

WYBUCHOWE NAPĘDZANIE GRUBYCH LINERÓW PŁASKICH

ROBERT ŚWIERCZYŃSKI, JERZY TYL
i EDWARD WŁODARCZYK (WARSZAWA)

Dokonano numerycznej analizy wybuchowych układów do napędzania linerów o dużej masie. Pokazano, że układ ze zmienionym miejscem pobudzenia detonacji i wymuszonym (przez dodatkowy liner) ruchem brzegu materiału wybuchowego może być „konkurencyjny” w porównaniu z układem klasycznym. Pozwala on zwiększyć końcową prędkość „ciężkiego” lineru, obniżając jednocześnie w linerze wartość naprężeń rozrywających.

1. WSTĘP

Od wielu lat wybuchowe napędzanie linerów jest przedmiotem dociekań teoretycznych i doświadczalnych licznych badaczy. Dość szerokie zainteresowanie tym problemem wiąże się z wykorzystaniem napędzonych do dużej prędkości linerów, m.in. do generacji wysokich ciśnień w ośrodkach jedno i wieloskładnikowych [5–8], do technologicznych procesów obróbki tworzyw [9–13] oraz do kompresji plazmy metodami wybuchowymi [14 i 15].

W przedstawionych w literaturze badaniach teoretycznych można wyróżnić dwie metody postępowania. W pierwszej dąży się do konstruowania zamkniętych rozwiązań problemu napędzania linerów za pomocą energii wybuchu kosztem fizycznych uproszczeń modelu badanego zjawiska. Tego typu rozwiązania są wygodne do badania wpływu różnych czynników na proces napędzania linerów przy ograniczonej dokładności odwzorowywania szczegółów badanego zjawiska. W drugiej metodzie problem rozwiązuje się za pomocą odpowiednio skonstruowanych algorytmów numerycznych przy użyciu elektronicznej techniki obliczeniowej.

Zaletą analiz numerycznych jest możliwość opisanie zjawisk o złożonym obrazie falowym z zastosowaniem skomplikowanych, empirycznych równań stanu opisujących dokładnie fizyczne właściwości badanych ośrodków.

Klasyczne rozwiązania opisujące proces wybuchowego napędzania linerów płaskich (tłoków) przedstawiono m.in. w pracy [1] oraz monografiach [2 i 4]. W rozwiązaniach tych zakłada się, że produkty detonacji (PD) charakteryzują się stałym współczynnikiem politropy γ , liner jest nieściśliwy, a proces detonacji inicjowany jest jednocześnie na całej swobodnej powierzchni płaskiego ładunku materiału wybuchowego (MW).

Poszukując sposobów zwiększania prędkości napędzanego lineru, w pracy [16] zaproponowano zastosowanie do tego celu układu warstwowego (linery rozdzielone warstwą materiału o małej impedancji falowej). Szczegółową analizę tego układu oraz przegląd literatury przedstawiono w pracy autorów [17]. Pokazano tam, że układ warstwowy pozwala zwiększyć prędkość linerów o małej masie; odbywa się to jednak kosztem sprawności energetycznej procesu.

W badaniach eksperymentalnych obserwuje się rozwarstwienie linerów, które powoduje ich fragmentację i zaburza symetrię ruchu. Efekt ten jest wynikiem działania naprężeń rozciągających, które powstają przy oddziaływaniu fal odciążenia propagujących się w linerze [18–20]. Zjawisko rozwarstwienia jest niekorzystne i szczególnie trudne do wyeliminowania przy napędzaniu linerów o dużych grubościach (tzw. linerów „ciężkich”) za pomocą energii wybuchu. Dlatego też do napędzania takich linerów stosuje się zmodyfikowane układy, w których niebezpieczeństwo fragmentacji jest mniejsze dzięki obniżeniu wartości maksymalnych naprężeń rozciągających w linerze. Cel ten osiąga się zmieniając miejsce pobudzenia MW [21–26], a także wprowadzając między ładunek MW i liner szczelinę [3 i 20] lub warstwę materiału o małej impedancji falowej [20].

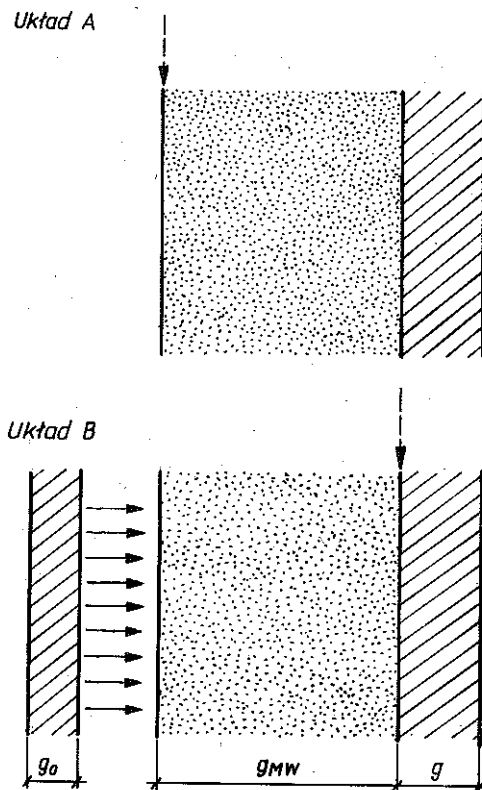
Wyniki analiz przedstawionych w niniejszej pracy stanowią pewną kontynuację rozważań zawartych w publikacji [25], w której badano układy miotające ze zmiennym miejscem pobudzenia detonacji ładunku i zastosowaniem osłon z ciężkich materiałów. Wykazano, że układy takie są „konkurencyjne” w porównaniu z układem klasycznym.

Poniżej przedstawiamy wyniki analiz numerycznych układu ze zmienionym miejscem pobudzenia detonacji, w którym ruch brzegu MW wymusza dodatkowy liner. Celem pracy jest zbadanie możliwości tego układu pod kątem podwyższenia prędkości napędzanego „ciężkiego” lineru i uniknięcia jego fragmentacji. W rozdziale drugim omawiamy badane modele układów miotających i podajemy równania problemu. W rozdziale trzecim przedstawiamy rezultaty analizy numerycznej i dyskusję otrzymanych wyników, a w czwartym dokonujemy podsumowania przedstawionych rozważań.

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Schematy badanych w pracy układów miotających przedstawiono na rys. 1. Strzałką narysowaną linią przerywaną zaznaczono płaszczyznę, w której pobudzona jest detonacja ładunku MW.

W układzie A (klasycznym) po zainicjowaniu procesu detonacji czoło FD propaguje się w prawo, a PD rozprężają się w lewo. Po dojściu FD do granicy MW–liner, rozpoczyna się proces napędzania lineru.



Rys. 1. Schematy analizowanych układów miotających

W układzie B detonacja inicjowana jest na granicy MW-liner. Czoło FD porusza się w lewo, a ciśnienie wywierane przez PD powoduje wstępne napędzanie linera. W momencie dojścia FD do swobodnej granicy MW dodatkowy liner o prędkości v_0 wymusza ruch brzegu PD. Realizuje się odbicie FD od poruszającego się linera [27]. Rozpędzone za frontem detonacji PD ulegają wyhamowaniu i zmieniają kierunek ruchu na przeciwny. W PD w prawo propaguje się fala uderzeniowa (FU). Druga faza napędzania ciężkiego linera następuje, gdy czoło FU dojdzie do granicy PD-liner.

Zmiana miejsca pobudzenia detonacji w układzie B (w porównaniu z A) i wykorzystanie dodatkowego linera pozwala oczekiwać, że w układzie tym nastąpi obniżenie maksymalnych ciśnień na granicy PD-liner oraz naprężeń rozciągających w napędzanym ciężkim linerze. Opierając się na rozważaniach zawartych w pracy [25], można także sądzić, że przy odpowiednim doborze grubości linerów i ładunku MW układ B pozwoli zwiększyć prędkość napędzanego linera bez rozwarstwiania.

Będziemy analizować układy o następujących parametrach: materiał linerów-Cu ($\rho_0 = 8930 \text{ kg/m}^3$); materiał wybuchowy-TNT ($\rho_{0MW} = 1630 \text{ kg/m}^3$);

prędkość dodatkowego linera — $v_0 = 2$ i 4 km/s; grubość dodatkowego linera — $g_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ i $4,5 \cdot 10^{-3}$ m; grubość ładunku MW — $g_{MW} = 1,5 \cdot 10^{-2}$; $3 \cdot 10^{-2}$; $4,5 \cdot 10^{-2}$, $6 \cdot 10^{-2}$ i $7,5 \cdot 10^{-2}$ m; grubość napędzanego „ciężkiego” linera — $g = 1 \cdot 10^{-2}$ m.

Analizę problemu prowadzamy do numerycznego rozwiązania przestrzenie jednowymiarowego układu równań hydrodynamiki dla symetrii płaskiej napisanych we współrzędnych Lagrange’a (szczegóły modelu obliczeniowego przedstawiono w pracach autorów [17 i 25]).

Przyjęcie do opisu napędzania linerów teorii jednowymiarowej stanowi idealizację rzeczywistych układów o skończonych wymiarach. W badaniach doświadczalnych występują bowiem zjawiska wielowymiarowe. Są one wynikiem oddziaływania, propagujących się od bocznych powierzchni układów, fal rozrzedzeniowych. W obszarach zaburzonych przez te fale teoria jednowymiarowa nie ma zastosowania. Jednowymiarowość zjawisk można natomiast osiągnąć stosując w eksperymentach układy o dostatecznie dużych wymiarach poprzecznych. Wówczas „boczne” fale rozrzedzenia, propagujące się z prędkością dźwięku, nie docierają do pewnych obszarów badanych układów. Do analizy zjawisk w tych obszarach można wykorzystać teorię jednowymiarową.

Ważnym warunkiem poprawnego opisu propagacji FU, FD i fal rozrzedzeniowych (odciążenia) w materiałach jest odpowiedni wybór równań stanu opisujących ich właściwości fizyczne. W niniejszej pracy do analiz wykorzystano równania o charakterze eksperymentalno-teoretycznym, które stosowano z powodzeniem we wcześniejszych pracach autorów [17, 20, 25 i 28].

Związek konstytutywny opisujący zachowanie się miedzi (Cu) przy intensywnych dynamicznych obciążeniach przyjęto w formie zaproponowanej przez TILLOTSONA [29]:

$$(2.1) \quad p = \left[a + \frac{b}{\varepsilon/\varepsilon_0 (\varrho_0/\varrho)^2 + 1} \right] \varrho \varepsilon + A\mu + B\mu^2,$$

gdzie $a = 0,5$, $b = 1,5$, $A = 139$ GPa, $B = 110$ GPa, $\varepsilon_0 = 3,25 \cdot 10^7$ J/kg, $\mu = \varrho/\varrho_0 - 1$. Symbole ϱ , p i ε odpowiednio oznaczają gęstość, ciśnienie i energię wewnętrzną odniesioną do jednostki masy.

Do opisu stanu PD wybrano równanie Jonesa–Wilkinsa–Lee’go (JWL) [30] o postaci

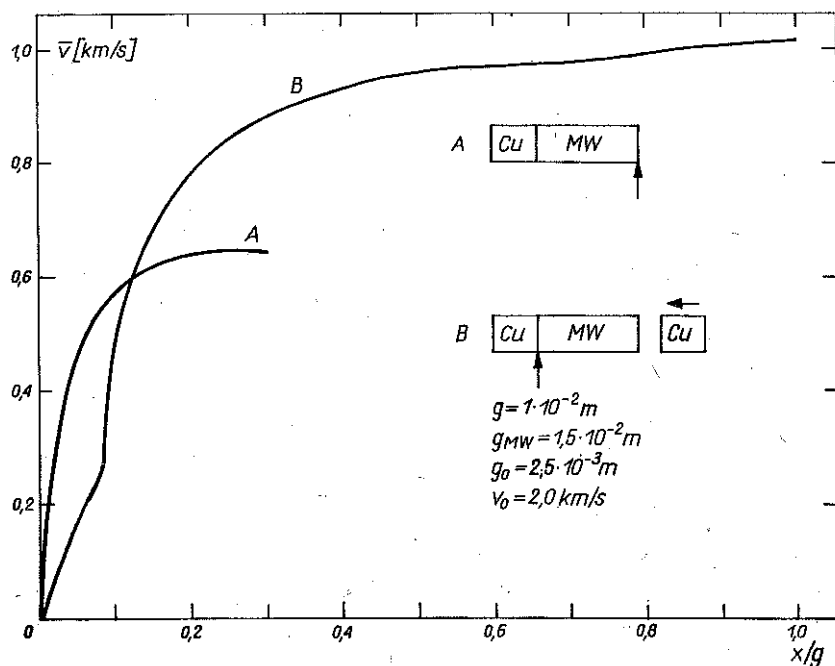
$$(2.2) \quad p = A_1 \left(1 - \frac{\omega \varrho}{\varrho_{0MW} R_1} \right) \exp \left(-R_1 \frac{\varrho_{0MW}}{\varrho} \right) + \\ + A_2 \left(1 - \frac{\omega \varrho}{\varrho_{0MW} R_2} \right) \exp \left(-R_2 \frac{\varrho_{0MW}}{\varrho} \right) + \omega \varrho \varepsilon,$$

gdzie $A_1 = 373,8$ GPa, $A_2 = 3,747$ GPa, $R_1 = 4,15$, $R_2 = 0,90$, $\omega = 0,35$.

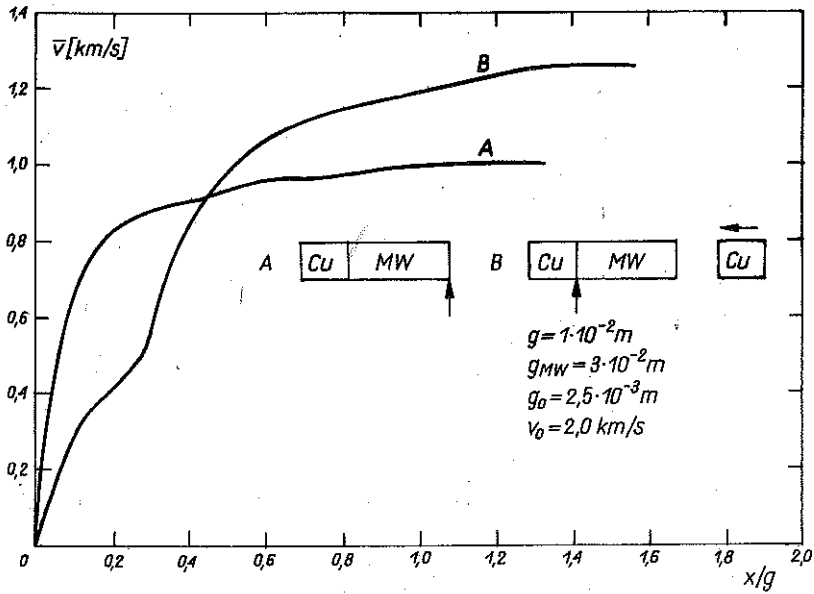
Równania hydrodynamiki i równania stanu uzupełnione warunkami zgodności ciśnień i przemieszczeń (prędkości) na granicach kontaktu ośrodków oraz warunkami początkowymi stanowią pełne, matematyczne sformułowanie problemu.

3. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ

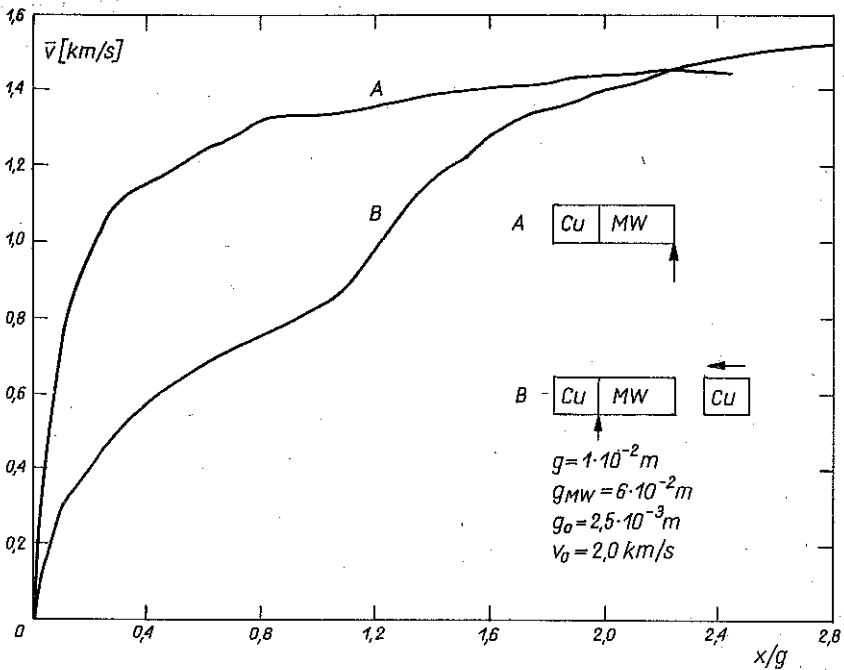
Wyniki analizy porównawczej układów A i B, dla trzech wybranych grubości ładunku MW przedstawiono na rys. 2-5. Na rysunkach 2-4 wykreślono zmianę średniej prędkości napędzanego (ciężkiego) linera $\bar{v} = (\int_0^m v dm)/m$ jako funkcję jego położenia. Zależności charakteryzujące procesy w układzie B mają przebieg zbliżony do związków otrzymanych w pracy [25] dla układu ze zmienionym miejscem pobudzenia detonacji i osłoną. Podobnie jak tam zaznacza się dwustopniowy charakter procesu. Pierwsza jego faza to przeciwbieżne napędzanie linera [21-23], druga rozpoczyna się po dojściu do ciężkiego linera FU powstałej po zderzeniu FD z dodatkowym linerem. Z rys. 2-4 wynika, że ze wzrostem grubości (masy) ładunku MW zwiększają się prędkości linerów w układach A i B, przy czym zmniejsza się różnica końcowych prędkości linera $|\bar{v}_A - \bar{v}_B|$.



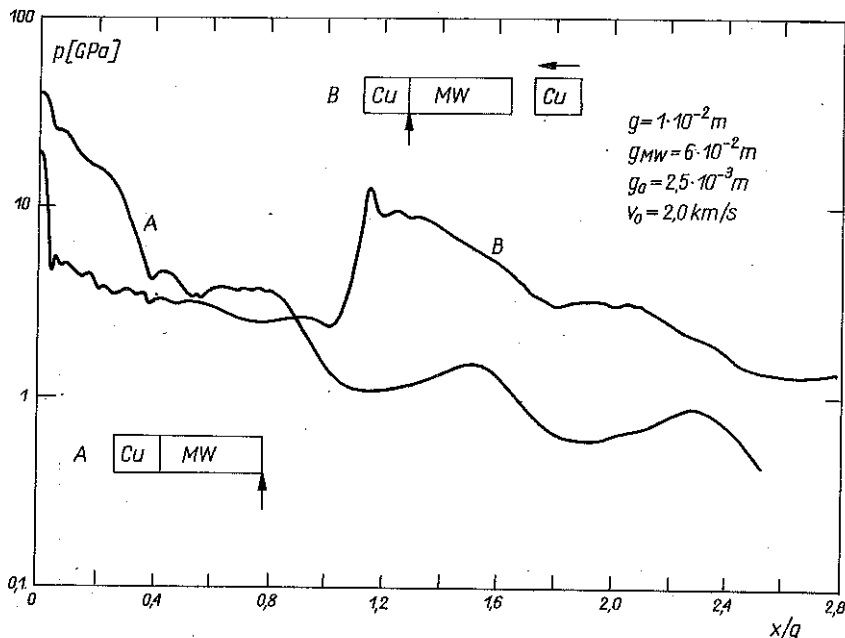
Rys. 2. Zależność średniej prędkości napędzanego linera od jego położenia w układach A i B ($g_{MW} = 1,5 \cdot 10^{-2} m$)



Rys. 3. Zależność średniej prędkości napędzanego linera od jego położenia w układach A i B ($g_{MW} = 3,0 \cdot 10^{-2} m$)



Rys. 4. Zależność średniej prędkości napędzanego linera od jego położenia w układach A i B ($g_{MW} = 6,0 \cdot 10^{-2} m$)

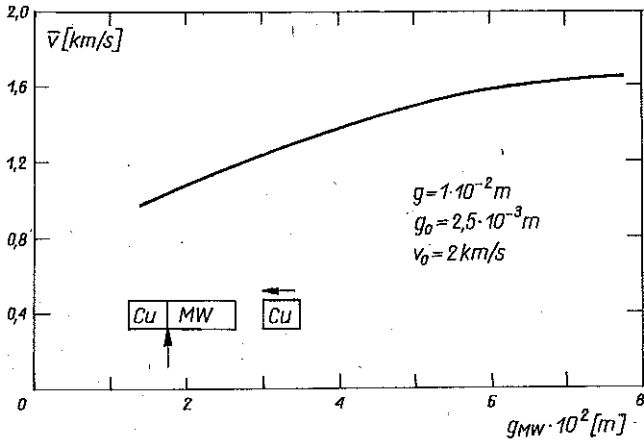


Rys. 5. Zależność ciśnienia na granicy napędzany liner — produkty detonacji od położenia lineru

Przewaga układu B, wyrażająca się w większym \bar{v} , zaznacza się przede wszystkim dla ładunków MW o małej masie (m_{MW}). Można to wytłumaczyć mniejszym (niż dla dużych ładunków MW) wpływem efektu odciążenia, który związany jest z ruchem ciężkiego lineru w pierwszej fazie jego napędzania. Ruch ten powoduje rozrzedzenie PD, zmniejszenie intensywności FU propagującej się w gazach powybuchowych i w rezultacie mniejsze przyrosty \bar{v} . Ponadto dla ładunków o małej masie MW wpływ efektów wywołanych przez dodatkowy liner jest większy. Przy zmniejszaniu g_{MW} rośnie bowiem stosunek energii kinetycznej dodatkowego lineru $m_0 v_0^2/2$ do energii chemicznej wydzielonej w procesie detonacji $m_{MW} Q$ (Q oznacza ciepło wybuchu jednostki masy MW).

Z porównania wykresów zamieszczonych na rys. 2–4 wynika, iż liner napędzony w układzie B osiąga swą maksymalną prędkość na drodze większej niż w układzie A.

Na rys. 5 przedstawiono zmianę ciśnienia na granicy ciężki liner–PD jako funkcję położenia lineru. Podobnie jak na rys. 2–4, na tym rysunku również zaznacza się dwustopniowy charakter procesu napędzania w układzie B (moment dojścia do lineru FU propagującej się w PD objawia się w gwałtownym wzroście ciśnienia). Z zamieszczonych wykresów wynika, że przy prędkości dodatkowego lineru $v_0 = 2 km/s$ maksymalne ciśnienie występujące w układzie B jest mniejsze niż w układzie A. Zwraca także

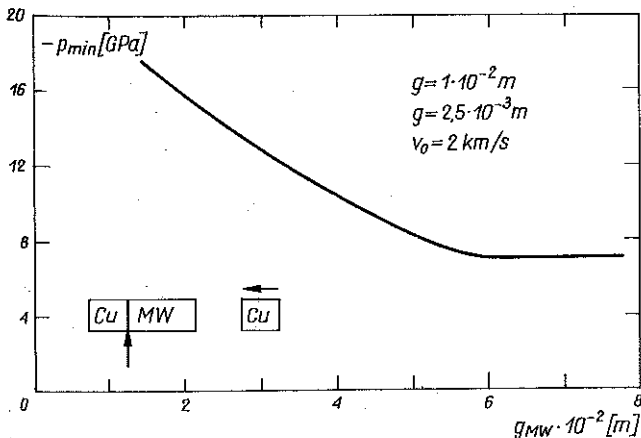


Rys. 6. Zależność maksymalnej prędkości lineru napędzanego w układzie B od grubości ładunku MW

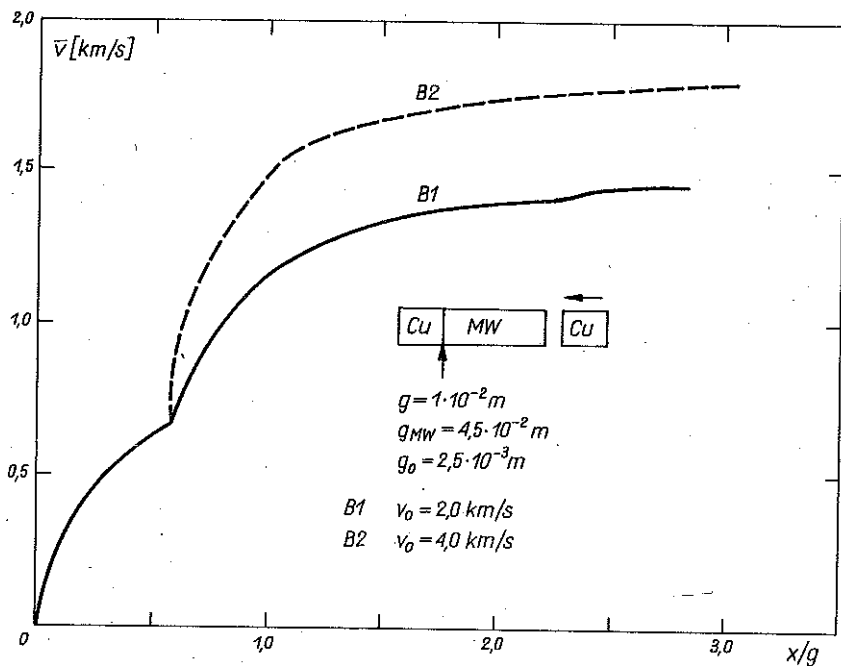
uwagę nieregularny charakter zmian ciśnienia, będący wynikiem procesów falowych w linerze i PD.

Na rys. 6 pokazano zależność maksymalnej prędkości ciężkiego lineru napędzanego w układzie B, a na rys. 7 wartości minimalnych ciśnień w linerze jako funkcję grubości ładunku MW. Rysunki te potwierdzają wniosek sformułowany przy omawianiu rys. 2-4. Pokazują bowiem, że od pewnej wartości g_{MW} zwiększenie grubości ładunku MW nie daje istotnego zwiększenia prędkości \bar{v} lub zmniejszenia maksymalnego naprężenia rozrywającego σ ($\sigma = -p$).

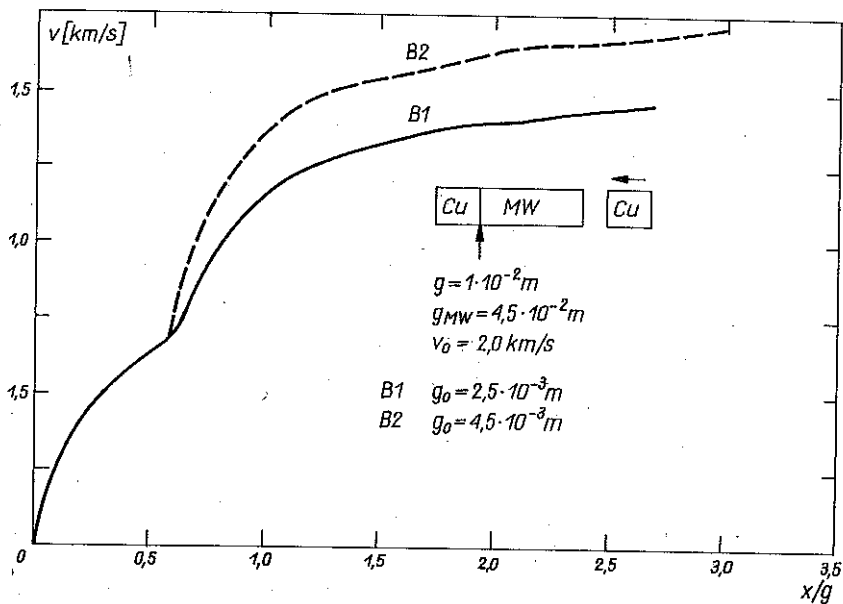
Na rys. 8 i 9 pokazano wpływ energii kinetycznej dodatkowego lineru na przebieg procesu napędzania ciężkiego lineru w układzie B. Jak należało



Rys. 7. Zależność minimalnych ciśnień w linerze napędzanym w układzie B od grubości ładunku MW



Rys. 8. Zależność średniej prędkości linera napędzanego w układzie B od jego położenia $v_0 = 2,0$ i $4,0 \text{ km/s}$



Rys. 9. Zależność średniej prędkości linera napędzanego w układzie B od jego położenia ($g_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ i $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$)

oczekiwać, zwiększenie przy ustalonych pozostałych parametrach układu prędkości v_0 (rys. 8) lub grubości g_0 (rys. 9) dodatkowego lineru powoduje wzrost prędkości napędzanego ciężkiego lineru.

4. PODSUMOWANIE

Opierając się na hydrodynamicznym modelu opisu zjawisk, dokonano analizy obliczeniowej układów do napędzania ciężkich linerów. Porównano układy: klasyczny oraz ze zmienionym miejscem pobudzenia detonacji, w którym ruch brzegu MW wymuszony jest przez dodatkowy liner. Z zamieszczonych rezultatów wynika, że w zmodyfikowanym układzie droga napędzania lineru jest większa niż w układzie klasycznym.

Korzyści płynące z zastosowania zmodyfikowanego układu zaznaczają się przede wszystkim wówczas, gdy stosunek mas napędzanego lineru i MW (m/m_{MW}) jest mały (por. rys. 2 i 7). Przewaga tego układu nad klasycznym polega na osiąganiu większych końcowych prędkości napędzanego lineru bez jego fragmentacji. Trzeba jednak zaznaczyć, że układ ze zmienionym miejscem pobudzenia detonacji i wymuszonym ruchem brzegu MW jest jednak bardziej złożony i kłopotliwy do realizacji eksperymentalnej.

LITERATURA CYTOWANA W TEKŚCIE

1. A. K. AZIZ, H. HURWITZ, H. M. STERNBERG, *Energy transfer to a rigid piston under detonation loading*, Phys. Fluids, **4**, 3, 1961.
2. К. П. СТАНЮКОВИЧ, *Неустановившиеся движения сплошной среды*, Наука, Москва 1971.
3. Г. И. КАНЕЛЬ, А. М. МОЛОДЕЦ, А. А. ВОРОБЬЕВ, *О метании пластин взрывом*, ФГИВ, **6**, 1974.
4. Ф. А. БАУМ, Л. П. ОРЛЕНКО, К. П. СТАНЮКОВИЧ, В. П. ЧЕЛЫШЕВ, Б. И. ШЕХТЕР, *Физика взрыва*, Наука, Москва 1975.
5. J. M. WALSH, M. H. RICE, R. G. MCQUEEN, F. L. YARGER, *Shock-wave compressions of twenty seven metals. Equation of state of metals*, Phys. Rev., **108**, 2, 1957.
6. Л. В. АЛЬТШУЛЕР, *Применение ударных волн в физике высоких давлений*, УФН, **85**, 2, 1965.
7. R. TRĘBIŃSKI, W. TRZCIŃSKI, E. WŁODARCZYK, *A method for determining shock adiabates and expansion isentropes for multicomponent porous media*, J. Tech. Phys., (in print).
8. R. TRĘBIŃSKI, W. TRZCIŃSKI, E. WŁODARCZYK, *On assessing the pressure value at the shock-wave front in multicomponent samples loaded by impact of the liner*, J. Tech. Phys., (in print).
9. А. А. ДЕРИБАС, *Физика упрочнения и сварки взрывом*, Наука, Новосибирск 1980.
10. А. В. КРУПИН, В. Я. СОЛОВЬЕВ, Н. И. ШЕФТЕЛЬ, А. Г. КОБЕЛЕВ, *Деформация металлов взрывом*, Металлургия, Москва 1975.
11. W. BABUL, *Odkształcanie metali wybuchem*, WNT, Warszawa 1980.
12. W. BABUL, S. ZIEMBA, *Materiały wybuchowe w technologicznych procesach obróbki tworzyw*, Warszawa, PWN 1972.

13. J. R. RINCHEART, J. PEARSON, *Behaviour of metals under impulsive loads*, Cleveland, Amer. Soc. Metals, 1954.
14. S. KALISKI, *Explosion compression of plasma up to critical values of thermonuclear micro-fusion*, J. Tech. Phys., **18**, 1, 1977.
15. H. DERENTOWICZ, K. GAC, K. JACH, E. WŁODARCZYK, *On possibility of initiating an avalanche reaction of the thermonuclear fusion in spherical explosion systems, Part. I. One-liner systems*, J. Tech. Phys., **25**, 3-4, 1984; *Part II. Two-liner systems*, J. Tech. Phys., **26**, 2, 1985.
16. A. S. BALCHAN, G. R. COWAN, *Method for accelerating flat plates to high velocity*, Rev. Scientific Instruments, **35**, 8, 1964.
17. R. ŚWIERCZYŃSKI, J. TYL, E. WŁODARCZYK, *Single-stage, layered setup for diving the plane-symmetry liners*, J. Tech. Phys., **26**, 2, 1985.
18. А. Г. ИВАНОВ, В. Н. МИНЕЕВ, *О масштабных эффектах при разрушении*, ФГиб, **5**, 1979.
19. J. N. JOHNSON, *Dynamics fracture and spallation in ductile solids*, J. Appl. Phys., **52**, 4, 1981.
20. J. TYL, *A study of the possibility of reducing the tensile stress produced in an explosion driven liner*, J. Tech. Phys. **25**, 1, 1984.
21. E. WŁODARCZYK, A. WIŚNIEWSKI, *The influence of the diaphragm of a cumulation charge on the propagation of the lateral expansion wave of gaseous detonation products*, J. Tech. Phys., **23**, 2, 1982.
22. E. WŁODARCZYK, *Hamowanie rozlotu produktów detonacji przez warstwę ośrodka sprężystego*, Rozpr. Inżyn., **32**, 1, 1984.
23. E. WŁODARCZYK, *Slowing down the expansion of detonation products by a nonelastic layer*, J. Tech. Phys., **24**, 3, 1983.
24. А. Г. ИВАНОВ, Г. Я. КАРПЕНКО, *О разгоне тонких пластин продуктами взрыва при различных способах иницирования ВВ*, ФГиб, **2**, 1980.
25. J. TYL, E. WŁODARCZYK, *Analiza procesu napędzania linerów w próżni za pomocą materiałów wybuchowych*, Rozpr. Inżyn., **29**, 3, 1981.
26. С. А. КИНЕЛОВСКИЙ, *О метании плоского несжимаемого поршня продуктами детонации*, ПМТФ, **5**, 1982.
27. E. WŁODARCZYK, *Reflection of a strong detonation wave from a moving non-deformable partition*, J. Tech. Phys., **21**, 4, 1980.
28. E. WŁODARCZYK, *Plane expansion of real detonation products. Closed form solutions*, J. Tech. Phys., **25**, 3-4, 1984.
29. J. H. TILLOTSON, *Metallic equations of state for hypervelocity impact*, Report GA-3216, 1962.
30. E. L. LEE, H. C. HORNIG, J. W. KURY, *Adiabatic expansion of high explosive detonation products*, Rept. UCRL-50422, 1968.

РЕЗЮМЕ

ВЗРЫВНЫЙ РАЗГОН ТОЛСТЫХ ПЛОСКИХ ЛАЙНЕРОВ

Проведен численный анализ взрывных систем для разгона лайнеров с большой массой. Показано, что система с измененным местом возбуждения детонации и вынужденным (дополнительным лайнером) движением границы взрывчатого вещества может быть „конкурирующей” по сравнению с классической системой. Позволяет она увеличить конечную скорость „тяжелого” лайнера, снижая одновременно в лайнере значение разрушающих напряжений.

SUMMARY

EXPLOSIVE PROPELLING OF THE THICK PLANAR LINERS

Numerical analysis of the explosive propelling systems for the liners of large mass has been carried out. It has been shown that the system with changed detonation initiation point and with the movement of explosive material boundary forced by an additional liner can be competitive in respect to the classical system. It allows for increasing the final velocity of the heavy liner, while the disrupting stresses in the liner are reduced.

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

INSTYTUT FIZYKI PLAZMY

I LASEROWEJ MIKROSYNTEZY IM. SYLWESTRA KALISKIEGO

Praca została złożona w Redakcji w dniu 8 września 1986 r.
