------|------|------|
| $\mu$         | 0,05           | 0,25          | 0,5  | 1,0  | 1,445 | 1,75 | 1,96 | 2,44 | 2,71 |
| $\mu_w$       | 0,075          | 0,375         | 0,75 | 1,50 | 2,00  | 2,25 | 2,40 | 2,70 | 2,90 |

gdzie  $\mu$  i  $\mu_w$  - odpowiednio dla ładunków skupionych i ładunków wydłużonych.

Obciążenie płyty wybuchem półkulistego ładunku kontaktowego będzie miało charakter stożka o wysokości  $l = R_0 \rho_0 u_0$ .



Rys.2.4. Schemat działania obciążenia na płytę od ładunku półkulistego

Pełny impuls działający na płytę w tym przypadku będzie równy

$$I = \frac{1}{3} \pi R_0^2 l = \frac{\pi}{3} R_0^2 R_0 \rho_0 u_0 = \frac{\pi}{3} R_0^3 \rho_0 u_0$$

Ciężar ładunku półkulistego

$$C = \frac{2}{3} \pi R_0^3 \rho_0 g$$

Promień ładunku w potęgze trzeciej wyrażony w funkcji ciężaru

$$R_0^3 = \frac{3C}{2\pi\rho_0g}$$

Wprowadzając te wartości do wzoru na impuls otrzymamy

$$I = \frac{\pi}{3} \frac{3C}{2 \frac{\pi}{\rho_0 g}} \quad \rho_0 u_0 = \frac{3}{3} \frac{\mu_0}{2 \frac{\pi}{g}} \quad C = \pi AC$$

Sprowadzając wyprowadzone wyrażenie do wzoru ogólnego otrzymamy

$$I = \frac{2}{3} \pi AC \frac{3}{2} = \frac{2}{3} \pi AC \mu$$

W tym przypadku wartość  $\frac{3}{2}$  jest współczynnikiem uwzględniającym kształt ładunku.

Dla ładunku półkulistego  $\mu = 1,5$ .

Ładunek w kształcie prostopadłościanu o wymiarach  $l$ ,  $b$  oraz  $H$  przy  $l > b$  daje impuls pełny, który może być także określony wzorem (2.7), a współczynnik  $\mu$  ze wzorów

$$\mu = \begin{cases} 3 - 3 \frac{H}{b} - 3 \frac{H}{l} + 4 \frac{H^2}{bl} & \left( \frac{b}{H} > 2 \right) \\ \frac{1}{4} \frac{b^2}{lH} \left( 3 \frac{l}{b} - 1 \right) & \left( \frac{b}{H} \leq 2 \right) \end{cases} \quad (2.9)$$

Jak wynika z tabeli 2.2, wartość impulsu przekazanego płycie zależy w dużej mierze od stosunku poprzecznych wymiarów ładunku do wysokości. Ładunki spełniające nierówność  $\frac{b}{H} < 2$  są nieekonomiczne.

## 2.2. Prędkość cząsteczek niszczonej przegrody

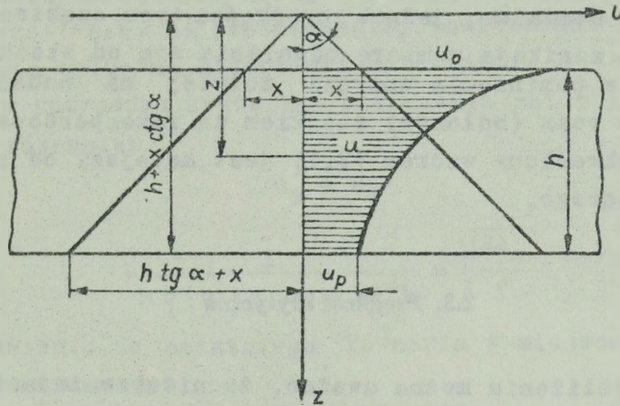
Pod działaniem krótkotrwałego obciążenia elementu płyty o promieniu  $x$  zaczną się poruszać początkowo cząsteczki stykające się z ładunkiem, które z kolei przekażą swoją energię cząsteczkom następnym, znajdującym się w stożku o promieniu podstawy  $(h \operatorname{tg} \alpha + x)$ .

Przy założeniu, że gęstość materiału o objętości stożka ściętego w czasie wprowadzania cząsteczek w ruch - nie zmieni się - możemy napisać w oparciu o prawo zachowania masy następujące równanie:

rozchód masy w przekroju z

rozchód masy w przekroju  
 $z = h + x \operatorname{ctg} \alpha$

$$\underbrace{\rho \pi (z \operatorname{tg} \alpha)^2}_{\text{płaszczyzna}} \underbrace{u dt}_{\text{przemieszczenie w przekroju z}} = \underbrace{\rho (h \operatorname{tg} \alpha + x)^2}_{\text{płaszczyzna}} \underbrace{u_p dt}_{\text{przemieszczenie w przekroju } h + x \operatorname{ctg} \alpha}$$



Rys.2.5. Schemat do określenia prędkości cząsteczek płyty, na którą działa równomiernie rozłożony impuls "i" (na płaszczyznę o promieniu x)

Rozchód masy przez przekrój znajdujący się w dowolnej odległości z od początku układu powinien równać się rozchodowi masy w przekroju nam znanym lub założonym

$$u = u_p \left( \frac{h \operatorname{tg} \alpha + x}{z \operatorname{tg} \alpha} \right)^2 \quad (2.10)$$

Wzór ten daje możliwość wyliczenia prędkości cząsteczek w dowolnym miejscu przekroju, jeżeli znana będzie wartość  $u_p$ . Prędkość powierzchniową  $u_p$  określamy w oparciu o prawo zachowania ilości ruchu, zgodnie z którym impuls będzie równać się iloczynowi masy i prędkości

$$I = \int_{x \operatorname{ctg} \alpha}^{h+x \operatorname{ctg} \alpha} u dm \int_{x \operatorname{ctg} \alpha}^{h+x \operatorname{ctg} \alpha} u_{\text{pow}} \left( \frac{h \operatorname{tg} \alpha + x}{z \operatorname{tg} \alpha} \right)^2 \rho \pi z^2 \operatorname{tg}^2 \alpha dz =$$

$$= \pi \rho u_p (h \operatorname{tg} \alpha + x)^2 h, \text{ ponieważ } dm = \rho \pi z^2 \operatorname{tg}^2 \alpha dz$$

$$\text{stad } u_p = \frac{I}{\pi \rho (h \operatorname{tg} \alpha + x)^2 h} \quad (2.11)$$

Przy wyprowadzeniu wzoru (2.11) na  $u_p$  uczyniliśmy założenie, że cały impuls będzie zużyty na nadanie ruchu cząsteczkom płyty zawartym w stożku, który jest odrywany. Należy pamiętać, że część energii przejmą cząsteczki stykające się z odrywającym stożkiem, jednak prędkości tych cząsteczek są małe i szybko zanikają w miarę oddalania się od stożka. Straty wynikające z pominięcia energii zużytej na nadanie ruchu cząsteczkom poza (odłamek) stożkiem są rekompensowane tym, że impuls określony wzorem (2.7) jest mniejszy od rzeczywiście działającego.

### 2.3. Prędkość krytyczna

W przybliżeniu można uważać, że niszczenie materiału będzie odbywać się tam, gdzie gęstość energii kinetycznej spowodowanej wybuchem przewyższy pracę jednostkową potrzebną do zniszczenia danego materiału i gdzie materiał pod działaniem obciążenia może odkształcić się przez rozciąganie. Odkształcenia w wyniku rozciągania mogą zachodzić tylko ze strony przeciwnej do przyłożenia obciążenia. Gęstość energii kinetycznej może być wyrażona wzorem

$$q = \frac{\rho u^2}{2}$$

Ponieważ założyliśmy, że gęstość materiału jest wartością stałą, to gęstość energii kinetycznej może być charakteryzowana tylko wielkością prędkości. Prędkość, przy której gęstość energii równa jest pracy jednostkowej na zniszczenie  $A_m$  nazwiemy prędkością krytyczną  $u_k$ , wtedy

$$\frac{\rho u_k^2}{2} = A_m \quad \longrightarrow \quad u_k = \sqrt{\frac{2A_m}{\rho}} \quad (2.12)$$

#### 2.4. Wzory obliczeniowe

Energia kinetyczna jaką otrzymują cząsteczki elementu płyty zużywana jest na zniszczenie materiału i ruch cząstek.

Rozpatrzmy obecnie skrajny przypadek kiedy energia kinetyczna cząsteczek na przeciwległej powierzchni płyty zostanie zużyta tylko na niszczenie materiału.

W tym przypadku kryterium niszczenia materiału może być wyrażone równaniem

$$u_p = u_k$$

$$\frac{I}{\pi \rho (h \operatorname{tg} \alpha + x)^2 h} = \sqrt{\frac{2A_m}{\rho}}$$

Po podstawieniu do ostatniego równania w miejsce I wyrażenie (2.7) otrzymamy

$$\frac{\frac{2}{3} \pi A C u}{\pi \rho (h \operatorname{tg} \alpha + x)^2 h} = \sqrt{\frac{2A_m}{\rho}}$$

$$\frac{2 A C u}{3 \rho \left(\operatorname{tg} \alpha + \frac{x}{h}\right)^2 h^3} = \sqrt{\frac{2A_m}{\rho}} \rightarrow C = \sqrt{\frac{2A_m}{\rho}} \frac{3 \rho h^3}{2A \mu} \left(\operatorname{tg} \alpha + \frac{x}{h}\right)^2 =$$

$$= \sqrt{\frac{2A_m \rho^2}{2^2 \rho}} \frac{3h^3}{A \mu} \left(\operatorname{tg} \alpha + \frac{x}{h}\right)^2$$

$$C = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\rho} A_m}{\mu A} \left(\operatorname{tg} \alpha + \frac{x}{h}\right)^2 h^3 \quad (2.13)$$

Dla uproszczenia zapisu przyjmijmy następujące oznaczenia

$$C = \frac{\lambda^2}{\mu} M_0 h^3 \quad (2.14)$$

$$M_0 = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{S A_m}}{A} \quad (2.15)$$

$$\lambda = \operatorname{tg} \alpha + \frac{x}{h} \quad (2.16)$$

Wzorem (2.13) i (2.14) możemy określić ciężar ładunku w zależności od wymiarów przebicia płyty ( $x$ ), właściwości niszczonego materiału ( $A_m$ ), właściwości materiału wybuchowego ( $A$ ), grubości niszczonej płyty ( $h$ ) i współczynnika  $\mu$ .

Wielkość  $M_0$ , jak wynika ze wzoru (2.15), zależy tylko od właściwości niszczonego materiału i charakterystyki materiału wybuchowego.

Ze wzoru (2.8) i danych w tabeli 2.1 widać, że współczynnik  $\mu$  zależy od  $\frac{b}{h}$  i wzrasta ze wzrostem tego stosunku: zgodnie ze wzorami (2.13) i (2.14) maleje ciężar ładunku. Nie oznacza to jednak, że szerokość (średnicę) ładunku można zwiększać nieskończenie.

Maksymalna wielkość szerokości (średnicy) ładunku  $b$  nie powinna przekraczać granicznej wartości

$$b \leq 2(x + h \operatorname{tg} \alpha)$$

ponieważ w przeciwnym przypadku nie cały impuls  $I$  będzie przekazany płycie, tylko część jego pójdzie na zniszczenie płyty.

Przy obliczaniu  $M_0$  według wzoru (2.15) należy uwzględnić współczynnik dynamicznego obciążenia

$$A_m^d = K_A^d A_m^s$$

gdzie:  $K_A^d$  - dynamiczny współczynnik materiału dla pracy jednostkowej na zniszczenie;

$A_m^s$  - praca jednostkowa na zniszczenie materiału w warunkach prób statycznych. Dla zwykłych budowlanych stali typu ST-3;  $A_m^s = (1000-1100) \text{ kg/cm}^2$  dla specjalnych stali;  $A_m^s = (1400-1550) \text{ kg/cm}^2$  dla brązu;  $A_m^s = 1090 \text{ kg/cm}^2$ .

Dla innych materiałów, jeśli wiadoma jest granica wytrzymałości  $R_r$  oraz granica wartości odkształcenia przy obciążeniu wybuchowym  $\varepsilon_g$ , wartość ta może być określana ze wzoru

$$A_m^S = \psi k_o R_r \varepsilon_g$$

gdzie:  $\psi$  - współczynnik wypełnienia wykresu, dla stali

$$\psi = 0,85 + 0,90;$$

$k_o$  - współczynnik jednorodności materiału;

$$A_m^S = \frac{k_o^p R_p^w \varepsilon_g}{2} = \frac{(k_o^p R_p^n)^2}{2E}$$

Połowa kąta wierzchołkowego stożka odłamu dla stali i wielu innych materiałów wynosi, jak wykazują doświadczenia,  $\alpha = 45 + 50^\circ$ .

#### 2.4.1. Wzory obliczeniowe dla kontaktowych ładunków wydłużonych

Dla ładunków, których długość przewyższa kilkakrotnie jeden z jego wymiarów poprzecznych, w oparciu o poczynione poprzednio założenia, możemy napisać następujące wzory.

Impuls od ładunku wydłużonego działającego na jednostkę długości przegrody wyniesie

$$I_w = \frac{2}{3} \pi AC_w \mu_w \quad (2.17)$$

gdzie

$$\mu_w = \begin{cases} 3 \left(1 - \frac{H}{b}\right) & \left(\frac{b}{H} \geq 2\right) \\ \frac{3}{4} \frac{b}{H} & \left(\frac{b}{H} \leq 2\right) \end{cases} \quad (2.18)$$

Jednostkowy ciężar ładunku określamy ze wzoru

$$C_w = \frac{3\sqrt{\rho A_m}}{\sqrt{2} \Lambda} \frac{(\operatorname{tg} \alpha + \frac{x}{h})}{\mu_w} h^2 \quad (2.19)$$

$$C_w = \frac{\chi}{\mu_w} M_0 h^2$$

Współczynnik  $\mu_w$  dla ładunku wydłużonego w kształcie półwalca

$$\mu_w = \frac{6}{\pi} = 1,91$$

Przy wyborze szerokości ładunku wydłużonego, należy tak jak i dla skupionego uwzględnić nierówność

$$b \leq 2(x + h \operatorname{tg} \alpha)$$

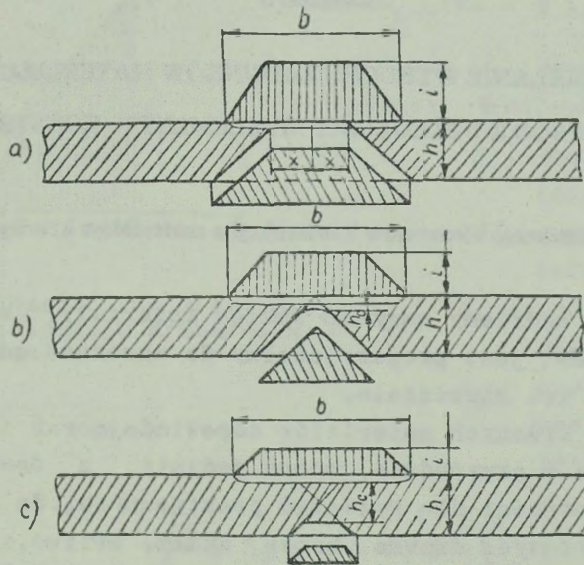
### 2.5. Charakter niszczenia i współczynnik $\chi$

Przy rozpatrywaniu działania wybuchu ładunku na płyty wychodzi się z założenia, że oderwana część materiału posiada górną powierzchnię, na którą działa równomiernie rozłożone obciążenie impulsowe  $i$ . Będzie miało to miejsce tylko w jednym przypadku, kiedy  $x = \frac{b}{2}$ , przy czym na całej powierzchni o boku (średnicy)  $b$  działa równomiernie rozłożone obciążenie  $i = \text{const}$ .

Jeżeli impuls jednostkowy jest rozłożony nierównomiernie na powierzchni o boku (średnicy), możliwe są trzy przypadki działania obciążenia impulsowego z odpowiednim efektem niszczenia:

- a)  $\frac{b}{2} > x > 0$  w tym przypadku mamy do czynienia z pełnym przebicciem. Odrywa się od płyty część materiału, którego wymiar górnej powierzchni ma  $2x$  lub promień  $x$ .

- b)  $x = 0$  w tym przypadku tworzy się odłam na całej głębokości płyty. Mamy do czynienia również z pełnym przebiciem płyty.
- c)  $x < 0$  w tym przypadku tworzy się częściowy odłam. We wszystkich przypadkach w miejscu kontaktu ładunku z materiałem płyty tworzy się wgłębienie (plastyczne odkształcenia).



Rys.2.6. Schematy możliwych wariantów niszczenia płyty działaniem wybuchu ładunku kontaktowego

Zgodnie z wyprowadzonym wzorem (2.16) współczynnik  $\chi$  zależy od kąta związanego z właściwościami niszczonego materiału, jak również od  $\frac{x}{h}$ . to jest od charakteru niszczenia płyty. Dlatego wartość  $\chi$  można nazwać współczynnikiem charakteru niszczenia. Wartość  $\chi$  dla  $x > 0$  będzie odpowiadać tworzeniu pełnego przebicia, natomiast dla  $x < 0$  tworzeniu częściowego odłamu.

### Rozdział 3

## DZIAŁANIE WYBUCHU ŁADUNKÓW MATERIAŁU WYBUCHOWEGO Z ODLEGŁOŚCI NA ELEMENTY KONSTRUKCJI

### 3.1. Niszczenie elementów konstrukcji z materiałów kruchych

Kruchymi będziemy nazywać takie materiały, w których wzrost naprężeń jest proporcjonalny do wzrostu odkształceń aż do momentu ich niszczenia.

Idealnie kruchych materiałów odpowiadających temu wymaganiu nie ma w przyrodzie, można jedynie, z dostatecznym stopniem dokładności dla rozważań praktycznych, do tej grupy materiałów zaliczyć: drewno, beton, skały, żeliwo, szkło itp.

Dla tych materiałów praca jednostkowa na zniszczenie wynosi

$$A_m = \frac{k_o^p K_R^d R_r \varepsilon_z}{2} = \frac{(k_o^p K_R^d R_r)^2}{2 K_E^d E}$$

Jak wynika z wykresu rozciągania, zniszczenie kruchych materiałów następuje momentalnie po przekroczeniu granicy wytrzymałości. W związku z tym, warunek niszczenia kruchych materiałów można napisać w postaci

$$\sigma = \frac{M}{W} \geq R_r \quad (3.1)$$

gdzie:  $W$  - wskaźnik wytrzymałości elementu;

$R_r$  - granica wytrzymałości materiału na zginanie.

Podstawiając do tego równania wartość momentu zginającego w postaci

$$M_{\max}(x) = \beta i_1(x) \quad (3.2)$$

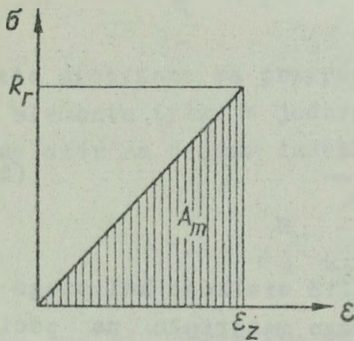
gdzie:  $\beta = \sqrt{\frac{EJ}{m_1}}$

$E$  - moduł sprężystości;

$J$  - moment bezwładności;

$m_1$  - masa jednostki długości belki;

$i_1$  - impuls na jednostkę długości belki



Rys.3.1. Zależność  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  przy rozciąganiu kruchych materiałów

$$\frac{\beta i_1}{W} \geq R_r \longrightarrow i_1 \geq \frac{R_r W}{\beta} \quad (3.3)$$

Impuls na jednostkę długości  $i_1$  równa się iloczynowi impulsu jednostkowego pomnożonego przez szerokość belki  $b$  i współczynnik uwzględniający jej kształt  $k_f$

$$i_1 = k_f b i$$

Będziemy rozpatrywali ładunek w kształcie kuli. Przy wybuchu takiego ładunku impuls działający na przegrodę równa się

$$i = \frac{AC}{r^2} \cos^2 \alpha = \frac{AC}{a^2} \cos^4 \alpha$$

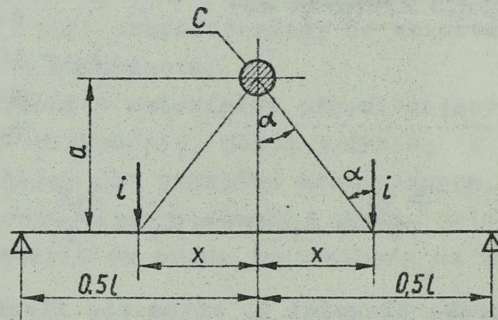
Wstawiając w miejsce  $i_1$  wyprowadzoną wartość, otrzymamy

$$k_f b i = \frac{k_f b A C \cos^4 \alpha}{a^2} \gg \frac{R_g W}{\beta}$$

stąd znajdujemy C

$$C \geq \frac{R_g}{A} \frac{W}{k_f b \beta} \frac{a^2}{\cos^4 \alpha} \quad (3.4)$$

Tym wzorem jesteśmy w stanie określić wielkość kulistego ładunku, który niszczy belkę z kruchego materiału na odcinku  $2x$  znajdującą się w odległości "a" od środka ładunku.



Rys.3.2. Schemat do określania ciężaru kulistego ładunku przy niszczeniu belki z kruchego materiału

Z powyższego wzoru można wyeliminować kąt  $\alpha$  wprowadzając w to miejsce połowę długości niszczonej belki  $x$

$$x = a \operatorname{tg} \alpha = a \sqrt{\frac{1 - \cos^2 \alpha}{\cos^2 \alpha}}$$

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 = \frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1; \quad \frac{1}{\cos^2 \alpha} = 1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2$$

Podstawiając tę wartość do wzoru na ciężar ładunku, otrzymamy

$$C \geq \frac{R_r}{A} \frac{W}{k_f b \beta} a^2 \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 \quad (3.5)$$

Często spotykane są przypadki, że zachodzi potrzeba przebiecia elementu tylko w jednym miejscu, a więc  $x = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$ , wtedy wzór na ciężar ładunku znacznie się upraszcza

$$C \geq \frac{R_r}{A} \frac{W}{k_f b \beta} a^2$$

Można znaleźć optymalne rozmieszczenie ładunku  $a$ , przy którym minimalny jego ciężar daje złożony efekt niszczący.

Dla znalezienia ekstremalnej wartości ładunku  $C$  przyrównujemy pierwszą pochodną względem " $a$ " do zera

$$\frac{dC}{da} = \frac{R_r}{A} \frac{W}{k_f b \beta} \left\{ 2a \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 + 2a^2 \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right] \left( - \frac{2x^2}{a^3} \right) \right\} = 0$$

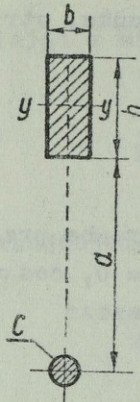
lub

$$1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 - 2 \left( \frac{x}{a} \right)^2 = 0 \longrightarrow a_{opt} = x$$

Nietrudno przekonać się, że przy  $a = x$  ładunek jest minimalny. Optymalne rozmieszczenie kulistego ładunku od niszczącego elementu równe jest połowie długości elementu niszczonego.

Dla belki o poprzecznym prostokątnym przekroju rozmieszczonej jak na rys.3.3, wskaźnik wytrzymałości i moment bezwładności wynoszą

$$W = \frac{bh^2}{6} ; \quad J_{yy} = \frac{bh^3}{12}$$



Rys. 3.3. Schemat obliczeniowy niszczenia belki łądunkiem skupionym

Masa jednostki długości belki

$$m_1 = b h \rho$$

Współczynnik kształtu belki

$$k_f = 1$$

Wobec tego wartość  $\beta$  w tym przypadku wyniesie

$$\beta = \sqrt{\frac{EJ_{yy}}{m_1}} = \sqrt{\frac{Ebh^3}{12bh}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{h}{\sqrt{12}}$$

Podstawiając wyprowadzoną wartość do wzoru na C

$$C > \frac{R_r}{\sqrt{3} A \sqrt{\frac{E}{\rho}}} ha^2 \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2$$

lub

$$C > Kha^2 \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2$$

$$C > Kha^2 \frac{1}{\cos^4 \alpha} \quad (\text{przy uwzględnieniu } k_f)$$

$$C > \frac{K}{k_f} ha^2 \frac{1}{\cos^4 \alpha}$$

gdzie

$$K = \frac{R_r}{\sqrt{3} A \sqrt{\frac{E}{\rho}}}$$

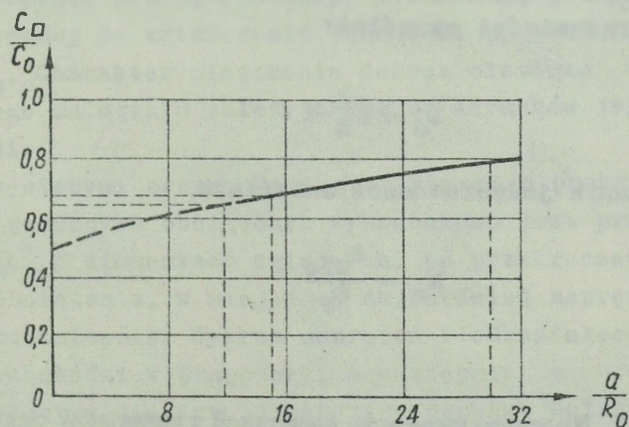
W przypadku przebicia elementu w jednym miejscu ( $x = 0$ ),  
 $\cos \alpha = 1$

$$C \geq K a^2$$

Ładunek w kształcie sześciangu tak umieszczony, że jedna z płaszczyzn jest równoległa do płaszczyzny niszczonego elementu w odległości do  $15 R_0$  jest efektywniejszy o 50 %, a w odległości do  $30 R_0$  o 25 % niż ładunek z tego samego MW w kształcie kuli. Dlatego przy stosowaniu ładunków sześciennych, obliczenia prowadzi się według wzorów jak dla ładunku kulistego, wprowadzając współczynnik poprawkowy

$$k = \frac{C_0}{C_0} = \frac{1}{1,25 + 1,30} = 0,8 + 0,67$$

lub według poniższego wykresu.



Rys.3.4. Zależność  $\frac{C_0}{C_0}$  od  $\frac{a}{R_0}$ ; gdzie  $R_0$  promień ładunku kulistego

Przy obliczaniu elementów konstrukcji na zniszczenie za graniczną wytrzymałość materiału  $R_r$  należy przyjmować największą z możliwych wartości, z uwzględnieniem właściwości dynamicznych danego materiału.

Pierwszy współczynnik  $k_R^d$ .

Drugi współczynnik jednorodności na gwarantowane zniszczenia

$$k_0^D = 2(1 + \delta) - k_0 \quad (3.6)$$

Trzeci współczynnik zwiększenia wytrzymałości ze wzrostem czasu (zob. wykres i tabelę 6.4):

$$k_t = \frac{R_t}{R_r}$$

Wobec tego graniczna wytrzymałość może być określona według wzoru

$$R^d = k_R^d k_0^D k_t R_r$$

gdzie:  $R_r$  - (tab. 6.1) wytrzymałość materiału.  
Moduł sprężystości określamy

$$E_d = k_E^d E$$

Współczynnik jednorodności materiału

$$k_0 = \frac{R_{\min}}{R_r}$$

### 3.2. Niszczenie elementów konstrukcji z materiałów ciągliwych

Materiały ciągliwe różnią się od materiałów kruchych tym, że zniszczenie ich następuje po przekroczeniu odpowiedniego odkształcenia plastycznego. Typowo ciągliwym materiałem jest żelazo i stal niskowęglowa.

Jak wynika z wykresu  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ , zależność naprężenia od odkształcenia jest proporcjonalna tylko w stadium początkowym. Za przedziałem proporcjonalności, wydłużenie stali rośnie szybciej niż naprężenie, przy tym oprócz odkształceń sprężystych pojawiają się i odkształcenia plastyczne. Dalej następuje wyraźnie zarysowująca się granica płynności, gdzie obserwuje się wzrost odkształcenia przy minimalnym wzroście naprężenia. Za przedziałem płynięcia stal nie jest w stanie przyjąć wzrastającego obciążenia, następuje stadium wzrostu wytrzymałości materiału. Po osiągnięciu pewnej granicy następuje miejscowe płynięcie stali i tworzy się (szyjka) przewężenie próbki i niszczenie materiału.

Ponieważ różnica w wielkości odkształceń, przy których następuje niszczenie stali i innych materiałów ciągliwych jest dość duża (dla stali ST-3 wynosi  $18 + 25\%$ ), z tego wynika, że niszczenie materiału nie może być określone wielkością naprężenia.

Zniszczenie przyjęto oceniać wielkością pracy jednostkowej, potrzebnej do zniszczenia jednostki objętości danego materiału  $A_m$ . Charakter niszczenia danego elementu wykonanego z ciągliwego materiału zależy także od warunków jego pracy w konstrukcji.

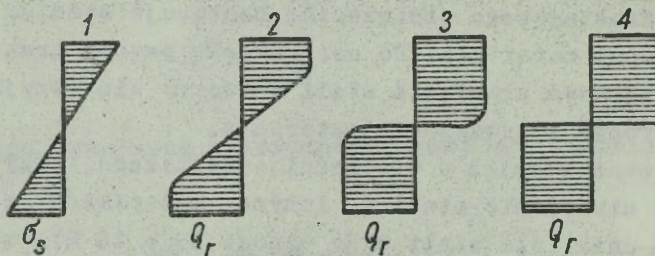
Najczęstszymi przypadkami spotykanymi w praktyce pracy elementów poddanych obciążeniu wybuchowemu jest praca belek na zginanie. W elementach zginanych, po przekroczeniu dopuszczalnego obciążenia, w miejscach najbardziej naprężonych powstaje odkształcenie. Wykres naprężeń i odkształceń z trójkątnego przechodzi w trapezowy, a następnie w prostokątny, przy czym tworzy się tzw. elastyczny przegub. Belka traci możliwość przyjmowania większego obciążenia, przy tym silnie deformuje się i jeśli jej końce nie są przymocowane, to belka może zlecieć z podpór, co nie wyklucza możliwości zniszczenia jej przez samo spadnięcie.

Należy podkreślić fakt, że nawet przy znacznych odkształceniach zginających, element nie jest niszczony w całości. Jak wykazuje praktyka, przy zginaniu belki stalowej

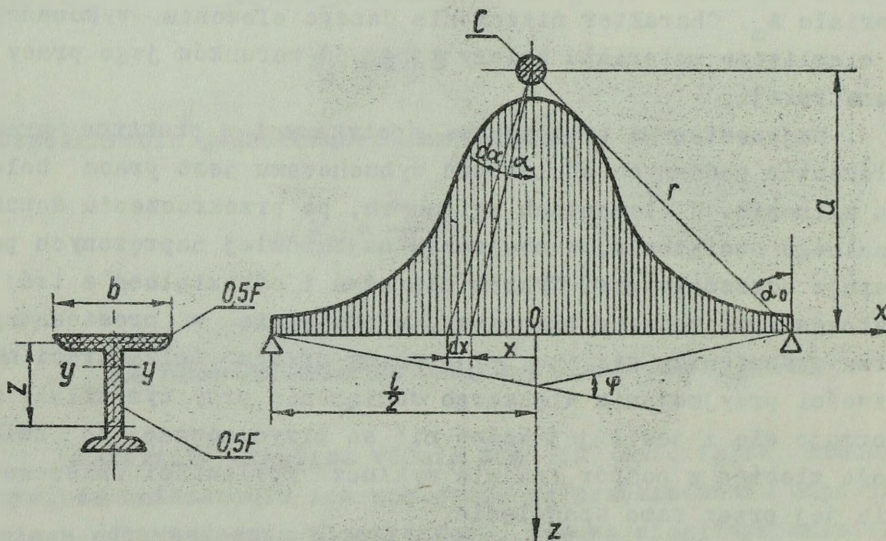
nawet o kąt  $180^\circ$  we włóknach najbardziej obciążonych, w szeregu przypadków naprężenia nie osiągną granicy wytrzymałości materiału.

Rozpatrzmy obecnie najczęściej spotykany przypadek, belki wolnopodpartej z materiału ciągłego.

Niech na belkę o szerokości  $b$  i przekroju poprzecznym  $F$  działa obciążenie wybuchowe w postaci impulsów jednostkowych "i" działających symetrycznie w stosunku do środka belki.



Rys.3.5. Kolejne stadia tworzenia się plastycznego przegubu w elemencie zginanym



Rys.3.6. Schemat obliczeniowy do określenia kąta obrotu  $\varphi$  przy odkształceniu belki z materiału ciągłego

Do momentu obciążenia oś belki jest pozioma, a siły działające w niej równe są zeru.

Pod działaniem impulsu wszystkie cząsteczki belki otrzymają pewne prędkości, które mogą być określone z warunku początkowego

$$u = \frac{i_1}{m_1} = \frac{k_f b i}{\rho F}$$

Energia kinetyczna elementarnej masy belki  $dm$  wynosi

$$dK_E = \frac{u^2}{2} dm = \frac{k_f^2 b^2 i^2(x)}{2 \rho^2 F^2} \rho F dx = \frac{k_f^2 b^2}{2 \rho F} i^2(x) dx$$

Iloraz  $\frac{k_f^2 b^2}{2 \rho F}$  jest wartością stałą dla belek z materiału jednorodnego i stałego przekroju belki, natomiast impuls jednostkowy  $i$  - jest funkcją odległości  $x$  od środka belki do rozpatrywanego punktu.

Pełna energia kinetyczna belki pod wpływem obciążenia wybuchowego wyniesie

$$K_E = \int dk_E = \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \frac{k_f^2 b^2}{2 \rho F} i^2(x) dx \quad (3.7)$$

Dla belek o stałym poprzecznym przekroju

$$K_E = \frac{k_f^2 b^2}{2 \rho F} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} i^2(x) dx = \frac{k_f^2 b^2}{\rho F} \int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx \quad (3.8)$$

Przemieszczenie belki jest proporcjonalne do wartości działającej energii. W najbardziej obciążonym przekroju belki wartość naprężeń może przekroczyć granicę plastyczności danego materiału i wytworzy się plastyczny przegub. Wykres momentów zginających po wytworzeniu się plastycznego przegubu przyjmie postać trójkąta.

Przy założeniu, że cała energia kinetyczna belki zużyta jest w całości na pracę sił deformacji w przegubie plastycznym, możemy napisać

$$K_E = M_p \varphi = \frac{F}{2} Q_r z \varphi$$

gdzie:  $\varphi$  - kąt obrotu w przegubie plastycznym;

$Q_r$  - naprężenie odpowiadające granicy plastyczności materiału;

$z$  - ramię pary sił wewnętrznych.

Podstawiając ten wzór na  $K_E$  w przegubie plastycznym do równania (3.8) na energię kinetyczną otrzymamy

$$M_{pl} \varphi \frac{\varphi F}{k_r^2 b^2} = \frac{\varphi F^2 Q_r^d z}{2k_r^2 b^2} \varphi \int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx \quad (3.9)$$

Otrzymany wzór wyraża zależność kąta obrotu od działającego obciążenia, przy założeniu, że belka jest swobodnie podparta na nieruchomych nie niszczonych podporach.

We wzorze (3.9) jak i w następnych, które zostaną wprowadzone, w miejsce granicy plastyczności  $Q_r$  zgodnie z danymi w tabeli 1.1 należy przyjąć

$$Q_r^d = k_o^p k_{Q_r}^d Q_r$$

gdzie:  $k_{Q_r}^d = \frac{Q_r^d}{Q_r^s}$  - współczynnik dynamiczny odnoszący się do granicy plastyczności;

$k_o^p$  - współczynnik jednorodności materiału gwarantujący zniszczenie;

$Q_r$  - normowa granica plastyczności.

### 3.2.1. Ładunek kulisty

Belka o długości  $l$  jest obciążona wybuchem kulistego ładunku rozmieszczonego w odległości  $a$  (zob. rys. 3.6).

W tym przypadku

$$l = \frac{AC}{a^2} \cos^4 \alpha$$

$$x = a \operatorname{tg} \alpha$$

$$dx = \frac{a}{\cos^2 \alpha} d\alpha$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\frac{l}{2}} l^2(x) dx &= \frac{A^2 C^2}{a^4} \int_0^{\alpha_0} \cos^8 \alpha \frac{a}{\cos^2 \alpha} d\alpha = \frac{A^2 C^2}{a^3} \int_0^{\alpha_0} \cos^6 \alpha d\alpha = \\ &= \frac{A^2 C^2}{a^3} \delta_k \end{aligned}$$

$$\delta_k = \int_0^{\alpha_0} \cos^6 \alpha d\alpha; \quad \alpha_0 = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1}{2a}$$

Podstawiając wartość całki do wzoru (3.9) otrzymamy

$$\frac{\rho F^2 Q_r^d z}{2k_f^2 b^2} \psi = \frac{A^2 C^2}{a^3} \delta_k$$

stąd

$$\left. \begin{aligned} \psi &= \frac{2k_f^2 b^2 A^2 C^2}{\rho F^2 z Q_r^d a^3} \delta_k \\ c &= \frac{F}{k_f b A} \sqrt{\frac{\rho z Q_r^d a^3}{2 \delta_k}} \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

Dla znalezienie  $\delta_k$  posłużymy się wzorem

$$\int \cos^n \alpha \, d\alpha = \frac{\cos^{n-1} \alpha \sin \alpha}{n} + \frac{n-1}{n} \int \cos^{n-2} \alpha \, d\alpha$$

Przy trzykrotnym scałkowaniu i wstawieniu granicy całkowania  $\alpha_0$  otrzymamy

$$\begin{aligned} \delta_k = & \frac{1}{6} \cos^5 \alpha_0 \sin \alpha_0 + \frac{5}{24} \cos^3 \alpha_0 \sin \alpha_0 + \\ & + \frac{5}{16} \cos \alpha_0 \sin \alpha_0 + \alpha_0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

### 3.2.2. Ładunek wydłużony w kształcie walca

W przypadku ładunku wydłużonego w kształcie walca, którego oś usytuowana jest nad środkiem belki pod kątem  $90^\circ$  w odległości  $a$ , impuls jednostkowy tego ładunku wynosi

$$i = 2A \frac{C_w}{r} \cos^2 \alpha = \frac{2A C_w}{a} \cos^3 \alpha$$

$$x = a \operatorname{tg} \alpha ; \quad dx = \frac{a}{\cos^2 \alpha} d\alpha$$

Wartość całki wyniesie

$$\int_0^{\frac{1}{2}} i^2(x) dx = \int_0^{\alpha_0} \left( \frac{2AC_w}{a} \right)^2 \cos^6 \alpha \frac{a}{\cos^2 \alpha} d\alpha = \frac{4A^2 C_w^2}{a} \delta_w$$

gdzie

$$\delta_w = \int_0^{\alpha_0} \cos^4 \alpha \, d\alpha$$

Po podstawieniu wartości całki do wzoru (3.9) otrzymamy

$$\frac{\rho F^2 Q_r^d z}{2k_f^2 b^2} \varphi = \frac{4A^2 C_w^2}{a} \delta_w$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{8 k_f^2 b^2 A^2 C_w^2}{\rho F^2 Q_r^d z a} \delta_w \\ C_w &= \frac{F}{k_f b A} \sqrt{\frac{Q_r^d z a \rho}{8 \delta_w}} \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Wartość  $\delta_w$  można określić w oparciu o poprzednio podany wzór ogólny

$$\delta_w = \frac{1}{4} \cos^3 \alpha_0 \sin \alpha_0 + \frac{3}{8} (\cos \alpha_0 \sin \alpha_0 + \alpha_0) \quad (3.13)$$

Wielkość  $\delta_w$  i  $\delta_k$  zależy tylko od wartości  $a$ , jak wynika z danych tabeli 6.5 i wykresu dla  $\alpha_0 \leq 15^\circ$ , co odpowiada  $\frac{a}{l} > 1,87$ , można więc przyjąć z dostateczną dokładnością, że  $\delta_w = \delta_k$  i określać je z bardziej prostego wzoru (3.13).

### 3.2.3. Ładunek wydłużony w kształcie walca umieszczony równoległe do osi belki

Przy założeniu, że  $b \ll a$  (szerokość belki dużo mniejsza od odległości jej umieszczenia od ładunku), impuls jednostkowy dla każdego punktu belki wyniesie

$$i = \frac{2AC_w}{a} \cos^3 \alpha = \text{const}$$

ponieważ  $a = \text{const}$  i  $\alpha = \text{const}$ , to w związku z tym

$$\int_0^{\frac{1}{2}} i^2(x) dx = \left( \frac{2AC_w}{a} \cos^3 \alpha \right)^2 \int_0^{\frac{1}{2}} dx = \frac{2A^2 C_w^2 l}{a^2} \cos^6 \alpha$$

wobec tego

$$\frac{\rho F^2 z Q_r^d}{2k_f b^2} \varphi = \frac{2A^2 C_w^2 l}{a^2} \cos^6 \alpha$$

stąd

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{4k_f^2 b^2 A^2 C_w^2 l}{\rho F^2 z Q_r^d a^2} \cos^6 \alpha \\ C_w &= \frac{F a}{2k_f b A \cos^3 \alpha} \sqrt{\frac{\rho z Q_r \varphi}{l}} \end{aligned} \right\} (3.14)$$

Przy korzystaniu z wyprowadzonych wzorów należy mieć na uwadze to, że kąt obrotu  $\varphi$  w przegubie plastycznym będzie praktycznie zgodny z danymi obliczeniowymi wtedy, kiedy belka będzie miała dostateczną długość. W przeciwnym przypadku belka po uzyskaniu niepełnej deformacji zleci z podpór. Dlatego przy przeprowadzeniu obliczeń należy każdorazowo sprawdzić czy sama konstrukcja pozwala na osiągnięcie obliczeniowego odkształcenia. Można określić kąt obrotu  $\varphi$ , przy którym nastąpi zniszczenie konstrukcji na przykład przez spełnienie z podpór. Wtedy dla przyjętej deformacji określany jest jednoznacznie ciężar ładunku.

Drugim rodzajem niszczenia jest całkowite przerwanie elementu wykonanego z materiału ciągliwego pod wpływem działania wybuchu - który stosowany jest stosunkowo rzadko i tylko w tym przypadku kiedy element jest sztywno zamocowany na podporach nie ulegających zniszczeniu w czasie wybuchu.

Zgodnie ze wzorem (3.8) średnia gęstość energii kinetycznej w przekroju elementu wyniesie

$$q = \frac{K_E}{lF} = \frac{k_f^2 b^2}{\rho F^2 l} \int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx$$

Zniszczenie elementu nastąpi po spełnieniu warunku, kiedy gęstość energii kinetycznej będzie większa lub co najmniej równa pracy jednostkowej na zniszczenie materiału  $A_m$

$$\frac{k_f^2 b^2}{\rho F^2 l} \int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx \geq A_m$$

Dla ładunku kulistego

$$\int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx = \frac{A^2 C^2}{a^3} \sigma_k$$

stąd

$$C \geq \frac{F a^2 \sqrt{\rho A_m}}{k_f b \sqrt{A}} \sqrt{\frac{1}{a \sigma_k}} \quad (3.15)$$

Dla ładunku wydłużonego w kształcie walca

$$\int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx = \frac{4A^2 C^2}{a^2} \sigma_w$$

$$C_w > \frac{F a \sqrt{\rho A_m}}{2k_f b \sqrt{A}} \sqrt{\frac{1}{a \sigma_w}} \quad (3.16)$$

W przypadku kiedy element posiada osłabienie w przekroju (np. otwory), należy do wzorów (3.15) i (3.16) wprowadzić w miejsce przekroju poprzecznego  $F$  wartość obliczeniową  $F_0$

$$F_0 = \sqrt{F F_{0s}}$$

gdzie  $F_{0s}$  oznacza przekrój poprzeczny w miejscu osłabienia.

W tabeli 6.5 podano wartości  $\sqrt{\frac{1}{a \sigma_t}}$  oraz  $\sqrt{\frac{1}{a \sigma_w}}$  w zależności od kąta  $\alpha_0$  lub stosunku  $\frac{a}{l}$ .

### 3.3. Niszczenie elementów konstrukcji z materiałów niejednorodnych

Pod pojęciem materiałów niejednorodnych będziemy rozumieli te, które są wykonane przynajmniej z dwóch materiałów jednorodnych. Do nich należy zaliczyć przede wszystkim często używany w budownictwie materiał jakim jest żelbet i inne zbrojone tworzywa.

Charakter zniszczenia niejednorodnych materiałów będziemy rozpatrywać na przykładzie żelbetu.

W żelbecie kruchy beton jest zespolony ze sprężysto-plastyczną stalą zbrojeniową. Beton w żelbecie pracuje na ściskanie, natomiast stal zbrojeniowa na rozciąganie. Właściwości wytrzymałościowe tych dwóch materiałów wyraźnie różnią się między sobą, w związku z tym i zachowanie się ich pod obciążeniem wybuchowym będzie różne. Przy prawidłowo wykonanym elemencie żelbetowym odporność na dynamiczne działanie wybuchu jest większa niż odporność oddzielnie wziętych materiałów składowych.

Jeżeli w stosunku do zachowania się stali zbrojeniowej przy obciążeniu dynamicznym jest wystarczająco pełna przejrzystość w przebiegu zjawiska, to odnośnie drugiego składnika żelbetu niezbędne są pewne dodatkowe wyjaśnienia.

Żelbetowe elementy konstrukcji mogą być niszczone trzema zasadniczymi sposobami:

1) wybicie betonu z elementu żelbetowego i obnażenie zbrojenia na pewnym odcinku;

2) wybicie betonu z elementu żelbetowego z góry założonym odkształceniem obliczonym na wyłączenie tego elementu z całości konstrukcji;

3) przebicie elementu żelbetowego z wykruszeniem betonu na pewnym odcinku i przerwanie stali zbrojeniowej w założonym przekroju.

Pierwsze dwa sposoby niszczenia są najczęściej stosowane, natomiast trzeci sposób może mieć miejsce tylko przy spełnieniu szeregu specjalnych warunków.

### 3.3.1. Wybijanie betonu z elementów żelbetowych

Do naszych rozważań przyjmijmy belkę żelbetową (lub słup) o dowolnym, stałym przekroju poprzecznym na całej długości, która jest utwierdzona na końcach jak np. na rys.3.6. W danym przypadku nie będzie nas interesować sposób zamocowania belki lub słupa. Sposób zamocowania belki może być różny, począwszy od wolnego podparcia, zamocowania przegubowego, do pełnego utwierdzenia. Zadanie polega na tym, że należy na pewnym odcinku 2x wybić beton z elementu żelbetowego i odsłonić stal zbrojeniową.

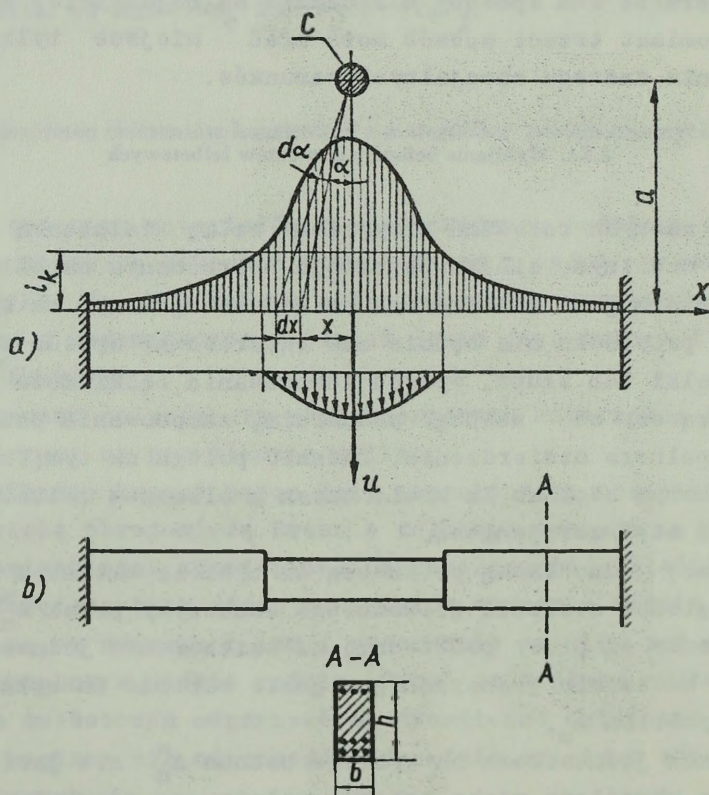
Pracę jednostkową potrzebną na wybicie betonu z jednostki objętości elementu żelbetowego oznaczymy przez  $A_m^w$  dla odróżnienia od pracy potrzebnej na zniszczenie jednostki objętości materiału jednorodnego, gdzie wartość ta była oznaczona symbolem  $A_m$ .

Praca jednostkowa na wybicie betonu  $A_m^w$  nie jest jednoznacznie określona marką betonu, zależy ona również od ilości i jakości stali zbrojeniowej oraz układu jej w elemencie żelbetowym. Ilość stali zbrojeniowej przyjęto określać współczynnikiem zbrojenia równym stosunkowi powierzchni poprzecz-

nego przekroju stali zbrojeniowej do powierzchni poprzecznego przekroju całego elementu żelbetowego

$$\mu_s = \frac{F_s}{F} \quad (3.17)$$

Zaleca się przy obliczaniu pracy jednostkowej  $A_m^w$  wychodzić z wielkości współczynnika zbrojenia, przy czym stosowne jest przyjęcie największej wartości tego współczynnika, który dla żelbetu według norm wynosi  $\mu_s \approx 0,07$ .



Rys.3.7. Schemat obliczeniowy przy niszczeniu elementu żelbetowego przez wbicie batonu na długości  $2x$ :  
a) belka w momencie obciążenia; b) belka po wybiciu betonu

Na rys.3.7 u góry na belce podany jest wykres obciążenia na odcinku  $2x$ , natomiast u dołu pod belką wykres początkowych prędkości cząsteczek wybijanego betonu. Prędkości początkowe cząsteczek są proporcjonalne do różnicy  $i - i_{kr}$ .

Liczenie pracy  $A_m^w$  tylko ze współczynnika zbrojenia  $\mu_s$  jest niewystarczające, należy jeszcze każdorazowo brać pod uwagę sposób rozmieszczenia zbrojenia w elemencie żelbetowym.

Najbardziej niekorzystnym przypadkiem przy tym sposobie niszczenia jest element żelbetowy zbrojony spiralnie i wzmocniony prętami podłużnymi, tworząc dość gęstą siatkę. W tym przypadku praca jednostkowa na wybitie betonu może być większa parę razy niż przy bardziej równomiernym rozmieszczeniu tego zbrojenia w całym przekroju.

Dla średnich warunków przy orientacyjnym określaniu  $A_m^w$  zaleca się stosować wzór (3.18).

$$A_m^w = 1,3 k_b^2 = 7,12 \frac{R_z^2}{E} \quad (3.18)$$

gdzie:  $k_b = 2,34 \frac{R_z}{\sqrt{E}}$  (zob.tabela 6.3);

$R_z$  - wytrzymałość betonu na zginanie;

$E$  - moduł sprężystości.

Przy wybijaniu betonu prędkość krytyczna cząsteczek może być określona wzorem

$$u_{kw} = \sqrt{\frac{2A_m^w}{\rho}} \quad (3.19)$$

gdzie  $\rho$  oznacza gęstość betonu.

Warunek wybijania betonu może być napisany w postaci nierówności

$$u_s \geq u_{kw} \quad (3.20)$$

Jeżeli na nieskończenie małej długości belki  $dx$  działa impuls jednostkowy  $i$ , a różniczka impulsu jednostkowego

$$di = k_f b i dx$$

gdzie:  $k_f$  - współczynnik uwzględniający kształt belki i jej położenie względem źródła generacji obciążenia;  
 $b$  - szerokość elementu

$$dm = \rho F dx$$

przy tym:  $\rho$  - gęstość żelbetu;

$F$  - przekrój poprzeczny elementu żelbetowego, to średnia prędkość cząsteczek żelbetu (betonu i stali) będzie wynosić

$$u_s = \frac{di}{dm} = \frac{k_f b i dx}{\rho F dx} = \frac{k_f b i}{\rho F} \quad (3.21)$$

Podstawiając wzory (3.19) i (3.21) do nierówności (3.20), po pewnych przekształceniach otrzymamy wzór na impuls jednostkowy potrzebny do wybicia betonu

$$\frac{k_f b i}{\rho F} \geq \sqrt{\frac{2A_m^w}{\rho}}$$

$$i \geq \frac{F}{k_f b} \sqrt{2 \rho A_m^w} \quad (3.22)$$

Jeżeli średnia prędkość cząsteczek betonu jest większa od krytycznej prędkości  $u_k$ , to beton będzie zniszczony i gdyby nie było stali zbrojeniowej, byłby wyrzucony poza element. Zbrojenie w tym przypadku stanowi przegrodę w wybijaniu betonu z elementu żelbetowego. Dlatego beton w żelbecie należy nie tylko zniszczyć, ale i rozdrobnić na takie fragmenty, które będą w stanie przejść przez siatkę stali zbrojeniowej z taką energią początkową, która pozwoliłaby pokonać siły tarcia cząsteczek betonu między sobą i stalą zbrojeniową.

Przy zamianie znaku nierówności we wzorze (3.22) na znak równości, otrzymany równanie na krytyczną wielkość impulsu jednostkowego, który określa granicę wybijania betonu w elemencie żelbetowym

$$i_k = \frac{F}{K_f b} \sqrt{2 \rho A_m^w} \quad (3.23)$$

### 3.3.2. Określenie ciężaru kulistego ładunku materiału wybuchowego

Impuls jednostkowy od kulistego ładunku materiału wybuchowego wynosi

$$i = \frac{AC}{a^2} \cos^4 \alpha = \frac{ACa^2}{(a^2 + x^2)^2}$$

Po podstawieniu wartości impulsu do nierówności (3.22) i przekształceniach otrzymamy wzór na ciężar kulistego ładunku materiału wybuchowego

$$\frac{AC}{a^2} \cos^4 \alpha \geq \frac{F}{K_f b} \sqrt{2 \rho A_m^w}$$

stąd

$$C \geq \frac{F}{K_f b A} \sqrt{2 \rho A_m^w} \frac{a^2}{\cos^4 \alpha}$$

lub

$$C \geq \frac{F a^2}{K_f b A} \sqrt{2 \rho A_m^w} \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 \quad (3.24)$$

Dla belek o poprzecznym przekroju prostokątnym usytuowanym jedną płaszczyzną w kierunku działania ładunku, przy  $k_f = 1$ , i  $F = bh$ , przyjmując dla żelbetu  $\rho = 245 \frac{\text{kG} \cdot \text{sek}^2}{\text{m}^4}$  otrzymamy

$$C \geq 50 k_b \frac{ha^2}{\cos^3 \alpha}$$

lub

$$C \geq 50 k_b h a^2 \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 \quad (3.25)$$

### 3.3.3. Określenie ciężaru wydłużonego ładunku materiału wybuchowego

Impuls jednostkowy od wydłużonego ładunku w kształcie walca wynosi

$$i_w = \frac{2AC_w}{a} \cos^3 \alpha = \frac{2AC_w a^2}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{2AC_w}{a} \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}$$

Po podstawieniu tej wartości do nierówności (3.22) i pewnych przekształceniach otrzymamy wzór na ciężar jednostki długości wydłużonego ładunku materiału wybuchowego

$$\frac{2AC_w}{a} \cos^3 \alpha \geq \frac{F}{k_f b} \sqrt{2 \rho A_m^w}$$

stąd

$$C \geq \frac{Fa}{2Ak_f b} \sqrt{2 \rho A_m^w} \frac{1}{\cos^3 \alpha}$$

lub

$$C_w \geq \frac{Fa}{2Ak_f b} \sqrt{2 \rho A_m^w} \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (3.26)$$

Dla belek o poprzecznym przekroju prostokątnym usytuowanych jedną płaszczyzną w kierunku działania ładunku, którego oś podłużna jest prostopadła do osi belki w rzucie poziomym, przy  $k_f = 1$ , i  $F = bh$ , przyjmując dla żelbetu

$$\rho = 245 \frac{\text{kgsek}^2}{\text{m}^4}$$

otrzymamy

$$C_w \geq 25 k_b \frac{ha}{\cos^3 \alpha}$$

lub

$$C_w \geq 25 k_b ha \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (3.27)$$

Wzory (3.25) i (3.27) mogą być również stosowane przy wybijaniu betonu z belek żelbetowych, których przekrój poprzeczny ograniczony jest równymi bokami o ilości boków  $n \geq 4$  niezależnie od orientacji ścian ograniczających belkę względem ładunku, przy czym wielkością  $H$  w tym przypadku będzie średnica okręgu wpisanego w przekrój.

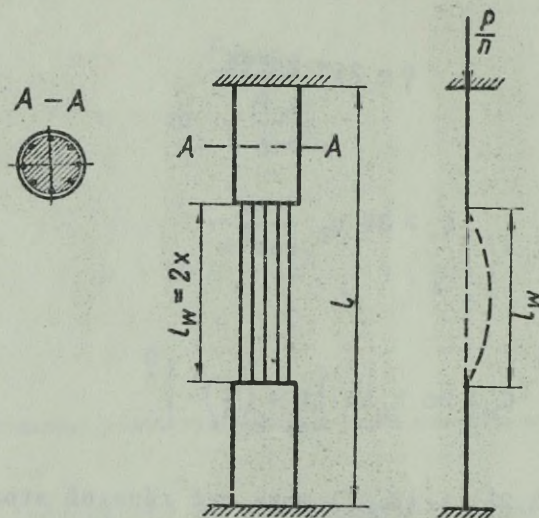
Przy rozpatrywanym sposobie niszczenia mogą zaistnieć cztery przypadki odkształcenia elementu wywołane wpływem działania obciążenia zewnętrznego:

- 1) osiowe ściskanie;
- 2) zginanie;
- 3) rozciąganie;
- 4) kombinowane działanie.

W pierwszym przypadku, po wybijaniu betonu na odcinku  $l_w = 2x$  (zob. rys. 3.8) osiowo działająca siła będzie działała na pręty zbrojenia wywołujące w nich naprężenia

$$\sigma = \frac{P}{\mu_s F} = \frac{\sigma_z}{\mu_s}$$

przy założeniu, że naprężenia w stali zbrojeniowej nie przewyższają naprężeń w betonie (choć w rzeczywistości  $\sigma_s > \sigma_b$  i  $\sigma > \frac{\sigma_s}{\mu_s}$ ).



Rys.3.8. Schemat do określania niezbędnej długości odcinka żelbetowego elementu ściskanego, z którego należy wybić beton

Ponieważ występujące naprężenia w elemencie żelbetowym  $\sigma_z = \frac{P}{F}$  zgodnie z normami nie powinny przekraczać określonych naprężeń dla betonu wynoszących

$$R = k_0 R_c$$

gdzie:  $k_0$  - współczynnik jednorodności betonu, to działające naprężenie w prętach stali zbrojeniowej będzie wynosić

$$\sigma = \frac{k_0 R}{\mu_s} \quad (3.28)$$

Odształcenie elementu nastąpi wtedy, kiedy naprężenie w stali zbrojeniowej wywołane siłami ściskającymi będzie większe od naprężenia krytycznego  $\sigma_k$ . Dla rozpatrywanego

przypadku, przy sztywnym zamocowaniu obu końców zbrojenia, naprężenie krytyczne według wzoru Eulera wynosi

$$\sigma_k = 4 \pi^2 \frac{E_s I_{\min}}{F_{pr} l_w^2}$$

gdzie:  $E_s$  - moduł sprężystości stali zbrojeniowej;

$I_{\min}$  - moment bezwładności, dla prętów o przekroju kołowym o średnicy  $d_{pr}$ ;

$$I_{\min} = I = \frac{\pi d_{pr}^4}{64};$$

$F_{pr}$  - powierzchnia poprzecznego przekroju pręta zbrojenowego  $F_{pr} = \frac{\pi d_{pr}^2}{4}$ ;

$$\sigma_k = 4 \pi^2 \frac{E_s \frac{\pi d_{pr}^4}{64}}{\frac{\pi d_{pr}^2}{4} l_w^2} = \frac{\pi^2 E_s d_{pr}^2}{4 l_w^2} \quad (3.29)$$

Porównując wartość naprężenia (3.28) z naprężeniami określonymi z wyrażenia (3.29) mamy długość odcinka, na którym musi być wybity beton, aby nastąpiło zniszczenie elementu żelbetowego

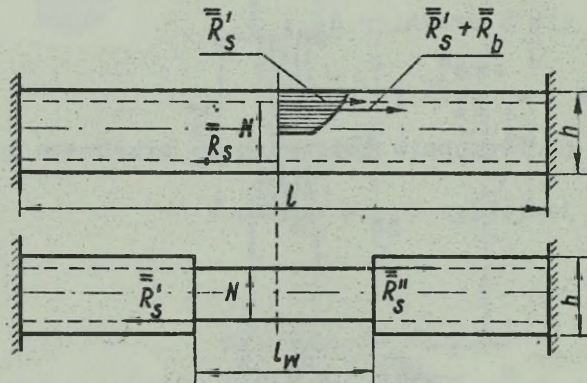
$$\frac{k_o R}{\mu_s} = \frac{\pi^2 E_s d_{pr}^2}{4 l_w^2}$$

stąd

$$l_w = \frac{\pi d_{pr}}{2} \sqrt{\frac{\mu_s E_s}{k_o R}} \quad (3.30)$$

Wzór (3.30) określa minimalną długość odcinka elementu żelbetowego ściskanego osiowo, z którego należy wybić beton aby uzyskać pewne zniszczenie. Niszczenie w tym przypadku następuje pod działaniem obciążenia zewnętrznego lub pod wpływem działania ciężaru własnego.

Przypadek drugi - element w momencie wybijania betonu pracuje na zginanie.



Rys.3.9. Schemat do określania długości odcinka elementu żelbetowego, z którego należy wybić beton przy zginaniu

Jeżeli element żelbetowy do momentu wybijania betonu pracował na zginanie i w rozpatrywanym przekroju działał moment zginający.

$$M = \bar{R}_s z' = (\bar{R}'_s + \bar{R}_b) z'$$

gdzie:  $\bar{R}'_s$  - siła działająca w prętach zbrojeniowych w strefie ściskanej;

$\bar{R}_s$  - siła działająca w prętach zbrojeniowych w strefie rozciąganej;

$\bar{R}_b$  - siła działająca w strefie ściskanej betonu;

$z'$  - ramię pary sił;

$z$  - ramię pary sił po wybijaniu betonu.

$$\bar{R}_s = k_o Q_r F_s \quad (F_s - \text{powierzchnia stali zbrojenio-} \\ \text{wej w strefie rozciąganej})$$

$$\bar{R}'_s = k_o Q_r F'_s \quad (F'_s - \text{powierzchnia stali zbrojenio-} \\ \text{wej w strefie ściskanej})$$

$$\bar{R}_b = k_o R_b \frac{F}{Z} \quad (F - \text{powierzchnia przekroju całego} \\ \text{elementu})$$

to po wybiciu betonu moment zginający może być przeniesiony tylko przez stal zbrojeniową, przy tym siła działająca w ściskanej i rozciąganej stali zbrojeniowej będzie równa

$$\bar{R}''_s = \frac{M}{Z} = \frac{\bar{R}_s Z'}{Z} = (\bar{R}'_s + \bar{R}_b) \frac{Z'}{Z}$$

Należy zauważyć, że przeważnie  $\frac{Z'}{Z} < 1$ , a w związku z tym siła działająca w zbrojeniu rozciągającym  $\bar{R}''_s$  będzie mniejsza

$$\bar{R}''_s < \bar{R}_s$$

W większości przypadków przed wybiciem betonu nie wiemy jaka część zbrojenia znajduje się w strefie ściskanej, wiadome jest tylko to, że nie może ona przewyższać połowy całości zbrojenia. Dlatego do naszych obliczeń można przyjąć

$$F_s(\text{ściskanej}) = F_r(\text{rozciąganej}) = \frac{F_s}{2} = \mu_s \frac{F}{2}$$

Siła działająca w strefie rozciąganej po wybiciu betonu będzie równa

$$\begin{aligned} \bar{R}''_s &= \left( k_{os} Q_r \frac{\mu_s F}{2} + k_{ob} R_b \frac{F}{2} \right) \frac{Z'}{Z} = \\ &= k_{os} Q_r \frac{\mu_s F}{2} \left[ 1 + \frac{k_{ob} R_b}{k_{os} Q_r} \right] \frac{Z'}{Z} \end{aligned}$$

Naprężenie działające w stali zbrojeniowej wynosi

$$\sigma = \frac{\bar{R}_s^n}{\alpha_s \frac{F}{z}} = k_{os} Q_r \left[ 1 + \frac{k_{ob} R_b}{k_{os} Q_r} \right] \frac{z'}{z}$$

Pod działaniem naprężenia  $\sigma$  pręty w strefie ściskanej przes-  
taną przenosić obciążenie w momencie kiedy

$$\sigma > \sigma_k$$

wtedy element obciążany utraci stateczność

$$k_{os} Q_r \left[ 1 + \frac{k_{ob} R_b}{k_{os} Q_r} \right] \frac{z'}{z} = \frac{\pi^2 E_s d^2}{4 l_w^2} \frac{Pr}{z}$$

Z powyższego równania znajdujemy niezbędną długość odcinka, z  
którego należy wybić beton, aby element pracujący na zgina-  
nie był zniszczony

$$l_w = \frac{\pi d}{2} \frac{Pr}{z} \sqrt{\frac{E_s z}{k_{os} Q_r \left[ 1 + \frac{k_{ob} R_b}{k_{os} Q_r} \right] z'}} \quad (3.31)$$

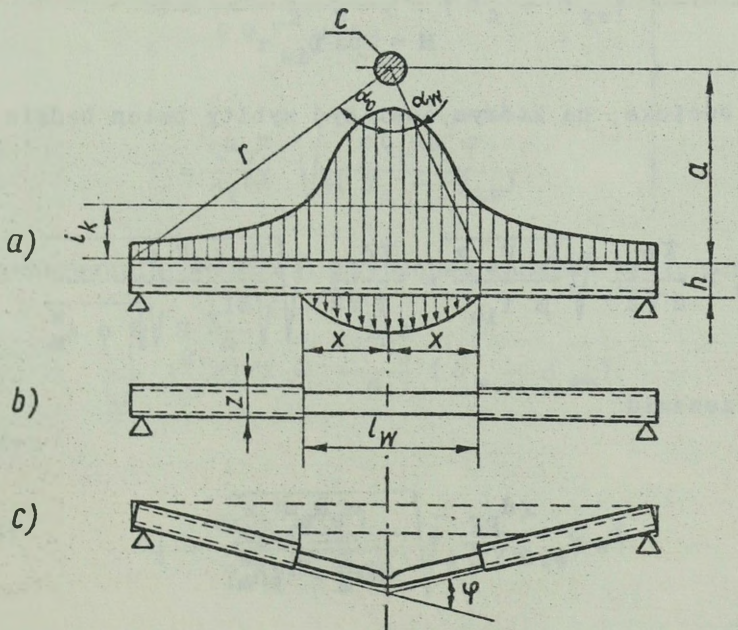
Nośność elementów żelbetowych pracujących na rozciąganie (np. ściągi) po wybiciu z nich betonu prawie się nie zmienia, ponieważ do momentu wybicia betonu i po jego wybi-  
ciu naprężenia rozciągające przenoszone są przez stal zbro-  
jeniową. Beton w takich elementach żelbetowych stanowi otu-  
linę stali zbrojeniowej chroniącą ją od korozji. W takich  
przypadkach chcąc zniszczyć element żelbetowy, należy prze-  
ciąć go całkowicie.

Przy jednoczesnym kombinowanym działaniu naprężeń (np.  
zginanie, ściskanie itp.) bierze się pod uwagę te największe.  
W tym przypadku podstawowymi siłami, które powodują zniszcze-  
nie są siły zewnętrzne oraz siły bezwładności.

3.3.4. Wybijanie betonu z elementów żelbetowych z założonym odkształceniem stali zbrojeniowej

Niszczenie elementów żelbetowych, które do momentu wybuchu są obciążone tylko nieznacznymi siłami zewnętrznymi, dokonywane jest oddziaływaniem wybuchu. Najczęściej będą to belki (elementy pracujące na zginanie) obciążone tylko ciężarem własnym.

Dla osiągnięcia założonego odkształcenia należy zapewnić wybite betonu na odcinku  $l_w = 2x$ , aby naprężenia w ścisnianej stali zbrojeniowej przekroczyły wartość krytyczną przy zginaniu oraz niezniszczona część belki otrzymała niezbędną energię kinetyczną, potrzebną do odkształcenia zbrojenia.



Rys. 3.10. Schemat objaśniający niszczenie elementów żelbetowych przez wybite betonu z założoną deformacją:  
 a) belka w trakcie początkowego działania obciążenia; b) belka po wybitiu betonu na odcinku  $2x$ ; c) położenie belki po osiągnięciu odkształcenia

Do określenia potrzebnej długości wybicia betonu wychodzimy z warunku

$$G = \frac{M_x}{F \frac{z}{s}} = \frac{\beta i_{1w}}{F \frac{z}{s}} \geq G_{kr} = \frac{\pi^2 E_s d_{pr}^2}{4 l_w^2}$$

gdzie:  $\beta = \sqrt{\frac{EI}{m} \gamma}$  ;

$i_1$  - impuls przypadający na jednostkę długości belki;  
 $m$  - masa jednostki długości belki.

Na granicy strefy wybijania betonu działa moment zginający określany wzorem

$$M = \beta i_{1w}$$

Długość odcinka, na którym musi być wybity beton będzie równa

$$l_w \geq \frac{\pi d_{pr}}{2 \sqrt{2}} \sqrt{\frac{E_s F s z}{\beta i_{1w}}} = \frac{\pi d_{pr}}{2 \sqrt{2}} \sqrt{\frac{E_s \mu_s F z}{\sqrt{\frac{EI}{m} \gamma} F \sqrt{2} \varrho A_m^w}}$$

po uproszczeniu

$$l_w \geq \frac{\pi d_{pr}}{2 \sqrt{2}} \sqrt{\frac{\mu_s E_s z}{\sqrt{2} \frac{\varrho}{m} EI_y A_m^w}} \quad (3.32)$$

Po utracie zdolności do przenoszenia obciążenia przez stal zbrojeniową w strefie ściskanej, zbrojenie w obu strefach może pracować tylko na zginanie, przy tym kąt obrotu belki może być określony z wyrażenia

$$\frac{\varrho Q_r F^2 \mu_s^2 z}{2 k_f^2 b^2} = \int_{\frac{l_w}{2}}^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx$$

Przy generowaniu obciążenia wybuchem ładunku kulistego

$$\int_{\frac{l_w}{2}}^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx = \frac{A^2 C^2}{a^3} \int_0^{\alpha_w} \cos^6 \alpha d\alpha = \frac{A^2 C^2}{a^3} (\delta_k - \delta_{kw})$$

gdzie

$$\delta_{kw} = \int_0^{\alpha_w} \cos^6 \alpha d\alpha$$

w związku z tym

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{2k_f^2 b^2 A^2 C^2}{\rho Q_r F^2 \mu_s^2 z a^3} = (\delta_k - \delta_{kw}) \\ c &= \frac{\mu_s F}{k_f b A} \sqrt{\frac{\rho Q_r z a^3 \varphi}{2(\delta_k - \delta_{kw})}} \end{aligned} \right\} (3.33)$$

Przy generowaniu obciążenia wybuchem ładunku wydłużonego

$$\int_{\frac{l_w}{2}}^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx = \frac{4A^2 C_w^2}{a} (\delta_w - \delta_{ww})$$

przy tym

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{8k_f^2 b^2 A^2 C_w^2}{\rho Q_r F^2 \mu_s^2 z a} (\delta_w - \delta_{ww}) \\ c_w &= \frac{\mu_s F}{2k_f b A} \sqrt{\frac{\rho Q_r z a \varphi}{2(\delta_w - \delta_{ww})}} \end{aligned} \right\} (3.34)$$

### 3.3.5. Przebijanie elementów żelbetowych

Niszczanie elementów żelbetowych przez przebicie, przy którym jest niszczone nie tylko beton, ale i stal zbrojeniowa, może być dokonywane tylko w niektórych przypadkach.

Jeżeli element jest w postaci belki wolnopodpartej, to przy obciążeniu jej odpowiednio silną falą uderzeniową generowaną wybuchem ładunku MW z odległości, może spowodować jedynie wybite beton i pewne odkształcenie stali zbrojenio-wej z jednoczesnym zrzuceniem elementu z podpór, jednakże belka nie będzie przebita. Taki sam efekt osiągnie się przy obciążeniu belki zamocowanej przegubowo.

Ten sposób niszczenia może być urzeczywistniony tylko w przypadku, kiedy oba końce belki są mocno utwierdzone, podpory sztywne i nieprzemieszczające się w trakcie obciążania.

Tak samo jak przy wybijaniu betonu, przy całkowitym przebicciu, należy wszystkim cząsteczkom na odcinku przebiccia nadać takie prędkości, które będą większe od prędkości krytycznej. Różnica między wybijaniem betonu, a całkowitym przebicciem polega na tym, że w pierwszym przypadku krytyczna prędkość była funkcją ( $A_m^w$ ) pracy jednostkowej na wybite, natomiast przy całkowitym przebicciu prędkość krytyczna jest funkcją ( $A_m$ ) pracy jednostkowej na zniszczenie jednostki objętości metalu (zbrojenia). Ponieważ początkowe prędkości cząsteczek tak betonu jak i stali zbrojeniowej są jednakowe, to do osiągnięcia efektu zniszczenia, prędkości te powinny spełniać nierówność

$$u_p \geq u_k$$

Jeżeli na nieskończenie małym odcinku  $dx$  belki o szerokości  $b$  działa impuls jednostkowy "i", to obciążenie elementu  $dm$  będzie wynosić

$$dI = k_f b i dx$$

Masa elementarna belki

$$dm = (\rho_s F_s + \rho_b F_b) dx$$

gdzie:  $\rho_s$  - gęstość stali zbrojeniowej;  
 $\rho_b$  - gęstość betonu;  
 $F_s$  - przekrój poprzeczny stali zbrojeniowej;  
 $F_b$  - przekrój poprzeczny betonu.

Ponieważ

$$F_s + F_b = F \quad \text{a} \quad F_s = \mu F$$

to

$$dm = \left[ \rho_s \mu F + \rho_b (F - \mu F) \right] dx = \rho_s F \left[ \mu \left( 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_b}{\rho_s} \right] dx$$

Początkowa prędkość betonu i stali zbrojeniowej

$$u_p = \frac{dI}{dm} = \frac{k_f b i dx}{\rho_s F \left[ \mu \left( 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_b}{\rho_s} \right] dx}$$

Zgodnie z podaną wyżej nierównością prędkość początkowa powinna być większa lub równa prędkości krytycznej dla stali zbrojeniowej

$$\frac{k_f b i}{\rho_s F \left[ \mu \left( 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_b}{\rho_s} \right]} \geq \sqrt{\frac{2A_m}{\rho_s}}$$

stąd

$$i \geq \frac{F}{k_f b} \left[ \mu_s \left( 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_b}{\rho_s} \right] \sqrt{2 \rho_s A_m} \quad (3.35)$$

Dla uzyskania zerwania zbrojenia należy zapewnić równomierny rozkład obciążenia na całej długości odsłoniętego zbrojenia, tj. praktycznie na całej długości belki. Warunek ten najprościej można spełnić działając ładunkiem wydłużonym, rozmieszczonym równolegle do osi belki. Od wybuchu takiego ładunku impuls jednostkowy na całej długości belki będzie jednakowy

$$i_w = \frac{2 A C}{a} w$$

Po wstawieniu do nierówności (3.35) otrzymamy wzór na ciężar jednostki długości ładunku

$$C_w = \frac{F a}{2 K_f b A} \left[ \mu_s \left( 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_b}{\rho_s} \right] \sqrt{2 \rho_s A_m} \quad (3.36)$$

Przy stosowaniu innych ładunków dających nierównomierne obciążenie lepiej jest wychodzić z bilansu energii, tj. żeby średnia gęstość kinetycznej energii przekazanej zbrojeniu była większa lub co najmniej równa pracy jednostkowej niszczącej uzbrojenie.

Zgodnie z rozważaniami poprzednimi energia kinetyczna wynosi

$$\begin{aligned} K_E &= \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \frac{\mu}{2} i^2 dx = \frac{K_f^2 b^2 F^2 \rho_s \left[ \mu_s \left( 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_b}{\rho_s} \right]}{2 F^2 \rho_s^2 \left[ \mu_s \left( 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_b}{\rho_s} \right]^2} \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} i^2(x) dx = \\ &= \frac{K_f^2 b^2}{\rho_s F \left[ \mu_s \left( 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_b}{\rho_s} \right]} \int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx \end{aligned}$$

Gęstość energii kinetycznej

$$q = \frac{K_E}{V} = \frac{K_E}{\mu_s F l} = \frac{k_f^2 b^2}{\mu_s F^2 l \rho_s \left[ \mu_s \left( 1 - \frac{\rho b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho b}{\rho_s} \right]} \int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx \quad (3.37)$$

Zbrojenie będzie zniszczone jeżeli gęstość energii kinetycznej będzie większa lub równa pracy potrzebnej na niszczenie materiału zbrojenia

$$q \geq A_m$$

$$\frac{k_f^2 b^2}{\mu_s F^2 l \rho_s \left[ \mu_s \left( 1 - \frac{\rho b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho b}{\rho_s} \right]} \int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx \geq A_m$$

Dla ładunku kulistego

$$\int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx = \frac{A^2 C^2}{a^3} \sigma_k$$

Stąd ciężar ładunku kulistego do przebycia elementu żelbetowego wyniesie

$$C \geq \frac{F}{k_f b A} \sqrt{\frac{\mu_s}{\sigma_k} A_m l a^3 \rho_s \left[ \mu_s \left( 1 - \frac{\rho b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho b}{\rho_s} \right]} \quad (3.38)$$

Przy stosowaniu wydłużonego ładunku w kształcie walca rozmieszczonego w odległości "a" prostopadle do osi belki wzór na ciężar jednostki długości materiału wybuchowego będzie miał postać (3.39)

$$\int_0^{\frac{l}{2}} i^2(x) dx = \frac{4A^2 C^2}{a^3} \sigma_w$$

$$C_w \geq \frac{F}{2k_f bA} \sqrt{\frac{\mu_s}{\sigma_w} A_m l a \rho_s \left[ \mu_s \left( 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \right) + \frac{\rho_b}{\rho_s} \right]} \quad (3.39)$$

Wzory (3.38) i (3.39) dają możliwość określenia ciężarów ładunków do przebijania elementów żelbetowych przy spełnieniu warunku, że belka będzie sztywno utwierdzona na podporach nie niszczonych i nie przemieszczających się w trakcie obciążenia.

Ponieważ stosunek gęstości betonu do gęstości stali zbrojeniowej dla większości marek betonu jest stały i średnio wynosi

$$\frac{\rho_b}{\rho_s} = \frac{224}{800} = 0,28$$

to przy założeniu  $\mu_s = 0,07$  i prostokątnym poprzecznym przekroju belki,  $k_f = 1$ ;  $F = bh$ , wzory (3.38) i (3.39) będą miały postać

$$C > 0,152 \frac{ha^2}{A} \sqrt{\frac{\rho_s A_m l}{\sigma_k a}}$$

$$C_w \geq 0,076 \frac{ha}{A} \sqrt{\frac{\rho_s A_m l}{\sigma_w a}}$$

Na przykład po podstawieniu wartości  $A_m$  dla stali ST-3 i wartości  $A$  dla trotylu otrzymamy

$$A_m = A_m^s K_A^d = 1100 \cdot 10^4 \cdot 1,5 = 1,65 \cdot 10^7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$A = \frac{\mu}{2 \alpha g} = 43 \text{ sek}; \quad \rho_s = 800 \frac{\text{kgsek}^2}{\text{m}^4}$$

$$C > 400 \text{ ha}^2 \sqrt{\frac{1}{a \delta_k}}$$

$$C_w \geq 200 \text{ ha} \sqrt{\frac{1}{a \delta_w}}$$

Dla ułatwienia korzystania z wzorów uproszczonych wartości  $\sqrt{\frac{1}{a \delta_k}}$  i  $\sqrt{\frac{1}{a \delta_w}}$  w funkcji  $\alpha_0$  lub  $\frac{a}{I}$  podane są w tabeli (6.5).

## Rozdział 4

### BEZPIECZNE ŁADUNKI

#### 4.1. Bezpieczne ładunki kontaktowe

W praktyce minerskiej oprócz niszczenia spotykane są również przypadki kiedy zachodzi konieczność określenia ładunków kontaktowych, które przyłożone do elementów konstrukcji w czasie wybuchu nie powinny ich zniszczyć. Zadanie takie może mieć miejsce na przykład przy konstruowaniu elementów roboczych różnych mechanizmów narażonych w czasie pracy na działanie wybuchu ładunku MW. Elementy konstrukcji tych mechanizmów wykonywane są przeważnie z odpowiednio wytrzymałych gatunków stali.

Przy określaniu bezpiecznych kontaktowych ładunków wychodzi się z takich samych założeń jak przy określaniu niszczących ładunków kontaktowych.

Niech na element działa obciążenie impulsowe rozmieszczone jak na rys.4.1.

Po przeciwnej stronie elementu maksymalną prędkość otrzymają cząsteczki w miejscu obciążenia  $i_{\max}$ . Na podstawie przyjętego schematu obliczeniowego można napisać, że prędkość maksymalna wyniesie

$$u_{\max} = \frac{i_{\max}}{\rho h} \left( \frac{h}{2h} \right)^{\nu-1}$$

gdzie:  $i_{\max}$  - maksymalny impuls jednostkowy;

- $\rho$  - gęstość materiału obciążanego;
- $h$  - grubość płyty obciążanej;
- $\nu$  - wykładnik potęgi. Dla ładunku skupionego  $\nu = 3$ ; dla ładunku wydłużonego  $\nu = 2$ ; dla ładunku płaskiego  $\nu = 1$ .

Aby po przeciwnej stronie (od miejsca obciążenia) płyty nie nastąpił odłam, maksymalna prędkość cząsteczki nie może być większa od prędkości krytycznej, przy której dany materiał jest niszczony

$$u_{\max} \leq u_k = \sqrt{\frac{2A_m}{\rho}}$$

lub

$$i_{\max} \leq 2^{\nu-1} \sqrt{2 \rho A_m h}$$

Impuls jednostkowy działający w punkcie płyty znajdującym się w odległości  $\chi$  do najbliższej krawędzi ładunku jest równy

$$i = \chi \rho_0 u_0$$

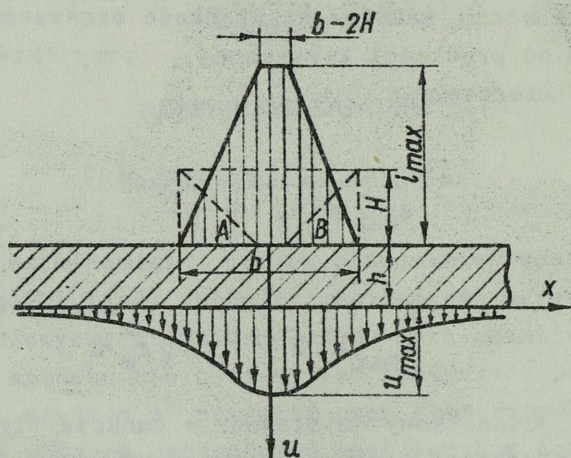
Ciśnienie na styku materiału wybuchowego z płytą wynosi  $p_0$ , natomiast czas działania  $\tau = \frac{\chi}{w_0}$

$$i = \int_0^{\tau} p dt = p_0 \frac{\chi}{w_0}; \quad w_0 = \frac{p_0}{\rho_0 u_0}$$

$$i = \frac{p_0 \chi}{\frac{p_0}{\rho_0 u_0}} = \chi \rho_0 u_0$$

Z przytoczonych wartości w tabeli 6.7 wynika, że stosunek impulsów obliczonych do impulsów uzyskanych eksperymentalnie waha się w granicach

$$\frac{i_{obl}}{i_{eks}} \approx 0,796 \pm 0,021 \approx 0,8$$



Rys.4.1. Schemat do określania bezpiecznego ładunku kontaktowego

Biorąc pod uwagę, że faktycznie działający impuls na przegrodę jest większy od obliczeniowego w stosunku

$$\frac{i_{obl}}{i_{eks}} = 0,8 = \frac{4}{5}$$

możemy napisać

$$i_{max} = \frac{5}{4} \chi \rho_0 u_0$$

a więc

$$\frac{5}{4} \chi \rho_0 u_0 \leq 2^{\nu-1} \sqrt{2 \rho A_m} h$$

stąd znajdujemy

$$\frac{\chi}{h} \leq \frac{2^{\nu-1} 4 \sqrt{2 \rho A_m}}{5 \rho_0 u_0}$$

lub

$$\frac{\chi}{h} \leq \frac{2^{\nu+1}}{15\pi} \frac{M_0}{\delta_{MW}}$$

gdzie:  $A = \frac{u_0}{2\pi g}; \quad M_0 = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\rho A_m}}{A}$

Obliczeniowa wartość  $M_0$  jest mniejsza od wartości  $M$  (przy kontaktowych ładunkach niszczących), chociaż określone są według tego samego wzoru. W poprzednim przypadku wartość  $M$  była liczona na gwarantowane przebiecie, natomiast w rozpatrywanym przypadku element nie może być niszczone. Dla niszczących ładunków kontaktowych przy określaniu  $M$  wprowadza się maksymalną wartość danego materiału i współczynnik

$$k_o^p = \frac{R_r \max}{R_r \text{ norm}}$$

jednorodności materiału na gwarantowane zniszczenie. Przy określaniu  $M_0$  bierzemy minimalną wytrzymałość materiału, dla której współczynnik jednorodności materiału

$$k_o = \frac{R_r \min}{R_r \text{ norm}}$$

$$\frac{k_o}{k_o^p} = \frac{k_o}{2(1+\delta)k_o} = \frac{1}{2(1+\delta)\frac{1}{k_o} - 1}$$

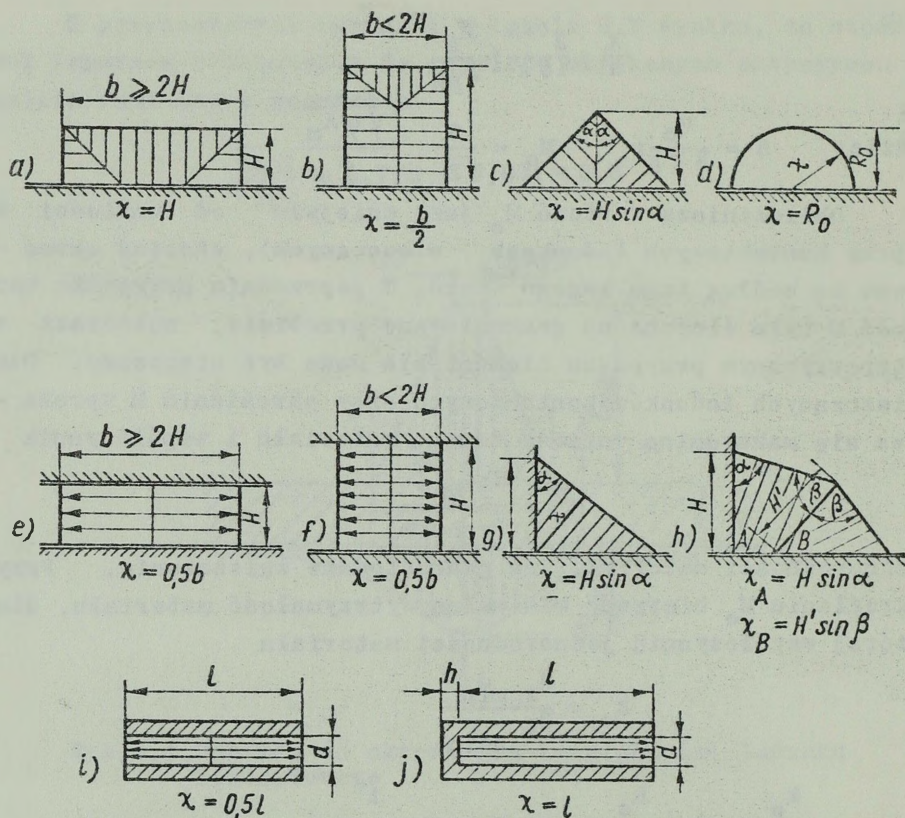
w związku z tym

$$\frac{M_0}{M} = \frac{1}{\left[2(1+\delta)\frac{1}{k_o} - 1\right]^{\frac{1}{2}}}$$

wobec tego stosunek

$$\frac{\chi}{h} \leq \frac{2^{\nu+1} M}{15\pi\delta_{MW} \left[2(1+\delta)\frac{1}{k_o} - 1\right]^{\frac{1}{2}}}$$

Wyprowadzony wzór daje możliwość określenia charakterystycznego wymiaru ładunku  $\chi$ . Znając wartość  $\chi$  dla danego kształtu ładunku, możemy określić wielkości bezpiecznego ładunku kontaktowego, który nie będzie niszczył projektowanego elementu.



Rys.4.2. Schematy do określania wartości  $\chi$ :

a, b, c, d) ładunki kontaktują z elementem obciążonym tylko jedną powierzchnią, rozlot gazów odbywa się prostopadle do swobodnych powierzchni ładunków; e, f) ładunek kontaktuje z dwóch stron, rozlot gazów odbywa się prostopadle do pozostałych bocznych powierzchni; g, h) ładunki rozmieszczone są w narożnikach elementów obciążonych, rozlot gazów odbywa się prostopadle do pozostałych swobodnych powierzchni; i) ładunek rozmieszczony w grubościennym cylindrze, rozlot gazów odbywa się w dwóch kierunkach; j) ładunek rozmieszczony w grubościennym cylindrze z dnem, rozlot gazów odbywa się w kierunku swobodnej powierzchni

#### 4.2. Technika określania bezpiecznych odległości i bezpiecznych ładunków przy wybuchu w powietrzu

W praktyce minerskiej mamy do czynienia nie tylko z ładunkami i odległościami, które dają nam gwarancję wykonania pracy zniszczenia elementów konstrukcji lub danego ośrodka (bez względu na efekty uboczne), ale także z ładunkami i odległościami, które przy wykonaniu określonej pracy będą jednocześnie bezpieczne dla pewnych przedmiotów otaczających miejsce, w którym dokonywany jest wybuch.

Mając na względzie bezpieczeństwo znajdujących się w otoczeniu miejsca wybuchu obiektów, problem ten można rozpatrywać z dwóch punktów widzenia, a mianowicie:

1) w jakiej minimalnej odległości od miejsca wybuchu ładunku MW o określonych kształtach i danym usytuowaniu mogą znajdować się elementy konstrukcji o odpowiednich parametrach wytrzymałościowych;

2) jaki maksymalny ciężar ładunku o określonym kształcie i wiadomym usytuowaniu może być użyty, którego wybuch nie spowoduje zniszczeń elementów konstrukcji rozmieszczonych w pewnych odległościach.

W pierwszym przypadku będziemy mieli do czynienia z bezpieczną odległością, natomiast w drugim - z bezpiecznym ładunkiem.

Tak w jednym jak i w drugim przypadku naprężenia w rozpatrywanych elementach konstrukcji, powstające pod wpływem działania na nie obciążenia wybuchowego, nie powinny przekroczyć wartości dopuszczalnych. Warunek ten może być określony równaniem

$$R^d = k_0 K_R^d R \quad (4.1)$$

gdzie:  $R$  - naprężenia normatywne;

$k_0$  - współczynnik jednorodności materiału, (w danym przypadku przy określaniu bezpiecznej odległości i bezpiecznego ładunku  $k_0 < 1$ );

$K_R^d$  - współczynnik obciążenia dynamicznego.

Wprowadzając do obliczeń współczynnik dynamicznego obciążenia przy określaniu bezpiecznej odległości lub bezpiecznego ładunku, należy mieć na uwadze to, że w rozpatrywanych przypadkach dynamiczny charakter obciążenia będzie mniej wyraźny a zatem do obliczeń należy brać  $K_R^d$  średnie.

Podstawowa zależność, według której można określić bezpieczną odległość i bezpieczny ładunek, wyraża się wzorem

$$\bar{\sigma} = \frac{M}{W} = \frac{\beta k_f b 1}{W} \leq k_o K_R^d R \quad (4.2)$$

Wartość impulsu jednostkowego, która spełnia tę nierówność wynosi

$$1 \leq \frac{k_o K_R^d R W}{E_f b \beta} \quad (4.3)$$

gdzie:  $k_f$  - współczynnik uwzględniający kształt obciążonego elementu;

$W$  - wskaźnik wytrzymałości;

$M$  - moment zginający;

$b$  - bok względnie średnica elementu

$$\beta = \sqrt{\frac{E J}{m}}$$

przy tym:  $E$  - moduł sprężystości;

$J$  - moment bezwładności;

$m$  - masa jednostki długości elementu.

Nierównością (4.3) można posługiwać się mając do czynienia z elementami konstrukcyjnymi, które są wykonane z różnych materiałów, ponieważ wartości obliczeniowe ( $k_o K_R^d R$ ) dla wszystkich materiałów znajdują się w granicach liniowej zależności między naprężeniami a odkształceniami. Dla materiałów ciągliwych za normatywną wytrzymałość przyjmuje się granicę plastyczności  $Q_f$ .

4.2.1. Bezpieczne odległości i bezpieczne ładunki przy wybuchu skupionych ładunków w powietrzu

Przy określaniu bezpiecznych ładunków i bezpiecznych odległości w strefie bliższej zapisanej nierównością

$$1 \leq \frac{r}{R_0} \leq 18 \quad (4.4)$$

gdzie:  $r$  - odległość mierzona od środka ładunku.

$R_0$  - promień ładunku MW.

Maksymalny impuls jednostkowy od wybuchu kulistego ładunku działającego na element konstrukcji można określić wzorem

$$i = \frac{A C}{a^2} \quad (4.5)$$

gdzie:  $A$  - wartość stała zależna od rodzaju MW (dla TNT wynosi około 50 sek);

$C$  - ciężar ładunku skupionego MW;

$a$  - najkrótsza odległość od środka ładunku do elementu obciążonego.

Podstawiając te wartości do nierówności (4.3) otrzymamy wzory, którymi można stosunkowo dokładnie określić bezpieczną odległość lub bezpieczny ładunek.

$$a_{\text{bezp}} = \sqrt{\frac{A \beta k_f b C}{k_0 K_R^d R W}} \quad (4.6)$$

$$C_{\text{bezp}} = \frac{k_0 K_R^d R W}{A k_f \beta b} a^2 \quad (4.7)$$

Z przytoczonych wzorów wynika, że w strefie bliższej wielkość bezpiecznej odległości dla elementów konstrukcji wykonanych z jednego materiału jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z ciężaru ładunku.

W strefie dalszej, określonej nierównością

$$\frac{r}{R_0} > 18 \quad (4.8)$$

impuls jednostkowy przy wybuchu ładunku kulistego w powietrzu określamy wzorem

$$i = \frac{A_p C^{\frac{2}{3}}}{a} \quad (4.9)$$

gdzie  $A_p$  oznacza wartość charakteryzującą MW i ośrodek (dla

$$\text{TNT i powietrza } A = 55 \frac{\text{KG}^{\frac{1}{3}} \text{sek}}{\text{m}}).$$

Po podstawieniu impulsu (4.9) do nierówności (4.3) otrzymamy wzory na określenie bezpiecznych odległości i bezpiecznych ładunków w strefie dalszej

$$a_{\text{bezp}} = \frac{A_p k_f b \beta C^{\frac{2}{3}}}{k_o K_R^d R W} \quad (4.10)$$

$$C_{\text{bezp}} = \left( \frac{k_o K_R^d R W a}{A_p k_f b \beta} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.11)$$

#### 4.2.2. Bezpieczne odległości i bezpieczne ładunki przy wybuchu wydłużonych ładunków w powietrzu

Impuls jednostkowy od wybuchu ładunku wydłużonego w kształcie walca działa na rozpatrywany element konstrukcji i określony jest wzorem

$$i_w = \frac{2 A C_w}{a} \quad (4.12)$$

Podstawiając tę wartość do nierówności (4.3) otrzymamy wzory na określenie bezpiecznych odległości i bezpiecznych ładunków

$$a_{\text{bezp}} = \frac{2 A k_f b \beta C_w}{k_o K_R^d R W} \quad (4.13)$$

$$C_w \text{ bezp} = \frac{k_o K_R^d R W a}{2 A k_f b \beta} \quad (4.14)$$

Wzory (4.13) i (4.14) mają zastosowanie w odległości spełniającej nierówność  $r \leq 40 R_o$ , natomiast długość ładunku  $l_o \geq 80 R_o$ .

Dla ładunków wydłużonych spełniających nierówność

$$\frac{l_o}{R_o} \leq 10 \div 15 \quad (4.15)$$

bezpieczne odległości i bezpieczne ładunki określamy w oparciu o wzory (4.6), (4.7), (4.10), (4.11), wstawiając w miejsce C wartość  $C_w l_o$ .

## Rozdział 5

### PRZYKŁADY OBLICZEŃ DZIAŁANIA WYBUCHU ŁADUNKÓW KONTAKTOWYCH I Z ODLEGŁOŚCI

#### 5.1. Działanie skupionych ładunków kontaktowych

##### Z a d a n i e 1

Określić ciężar i wymiary skupionego ładunku kontakto-  
wego z trotylu, którym należy wybić otwór nie mniejszy niż  
8x8 cm w płycie wykonanej ze stali ST-3 o grubości 40 mm.

Dane:  $Q_0 = 1000 \text{ kcal/kg}$ ;  $\tau_{MV} = 1600 \text{ kg/m}^3$ ;  $A_m^s = 1100 \text{ kg/cm}^2$ ;

$K_A^d = 2,0$ ;  $\gamma = 7860 \text{ kg/m}^3$ ;  $\varepsilon = 427 \text{ kgm/kcal}$ .

Ciężar skupionego ładunku kontaktowego określamy wzorem

$$C = \frac{\chi^2}{\mu} M_0 h^3; \quad \chi = \operatorname{tg} \alpha + \frac{x}{h}; \quad M_0 = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\rho A_m}}{A}$$

Wartość A dla trotylu wynosi

$$A = \frac{u}{2\pi g} = \frac{\sqrt{2gQ_0\varepsilon}}{2\pi g} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1000 \cdot 427}}{2 \cdot 3,14 \cdot 9,81} = 47 \text{ sek}$$

$$M_0 = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\frac{\sigma_{st}}{g} K_A^d A_m^s}}{A} = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{7860 \cdot 2 \cdot 1100 \cdot 10^4}}{47} = 6000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

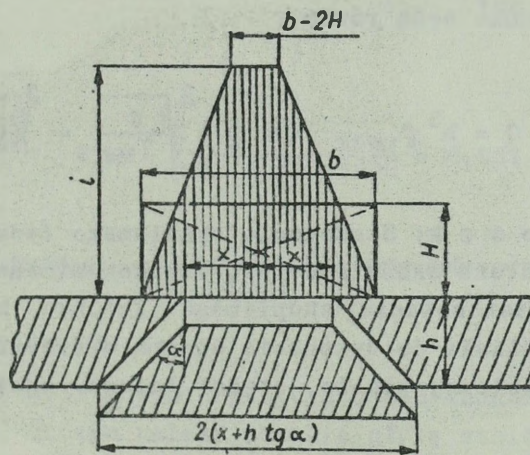
$$\text{Przy } \alpha = 45^\circ; \quad \chi = \operatorname{tg} \alpha + \frac{x}{h} = \operatorname{tg} 45^\circ + \frac{4}{4} = 2$$

Przyjmując stosunek wymiarów ładunku równy  $b = 2H$ , współczynnik  $\mu$  wyniesie

$$\mu = 3 - 6 \frac{H}{b} + 4 \left(\frac{H}{b}\right)^2 = 1$$

Ostatecznie ciężar skupionego ładunku kontaktowego wynosi

$$C = \frac{2^2}{1} \cdot 6000 \cdot 0,04^3 = 4 \cdot 6000 \cdot 64 \cdot 10^{-6} = 1,54 \text{ kG}$$



Rys.5.1. Schemat obliczeniowy do zadania 1

Wymiary skupionego ładunku kontaktowego są następujące:  
Przy założonym stosunku  $\frac{b}{H} = 2$ , ciężar ładunku będzie równy

$$C = b^2 H \sigma_{MW} = \frac{b^3}{2} \sigma_{MW} \longrightarrow b = \sqrt[3]{\frac{2C}{\sigma_{MW}}}$$

$$b = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,54}{1600}} = 0,124 \text{ m}$$

$$H = \frac{b}{2} = \frac{0,124}{2} = 0,062 \text{ m}$$

Stosując do tego celu skupiony ładunek kontaktowy w kształcie sześciangu, ciężar jego wtedy wyniesie

$$\frac{b}{H} = 1 \longrightarrow \mu = \frac{b}{2H} = 0,5$$

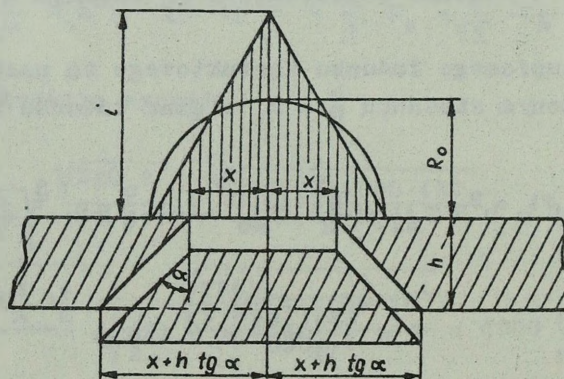
$$C = \frac{\chi^2}{\mu} M_0 h^3 = \frac{2^2}{0,5} \cdot 6000 \cdot 0,04^3 = 3,08 \text{ kG}$$

Wymiary ładunku będą równe

$$C = b^3 \sigma_{MW} \longrightarrow b = \sqrt[3]{\frac{C}{\sigma_{MW}}} = \sqrt[3]{\frac{3,08}{1600}} = 0,124 \text{ m}$$

**Wniosek:** Stosowanie skupionego ładunku kontaktowego w kształcie sześciangu jest nieekonomiczne.

Przy zastosowaniu skupionego ładunku kontaktowego w kształcie półkuli do wykonania otworu o średnicy  $b = 8 \text{ cm}$  w przyjętej stalowej płycie, ciężar ładunku okaże się najekonomiczniejszy.



Rys.5.2. Schemat obliczeniowy do określenia ładunku kontaktowego w kształcie półkuli

Dla ładunku w kształcie półkuli współczynnik  $\mu = 1,5$ . Ciężar ładunku kontaktowego w kształcie półkuli będzie równy

$$C = \frac{\chi^2}{\mu} M_0 h^3 = \frac{2^2}{1,5} \cdot 6000 \cdot 0,04^3 = 1,025 \text{ kG}$$

Promień ładunku półkulistego

$$C = \frac{2}{3} \pi R_0^3 \delta_{MW} \longrightarrow R_0 = \sqrt[3]{\frac{3C}{2 \cdot \pi \cdot \delta_{MW}}}$$

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1 \cdot 0,25}{2 \cdot 3,14 \cdot 1600}} = 0,067 \text{ m}$$

## 5.2. Działanie wydłużonych ładunków kontaktowych

### Z a d a n i e 2

Określić ciężar i wymiary wydłużonego ładunku kontaktowego z trotylu, którym należy przebić płytę stalową na całej szerokości  $B = 1,2 \text{ m}$ . Dane dotyczące materiału płyty i materiału wybuchowego takie jak w zadaniu 1.

Schemat obliczeniowy jak na rys.5.1.

Ciężar jednostki długości kontaktowego ładunku określamy ze wzoru

$$C_w = \frac{\chi}{\mu_w} M_0 h^2$$

Wielkość przebiccia w materiale płyty w przekroju poprzecznym pod ładunkiem ma być taka jak w zadaniu 1, wobec tego

$$\chi = \text{tg } \alpha + \frac{x}{h} = \text{tg } 45^\circ + \frac{4}{4} = 2; M_0 = 6000 \frac{\text{kG}}{\text{m}^3}$$

przy założeniu najkorzystniejszego stosunku  $\frac{b}{H} = 2$   
współczynnik  $\mu_w$  będzie równy

$$\mu_w = \frac{3}{4} \frac{b}{H} = \frac{3}{4} \frac{2H}{H} = 1,5$$

$$C_w = \frac{2}{1,5} \cdot 6000 \cdot 0,04^2 = 12,75 \text{ kg/m}$$

Do przebicia płyty o szerokości  $B = 1,2 \text{ m}$  potrzebny jest ładunek wydłużony o ciężarze

$$C = BC_w = 1,2 \cdot 12,75 = 15,3 \text{ kg}$$

Wymiary poprzecznego przekroju ładunku wydłużonego.

$$C_w = b H l \sigma_{MW} = 2H^2 l \sigma_{MW} \longrightarrow H = \frac{C_w}{2 l \sigma_{MW}}$$

$$H = \sqrt{\frac{12,75}{2 \cdot 1 \cdot 1600}} = 0,0634 \text{ m}$$

$$b = 2H = 2 \cdot 0,0634 = 0,1268 \text{ m}$$

Przy zastosowaniu wydłużonego ładunku kontaktowego w kształcie półwalca, dla którego  $\mu_w = 1,91$ , ciężar jednostki długości ładunku będzie równy

$$C_w = \frac{\lambda}{\mu_w} M_0 h^2 = \frac{2}{1,91} \cdot 6000 \cdot 0,04^2 = 9,65 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Do przecięcia płyty o szerokości  $B = 1,2$  potrzebny jest ciężar ładunku

$$C = B C_w = 1,2 \cdot 9,65 = 11,6 \text{ kg}$$

Promień ładunku w kształcie półwalca wynosi

$$C_w = \frac{\pi R_0^2}{2} \cdot 1 \cdot \delta_{MW} \longrightarrow R_0 = \sqrt{\frac{2 C_w}{\pi \cdot 1 \cdot \delta_{MW}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,65}{3,14 \cdot 1 \cdot 1600}} = 0,062 \text{ m}$$

### 5.3. Działanie ładunku kontaktowego

#### Z a d a n i e 3

Określić jaki powinien być zachowany stosunek między grubością płyty stalowej, a wysokością skupionego ładunku kontaktowego z heksogenu i trotylu, aby było zapewnione przebijanie płyty stalowej.

D a n e: ładunek w kształcie walca;

$$Q_0 = 1300 \text{ kcal/kg};$$

$$\varepsilon = 427 \text{ kGm/kcal};$$

$$\delta_{MW} = 1800 \text{ kG/m}^3; \text{ stal ST-3}$$

$$A_m^s = 1100 \text{ kG/cm}^2; K_A^d = 2,0;$$

$$\delta = 7860 \text{ kG/cm}^3;$$

$$b = 2H.$$

Wartość stała charakteryzująca heksogen

$$A = \sqrt{\frac{2 g Q_0 \varepsilon}{2 \pi g}} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1300 \cdot 427}}{2 \cdot 3,14 \cdot 9,81} = 53,5 \text{ sek}$$

$$M_0 = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\frac{\delta}{g} K_A^d A_m^s}}{A} = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{7860 \cdot 2 \cdot 1100 \cdot 10^4}}{53,5} = 5300 \frac{\text{kG}}{\text{m}^3}$$

Ciężar skupionego ładunku kontaktowego w kształcie walca wynosi

$$C = \frac{\chi^2}{\lambda^4} M_0 h^3 \longrightarrow \frac{C}{h^3} = \frac{\chi^2}{\lambda^4} M_0$$

Ciężar ładunku  $C = f(b, H, \tau)$

$$C = \frac{\pi b^2}{4} H \tau_{MW}, \text{ przy } b = 2H; C = \pi H^3 \tau_{MW}$$

Wobec tego

$$\frac{C}{h^3} = \frac{\pi H^3 \tau_{MW}}{h^3} = \frac{\chi^2}{\mu} M_0 \longrightarrow \frac{H}{h} = \sqrt[3]{\frac{\chi^2 M_0}{\pi \mu \tau_{MW}}}$$

Przy założeniu  $\chi = 0,2h$   $\alpha = 45^\circ$ , wartość  $\chi$  będzie równa

$$\chi = \operatorname{tg} 45^\circ + \frac{0,2h}{h} = 1,2$$

Dla  $\frac{b}{H} = 2$ ;  $\mu = \frac{b}{2H} = 1$

Określany stosunek  $\frac{H}{h}$  przy użyciu heksogenu będzie równy

$$\frac{H}{h} = \sqrt[3]{\frac{1,2^2 \cdot 5300}{3,14 \cdot 1 \cdot 1800}} = 1,11$$

Natomiast dla ładunku wykonanego z trotylu stosunek ten wyniesie

$$\frac{H}{h} = \sqrt[3]{\frac{1,2^2 \cdot 6000}{3,14 \cdot 1 \cdot 1800}} = 1,20$$

#### 5.4. Działanie ładunków z odległości

##### Z a d a n i e 4

Określić ciężar skupionego ładunku zbliżonego do kuli, którym należy przebić drewnianą belkę o przekroju poprzecznym kwadratowym, rozmieszczoną w odległości  $a=1,5\text{m}$  od środka ładunku.

D a n e :

$$\begin{aligned} & \text{sucha sosna; } h = 30 \text{ cm; } R_r = 550 \text{ kG/cm}^2; \\ & k_o = 0,4; K_R^d = 1,2 \div 1,6; E = 10^5 \text{ kG/cm}^2; \\ & K_E^d = 1,25; \delta = 0,20 \div 0,30; \tau_d = 650 \text{ kG/cm}^3. \end{aligned}$$

Współczynnik jednorodności materiału na gwarantowane przebiecie materiału

$$k_o^p = 2(1 + \delta) - k_o = 2(1 + 0,3) - 0,4 = 2,2$$

Ciężar ładunku

$$C > K h a^2$$

$$K = \frac{R_r}{\sqrt{3} A \sqrt{\frac{E}{\rho}}} = \frac{k_o^p K_R^d R_r}{\sqrt{3} A \sqrt{\frac{K_E^d E}{\rho}}} = \frac{2,2 \cdot 1,6 \cdot 550 \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 47 \cdot \sqrt{\frac{1,25 \cdot 10^9}{9,81}}} = 55 \frac{\text{kG}}{\text{m}^3}$$

$$C > K h a^2 = 55 \cdot 0,3 \cdot 1,5^2 = 37 \text{ kG}$$

Z a d a n i e 5

Określić ciężar ładunku do wykonania zadania 4 przy zastosowaniu ładunku w kształcie sześcianu rozmieszczonego tak, że jedna ze ścian ograniczających ładunek będzie równoległa do powierzchni niszczonego elementu.

Zgodnie z wykresem (rys.3.4) współczynnik zmniejszenia ładunku w stosunku do ładunku kulistego wyniesie

$$R_o = \frac{\sqrt[3]{C}}{\sqrt[3]{19}} = \frac{\sqrt[3]{37}}{\sqrt[3]{19}} = 0,175 \text{ m}$$

$$\frac{3}{R_o} = \frac{1,5}{0,175} = 8,6$$

$$\frac{C_0}{C_0} = 0,62$$

$$C_0 = 0,62 C_0 = 0,62 \cdot 37 = 23 \text{ kg}$$

#### Z a d a n i e 6

Określić czy i na jakim odcinku będzie zniszczony okrągłak sosnowy o średnicy  $h = 0,25 \text{ m}$  znajdujący się w odległości  $a = 2,8 \text{ m}$  od środka ładunku TNT,  $C = 100 \text{ kg}$ .

D a n e:

świeżo ścięta sosna;  $R_r = 500 \text{ kg/cm}^2$ ;

$\gamma = 850 \text{ kg/m}^3$ ;  $k_0 = 0,4$ ;  $E^s = 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ;

$K_E^d = 1,25$ ;  $K_R^d = 1,6$ ;  $\delta = 0,30 \div 0,45$ ;

$k_0^p = 2(1 + \delta) - k_0 = 2(1 + 0,45) - 0,4 = 2,5$ .

$$K = \frac{k_0^p K_R^d R_r}{\sqrt{3} A \sqrt{\frac{K_E^d}{\delta}}} = \frac{2,5 \cdot 1,6 \cdot 500 \cdot 10^4}{1,73 \cdot 47 \sqrt{\frac{1,25 \cdot 10^9}{\frac{850}{9,81}}}} = 64,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$C > Kha^2 \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2$$

$$\left( \frac{C}{Kha^2} \right)^{\frac{1}{2}} \geq 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2$$

$$\left( \frac{100}{64,8 \cdot 0,25 \cdot 2,8^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{100}{127} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,88$$

$$\left( \frac{x}{a} \right)^2 = 0,88 - 1 = -0,12$$

Okrągłak z tej odległości wybuchem ładunku  $C = 100 \text{ kg}$  nie będzie przeбит.

Minimalna odległość, która zapewni przebicie danego okrągła-  
ka wybuchem ładunku  $C = 100$  kg TNT wyniesie

$$a = \sqrt{\frac{C}{Kh}} = \sqrt{\frac{100}{64,8 \cdot 0,25}} = 2,48 \text{ m}$$

### Z a d a n i e 7

Określić na jakim odcinku może być zniszczony betonowy  
słup o średnicy  $h = 0,30$  m przy wybuchu  $C = 150$  kg w odle-  
głości  $a = 3,5$  m. Słup wykonany jest z betonu marki "100"  
przed 15 laty.

D a n e:

$$R_r = 100 \text{ kg/cm}^2; k_o = 0,6; \gamma = 2300 \text{ kg/m}^3;$$

$$E = 1,9 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2; K_E^d = 1,1; K_R^d = 1,84; \sigma = 0,25.$$

$$k_o^p = 2(1 + \sigma) - k_o = 2(1 + 0,25) - 0,6 = 1,9$$

$$k_t = 1,45(1 + 0,283 \log t) = 1,45(1 + 0,283 \log 15) = 1,94$$

$$K = \frac{k_o^p k_t K_R^d R_r}{\sqrt{3} \cdot 47 \cdot \sqrt{\frac{K_E^d E}{\rho}}} = \frac{1,9 \cdot 1,94 \cdot 1,84 \cdot 10^6}{1,73 \cdot 47 \cdot \sqrt{\frac{1,1 \cdot 1,9 \cdot 10^9}{2300}}} = 27,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$C = Kha^2 \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2$$

$$1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 = \sqrt{\frac{C}{Kha^2}} = \sqrt{\frac{150}{27,6 \cdot 0,3 \cdot 3,5^2}} = 1,21$$

$$\left( \frac{x}{a} \right)^2 = 1,21 - 1 = 0,21$$

$$x = \sqrt{0,21} \cdot 3,5 = 1,6 \text{ m}$$

Odcinek wybijania

$$l_w = 2x = 2 \cdot 1,6 = 3,2 \text{ m}$$

Z a d a n i e 8

Określić ciężar skupionego wykonanego z TNT ładunku, którym należy zrzucić z podpór stalową belkę o przekroju poprzecznym prostokątnym, jeżeli do tego celu wystarczy kąt obrotu  $\varphi = 25^\circ$ .

D a n e :

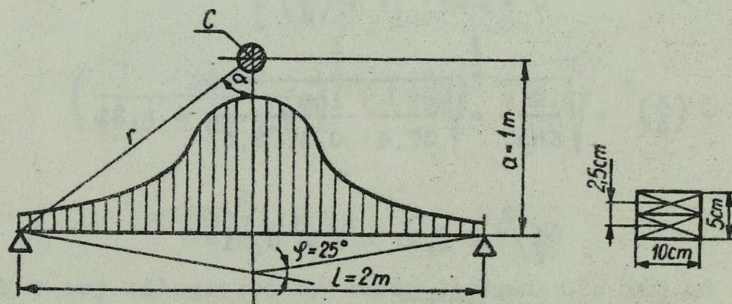
wymiary poprzecznego przekroju belki  $b = 10 \text{ cm}$ ;  
 $h = 5 \text{ cm}$ ; rozpiętość  $l = 2 \text{ m}$ ;  $\gamma = 7860 \text{ kg/m}^3$ ;  
 stal ST-3;  $Q_r^s = 2400 \text{ kg/cm}^2$ ;  $k_o = 0,9$ ;  $K_q^d = 1,2 \div 1,9$ ;  
 $\delta = 0,25 \div 0,29$ ;  $a = 1,64$ ;  $k_o^p = 2(1 + \delta) - k_o =$   
 $= 2(1 + 0,27) - 0,9 = 1,64$ ;  $Q_r = k_o^p = K_q^d Q_r^s =$   
 $= 1,64 \cdot 1,5 \cdot 2400 = 5900 \text{ kg/cm}^2$ .

W tym przypadku

$$\frac{a}{l} = 0,5 \text{ z tabeli 6.5; } \delta_k = 0,474$$

$$C = \frac{F}{K_f b A} \sqrt{\frac{\rho z Q_r a^3 \varphi}{2 \delta_k}}$$

$$\frac{F}{K_f b} = \frac{b h}{K_f b} = h = 0,05 \text{ m; } A = 47 \text{ sek;}$$



Rys.5.3.Schemat obliczeniowy do zadania 8

$$z = \frac{h}{2} = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ cm}$$

$$\varphi = 25^\circ = 0,437; \quad \rho = \frac{\sigma}{g} = \frac{7860}{9,81} = 800 \frac{\text{kgsek}^2}{\text{m}}$$

$$C = \frac{0,05}{17} \sqrt{\frac{800 \cdot 0,025 \cdot 5900 \cdot 10^4 \cdot 1^3 \cdot 0,437}{2 \cdot 0,474}} = 27,3 \text{ kg}$$

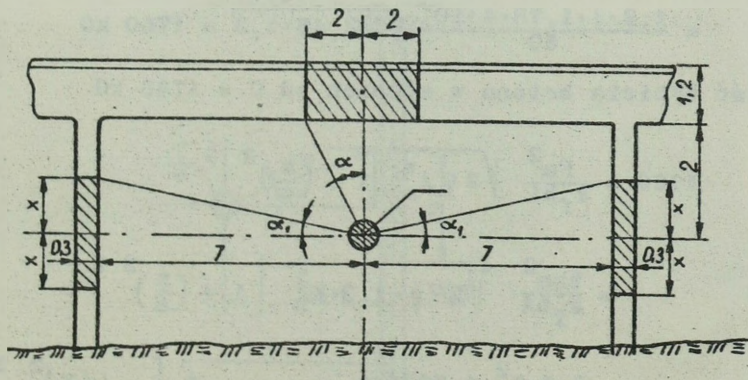
### 5.5. Niszczenie elementów betonowych i żelbetowych

#### Z a d a n i e 9

Pod dźwigarem żelbetowego pomostu w odległościach  $a_1 = 2 \text{ m}$  i  $a_2 = 7 \text{ m}$  wybucha kulisty ładunek trotylowy. Określić jego ciężar, aby beton został wybity z przęsła na długość  $4 \text{ m}$  oraz określić odcinek wybitego betonu ze słupów.

D a n e:

wymiary poprzeczne belki przęsłowej  $b = 0,3 \text{ m}$ ;  
 $h = 1,2 \text{ m}$ ; wymiar poprzeczny słupa  $b = 0,3 \text{ m}$ ,  
 żelbet marki "300", konstrukcja zbudowana przed  
 10 laty.



Rys.5.4.Schemat obliczeniowy do zadania 9

Wzrost wytrzymałości betonu w okresie 10 lat

$$k_t = 1,45(1 + 0,283 \log t) = 1,45(1 + 0,283) = 1,86$$

$$R_r^d = k_t R_r = 1,86 \cdot 260 = 486 \frac{\text{KG}}{\text{cm}^2}$$

Dla betonu marki "300",  $R_r = 260 \frac{\text{KG}}{\text{cm}^2}$

Dla  $R_r = 486 \frac{\text{KG}}{\text{cm}^2}$ ;  $k_b = 1,78$ ;  $A_m^w = 1,3 k_b^2$

$$C = \frac{F a^2}{k_f b A} \sqrt{2 \rho A_m^w} \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2$$

D a n e :

dla belki przęsłowej

$k_f = 1$ ,  $b = 0,3 \text{ m}$ ,  $H = 1,2 \text{ m}$ ,  $A = 50 \text{ sek}$ ,  $x = 2 \text{ m}$ ,

$a = 2 \text{ m}$ ,  $\rho = 245 \frac{\text{KGsek}^2}{\text{m}^4}$

$$C = \frac{0,3 \cdot 1,2 \cdot 2^2}{1 \cdot 0,3 \cdot 50} \sqrt{2 \cdot 245 \cdot 1,3 \cdot 1,78^2 \cdot 10^4} \left[ 1 + \left( \frac{2}{2} \right)^2 \right]^2 =$$

$$= \frac{1,2 \cdot 4 \cdot 1,78 \cdot 4 \cdot 10^3}{50} \sqrt{2 \cdot 2,45 \cdot 1,3} = 1760 \text{ KG}$$

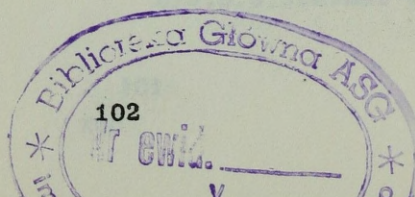
Wielkość wybitcia betonu w słupach od  $C = 1760 \text{ KG}$

$$1760 = \frac{F a^2}{k_f b A} \sqrt{2 \rho A_m^w} \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 =$$

$$= \frac{b h a^2}{k_f b A} \sqrt{2 \rho \cdot 1,3 \cdot K_b^2} \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 =$$

$$= \frac{0,3 \cdot 1,2^2 \cdot 1,78}{50} \sqrt{2 \cdot 245 \cdot 1,3 \cdot 10^4} \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 =$$

$$= 1320 \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2$$



$$\left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 = \frac{1760}{1320} = 1,33$$

$$x = a (\sqrt{1,33} - 1)^{\frac{1}{2}} = 7,038 = 2,72 \text{ m}$$

Beton będzie wybity na odcinkach  $2x = 2 \cdot 2,72 = 5,44 \text{ m}$ .

#### Z a d a n i e 10

Określić wielkość skupionego ładunku wykonanego z TNT, którym należy zniszczyć żelbetowy słup o średnicy  $d = 0,6 \text{ m}$ , ładunek detonuje w odległości  $a = 2,4 \text{ m}$  od słupa. Beton marki "200", średnica najgrubszego pręta zbrojeniowego  $d_{pr} = 25 \text{ mm}$ .

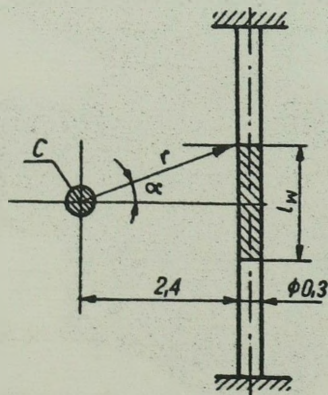
D a n e:

$$\mu_s = 0,02; R_r = 180 \text{ kg/cm}^2; k_o = 0,6;$$

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

Minimalna niezbędna długość odcinka wybijanego betonu przy niszczeniu słupa wynosi

$$\frac{l_w}{d_{pr}} = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{\mu_z E_z}{k_o R_r b}}$$



Rys.5.5. Schemat obliczeniowy do zadania 10

$$\frac{l_w}{d_{pr}} = \frac{3,14}{2} \sqrt{\frac{0,02 \cdot 2,1 \cdot 10^6}{0,6 \cdot 180}} = 31$$

$$l_w = d_{pr} \cdot 31 = 0,025 \cdot 31 = 0,775 \text{ m}$$

W związku z tym  $x = 0,5 \cdot 0,775 = 0,387 \text{ m}$ .

Ciężar ładunku do wybitcia betonu ze słupa

$$C = \frac{F a^2}{k_p b A} \sqrt{2 \rho A_m^w} \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 =$$

$$= \frac{\pi d^2}{4 k_p b A} a^2 \sqrt{2 \rho \cdot 1,3 \cdot K_b^2 \cdot 10^4} \left[ 1 + \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right]^2 =$$

$$= \frac{3,14 \cdot 0,6^2}{2 \cdot 3} \cdot 2,4 \sqrt{2 \cdot 245 \cdot 1,3 \cdot 1^2 \cdot 10^4} \left[ 1 + \left( \frac{0,387}{2,4} \right)^2 \right]^2 =$$

$$= 0,081 \cdot 2,52 \cdot 10^3 \cdot 1,05 = 214 \text{ kg}$$



THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHYSICS DEPARTMENT

PHYSICS 309

PROBLEM SET 1

Due: 10/10/11

1. A particle of mass  $m$  moves in a circular path of radius  $r$  with constant speed  $v$ . Find the magnitude of the centripetal acceleration.

2. A particle moves in a circular path of radius  $r$  with constant speed  $v$ . Find the magnitude of the centripetal force.

Tabela 6.1.

Normowe wartości  $R_z$ ;  $R_r$ ;  $R_s$  i  $E \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$  i współczynniki jednorodności niektórych materiałów budowlanych

| Materiał                   | C h a r a k t e r y s t y k i |       |       |       |       |       | E                    |
|----------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
|                            | $R_z$                         | $k_o$ | $R_r$ | $k_o$ | $R_s$ | $k_o$ |                      |
| Sosna, jodła               | 500                           | 0,40  | 550   | 0,27  | 300   | 0,65  | 10 <sup>5</sup>      |
| Akacja                     | 750                           | 0,40  | 825   | 0,27  | 450   | 0,65  | 10 <sup>5</sup>      |
| Dąb, jesion, klon, grab    | 650                           | 0,40  | 715   | 0,27  | 350   | 0,65  | 10 <sup>5</sup>      |
| Brzoza, buk                | 550                           | 0,40  | 600   | 0,27  | 330   | 0,65  | 10 <sup>5</sup>      |
| Olcha, lipa, osika, topola | 400                           | 0,40  | 440   | 0,27  | 240   | 0,65  | 10 <sup>5</sup>      |
| Stal ST 1                  | 3200                          | 0,90  | 3200  | 0,90  | 3200  | 0,90  | 2,1·10 <sup>6</sup>  |
| ST 2                       | 3400                          | 0,90  | 3400  | 0,90  | 3400  | 0,90  | 2,1·10 <sup>6</sup>  |
| ST 3                       | 3800                          | 0,90  | 3800  | 0,90  | 3800  | 0,90  | 2,1·10 <sup>6</sup>  |
| ST 4                       | 4200                          | 0,90  | 4200  | 0,90  | 4200  | 0,90  | 2,1·10 <sup>6</sup>  |
| Żelivo szare ZL 10         | 1000                          | 0,75  | 1000  | 0,75  | 3000  | 0,75  | 10 <sup>6</sup>      |
| ZL 15                      | 1500                          | 0,75  | 1500  | 0,75  | 4500  | 0,75  | 10 <sup>6</sup>      |
| ZL 20                      | 2000                          | 0,75  | 2000  | 0,75  | 6000  | 0,75  | 10 <sup>6</sup>      |
| Beton marki 30             | 30                            | 0,60  | 5,5   | 0,45  | 28    | 0,60  | 3·10 <sup>4</sup>    |
| 50                         | 50                            | 0,60  | 7,5   | 0,45  | 40    | 0,60  | 4·10 <sup>4</sup>    |
| 70                         | 70                            | 0,60  | 8     | 0,45  | 60    | 0,60  | 8,5·10 <sup>4</sup>  |
| 90                         | 90                            | 0,60  | 10    | 0,45  | 70    | 0,60  | 1,05·10 <sup>5</sup> |
| 110                        | 110                           | 0,60  | 11,5  | 0,45  | 90    | 0,60  | 1,2·10 <sup>5</sup>  |
| 140                        | 135                           | 0,60  | 13    | 0,45  | 115   | 0,60  | 1,4·10 <sup>5</sup>  |
| 200                        | 180                           | 0,60  | 18    | 0,45  | 145   | 0,60  | 1,4·10 <sup>5</sup>  |
| 250                        | 220                           | 0,60  | 20    | 0,45  | 180   | 0,60  | 1,8·10 <sup>5</sup>  |

T a b e l a 6.2.

Orientacyjne wartości współczynnika  $\delta$   
dla niektórych materiałów budowlanych

| Materiały        | Charakter pracy elementu | $\delta$    |
|------------------|--------------------------|-------------|
| Stal             | Rozciąganie, zginanie    | 0,25 - 0,29 |
| Beton            | Ściskanie, zginanie      | 0,15 - 0,25 |
| Skąły            | Ściskanie, zginanie      | 0,20 - 0,35 |
| Drewno-kantówka  | Zginanie                 | 0,20 - 0,30 |
| Drewno-okrąglaki | Zginanie                 | 0,30 - 0,45 |

T a b e l a 6.3.

Wartości współczynnika  $k_b$  do określania  
pracy jednostkowej na wybitie betonu

| Marka betonu | $k_b$ |
|--------------|-------|
| 30           | 0,41  |
| 50           | 0,58  |
| 70           | 0,59  |
| 90           | 0,65  |
| 110          | 0,75  |
| 140          | 0,85  |
| 200          | 1,00  |
| 250          | 1,24  |
| 300          | 1,30  |
| 400          | 1,56  |
| 500          | 1,78  |
| 600          | 1,95  |

$$A_m^w = 1,3 k_b^2; \quad k_b = 2,34 \frac{R_z}{\sqrt{E}}$$

Tabela 6.4.

| Wzory na określenie współczynnika $k_t$   |  |
|---|--|
| Współczynnik $k_t$ dla elementów betonowych i żelbetowych, którym od momentu wykonania do momentu obciążenia wybuchowego upłynął czas kilku dni do kilku miesięcy można określić wzorem |  |
| $k_t = \frac{R_t}{R} = 0,4(1 + 1,03 \log t)$  |  |
| gdzie $t$ oznacza czas mierzony w dobach.   |  |
| Dla elementów betonowych i żelbetowych wykonanych przed latami współczynnik $k_t$ można określić wzorem   |  |
| $k_t = \frac{R_t}{R} = 1,45(1 + 0,283 \log t)$  |  |
| gdzie $t$ oznacza czas mierzony w latach.   |  |

Tabela 6.5.

Wartości  $\delta_k$  i  $\delta_w$ 

| $\alpha_0$ | $\frac{a}{l}$ | $\delta_k$ | $\delta_w$ | $\sqrt{\frac{1}{a\delta_k}}$ | $\sqrt{\frac{1}{a\delta_w}}$ |
|------------|---------------|------------|------------|------------------------------|------------------------------|
| 0          | $\infty$      | 0          | 0          | -                            | -                            |
| 2          | 14,300        | 0,035      | 0,035      | 1,41                         | 1,41                         |
| 4          | 7,170         | 0,069      | 0,069      | 1,42                         | 1,42                         |
| 6          | 4,750         | 0,103      | 0,103      | 1,43                         | 1,43                         |
| 8          | 3,550         | 0,137      | 0,137      | 1,44                         | 1,44                         |
| 10         | 2,840         | 0,170      | 0,171      | 1,44                         | 1,44                         |
| 15         | 1,870         | 0,245      | 0,250      | 1,48                         | 1,46                         |
| 20         | 1,36          | 0,310      | 0,322      | 1,54                         | 1,51                         |
| 30         | 0,88          | 0,407      | 0,440      | 1,68                         | 1,61                         |
| 45         | 0,50          | 0,474      | 0,543      | 2,06                         | 1,92                         |
| 60         | 0,289         | 0,490      | 0,583      | 2,58                         | 2,44                         |
| 75         | 0,134         | 0,491      | 0,588      | 3,90                         | 3,56                         |
| 90         | 0,000         | 0,491      | 0,590      | $\infty$                     | $\infty$                     |

Podstawowe charakterystyki niektórych belek

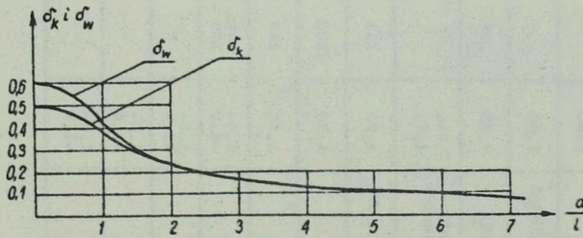
| Schemat rozmieszczenia ładunku i belki | $J_{yy}$                  | W                         | $m_1$                         | $\frac{J_{yy}}{m_1}$  | $\beta$  | $k_f$ | b                     | $\frac{W}{E_2 b \beta}$                               |
|--|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|--|-------|-----------------------|---|
|  | $\frac{h^4}{12}$          | $\frac{h^3}{6}$           | $h^2 \rho$                    | $\frac{h^2}{12 \rho}$ | $\frac{h}{12} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$           | 1     | h                     | $\frac{h}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$            |
|  | $\frac{h^4}{12}$          | $\frac{\sqrt{2} h^3}{12}$ | $h^2 \rho$                    | $\frac{h^2}{12 \rho}$ | $\frac{h}{\sqrt{12}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$    | 0,500 | $\sqrt{2} h$          | $\frac{h}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$            |
|  | $\frac{5h^4}{48\sqrt{3}}$ | $\frac{5h^3}{48}$         | $\frac{\sqrt{3}}{2} h^2 \rho$ | $\frac{5h^2}{72\rho}$ | $\sqrt{2,5} \frac{h}{6} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | 0,625 | $\frac{2h}{\sqrt{3}}$ | $\frac{\sqrt{10,3} h}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}$         |
|  | $\frac{5h^4}{48\sqrt{3}}$ | $\frac{5h^3}{24\sqrt{3}}$ | $\frac{\sqrt{3}}{2} h^2 \rho$ | $\frac{5h^2}{72\rho}$ | $\sqrt{2,5} \frac{h}{6} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | 0,750 | h                     | $\frac{\sqrt{10} h}{3\sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ |
|  | $\frac{\pi h^4}{64}$      | $\frac{\pi h^3}{32}$      | $\frac{\pi h^2}{4} \rho$      | $\frac{h^2}{16\rho}$  | $0,25 h \sqrt{\frac{E}{\rho}}$                 | 0,667 | h                     | $\frac{3\pi h}{16} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$             |

Objaśnienia:  $J_{yy}$  - moment bezwładności; W - wskaźnik wytrzymałości;  $m_1$  - masa jednostki długości elementu;  
 E - moduł sprężystości;  $\rho$  - gęstość materiału;  $k_f$  - współczynnik opływu; b - szerokość rzutu  
 powierzchni na kierunku działania obciążenia.

Tabela 6.7.

Obliczeniowe i eksperymentalne wartości impulsów działających na płytę przy wybuchu kontaktowych ładunków z TNT w kształcie walca

| Wymiary ładunku      |                      | Gęstość<br>$\rho_0$<br>$\left[ \frac{\text{kg}/\text{sek}^2}{\text{m}^3} \right]$ | I [ kg/sek ]           |                       | $\eta = \frac{I_{\text{obl}}}{I_{\text{eksp}}}$ | Odchyłka od średniej arytmetycznej [%] |
|----------------------|----------------------|---|------------------------|-----------------------|---|--|
| wysokość<br>H [ mm ] | średnica<br>b [ mm ] |   | doświadczalne wartości | obliczeniowe wartości |   |  |
| 80                   | 20                   | 142   | 0,51                   | 0,446                 | 0,875   | + 9,91                                 |
| 80                   | 23,5                 | 142   | 0,941                  | 0,722                 | 0,767   | - 3,64                                 |
| 80                   | 31,4                 | 142   | 2,36                   | 1,730                 | 0,732   | - 8,02                                 |
| 80                   | 40                   | 142   | 4,75                   | 3,570                 | 0,751   | - 5,65                                 |
| 70                   | 20                   | 152   | 0,644                  | 0,478                 | 0,743   | - 6,65                                 |
| 70                   | 31,4                 | 152   | 2,51                   | 1,850                 | 0,737   | - 7,41                                 |
| 43                   | 40                   | 132   | 3,72                   | 3,320                 | 0,893   | + 12,2                                 |
| 61                   | 40                   | 132   | 3,97                   | 3,320                 | 0,837   | + 5,27                                 |
| 67                   | 40                   | 132   | 4,00                   | 3,320                 | 0,320   | + 4,27                                 |

Rys.6.1. Wykresy  $\delta_k$  i  $\delta_w$  w zależności  $\frac{a}{l}$

Podstawowe dane niektórych materiałów wybuchowych

| Materiały wybuchowe              | Wzór   | Ciężar właściwy<br>[ $\frac{g}{cm^3}$ ] | Temperatury w °C |                  |             | Ciepło wybuchu<br>[ $\frac{kcal}{kg}$ ] | Wrażliwość na uderzenie<br>[ $\frac{kg}{cm^2}$ ] | Zdolność do wyko-<br>nania pracy | Prędkość detonacji<br>[ $\frac{m}{s}$ ] | Gazy powy-<br>buchowe<br>[ $\frac{litry}{kg}$ ] |
|----------------------------------|--|---|------------------|------------------|-------------|---|--|----------------------------------|---|---|
|                                  |  |   | krzep-<br>nięcia | rozbu-<br>dzenia | wybuchu     |   |  |                                  |   |   |
| Inducujące                       | 2  | 3                                       | 4                | 5                | 6           | 7                                       | 8  | 9                                | 10                                      | 11  |
| Pierunian rtęci                  | $Hg(CNO)_2$                                  | 1,42                                    | -                | 180              | 3530        | 368                                     | 0,08   | 3,7                              | 4850                                    | 304   |
| Azydek ołowiu                    | $Pb(N_3)_2$                                  | 4,60                                    | -                | 327              | 3450        | 381                                     | 0,12   | 3,8                              | 4800                                    | 304   |
| Trójnitrorezor-<br>cynian ołowiu | $C_6H(NO_2)_3O_2PbH_2O$                      | 3,60                                    | -                | 270              | 2800        | 415                                     | 0,32   | -                                | 5200                                    | 450   |
| Trotyl                           | $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$                         | 1,65                                    | 81               | 290              | 3630        | 950                                     | 3-4  | 10,1                             | 6800                                    | 728   |
| Plastyk                          | ok. 80% hekso-<br>gen 20% plasty-<br>fikator | ok.<br>1,76                             | -                | ok.<br>230       | ok.<br>3300 | ok.<br>1000                             | ok.<br>3   | ok.<br>12,6                      | ok.<br>6700                             | ok.<br>600                                      |
| Trotyl                           | $C_6H_2(NO_2)_3N(NO_2)CH_3$                  | 1,70                                    | 123              | 195              | 3530        | 1090                                    | 1,6  | 13                               | 7700                                    | 742   |
| Heksogen                         | $(CH_2NNO_2)_3$                              | 1,60                                    | 200              | 230              | 3380        | 1300                                    | 1,3  | 13,3                             | 8400                                    | 910   |
| Pentryl                          | $C(CH_2ONO_2)_4$                             | 1,77                                    | 142              | 215              | 4000        | 1400                                    | 0,8  | 16,6                             | 8400                                    | 768   |
| Zmiesz-<br>czona                 | $NH_4NO_3$                                   | 1,4-<br>-1,6                            | ok.<br>150       | ok.<br>300       | ok.<br>3500 | 350                                     | ok.<br>4   | ok.<br>12,0                      | do<br>2300                              | 930   |
| Dyname                           | -  | 1,3-<br>-1,9                            | -                | 300              | 2200        | 700                                     | 1,2-<br>-1,8                                     | 1,0                              | do<br>400                               | ok.<br>300                                      |
| Nitrocelulozowe                  | -  | 1,5-<br>-1,6                            | -                | 180              | 2300        | 800                                     | 1-2  | 10,0                             | do<br>7000                              | ok.<br>900                                      |
| Nitroglicerynowe                 | -  | 1,5-<br>-1,6                            | -                | 180              | 2900        | 1100                                    | 1-2  | 10,6                             | do<br>7700                              | ok.<br>900                                      |

Kruszące o silne działaniu

Kruszące o słabym działaniu

Prooksydacyjne

Nitrocelulozowe

Nitroglicerynowe

Zmieszczona

Pentryl

Heksogen

Trotyl

Plastyk

Trotyl

Trójnitrorezor-  
cynian ołowiu

Azydek ołowiu

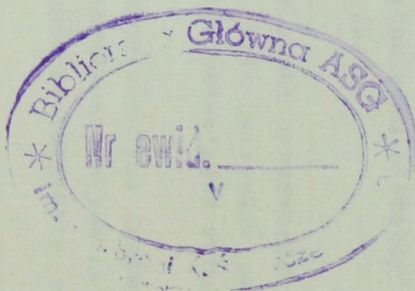
Pierunian rtęci

Inducujące

#### LITERATURA

1. F.A. Baum, K.P. Staniukowicz, B.J. Szechtier: Fizyka wrywa. Fizmatgiz, Moskwa 1959 r.
2. T.M. Sałamachin: Rozruszenie wrywom elementów konstrukcji. WIA, Moskwa 1961 r.
3. A.A. Iljuszyn, W.S. Leński: Wytrzymałość materiałów. (tłum. z rosyjskiego) PWN, Warszawa 1963 r.
4. J. Makarewicz: Mechaniczne działanie wybuchu w różnych ośrodkach. WAT, Warszawa 1968 r.

58225



Faint, illegible text at the top of the page, possibly a header or introductory paragraph.

The image shows a large, faint grid or table structure. The grid lines are visible, but the content within the cells is illegible. There is a faint circular stamp or mark in the center of the grid.

623,454.3:623.68 + 624.059.22:623.68

WAT  
pol.

Minierstwo. Niszczenie obiektów i budowli

Makarowicz J., Rutkowski J.: Mechaniczne działania wybuchu na elementy konstrukcji. Warszawa 1973, WAT, ss.113, tab., bibliogr., poz.4.

Skrypt został opracowany jako materiał pomocniczy do nauki przedmiotu minierstwo dla słuchaczy Wydziału Inżynierii Wojskowej WAT. Może być także pomocny przy wykonywaniu prac minerskich związanych z użyciem materiałów wybuchowych tak w wojsku, jak i w gospodarce narodowej.

Opracowanie zawiera materiały dotyczące krótkiej charakterystyki dynamicznych właściwości niektórych materiałów budowlanych, niszczenia elementów konstrukcji działaniem obciążenia generowanego zarówno wybuchem kontaktowych ładunków materiału wybuchowego, jak i z odległości.

Dla ułatwienia techniki obliczeń podano niezbędne tabele wartości parametrów niektórych materiałów budowlanych i materiałów wybuchowych.

26067