

3

# TECHNIKA LOTNICZA

DWUMIESIĘCZNIK SEKCJI LOTNICZEJ STOWARZYSZENIA  
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW MECHANIKÓW POLSKICH

MAJ ● 1960 ● CZERWIEC

## TREŚĆ ZESZYTU

	str.
O nowe kierunki w technologii produkcji przemysłu lotniczego . . . . .	65
J. CHOMIAK, A. KOWALEWICZ: Zastosowanie analogii hydraulicznej do ilościowych badań gazodynamicznych . . . . .	66
S. SCHEFFS: Lutowanie aluminium i jego stopów, cz. II . . . . .	77
A. J. TIESLENKO: Obłodzenie silników odrzutowych . . . . .	88
Na półkach księgarskich . . . . .	93
Przegląd Dokumentacyjny Lotnictwa . . . . .	94
Pomoce konstruktorskie — T. WIŚLICKI: Obróbka skrawaniem stopów lekkich i tytanu, c.d. . . . .	okł.



# Pomoce konstruktorskie „Techniki Lotniczej”

## Obróbka skrawaniem stopów lekkich i tytanu, c. d.

c.d. z n-ru 2/60

### 5 Pogłębianie

Pogłębianie i nawiercanie otworów wykonuje się przy użyciu pogłębiaczy normalnych ze staliszybkotnącej z ostrzami spiralnymi przy szybkościach skrawania w zakresie 12 do 40 m/min. Naturalnie ten sposób obróbki możliwy jest jedynie dla niektórych gatunków tworzyw sztucznych jednorodnych.

### 6 Rozwiercanie

Wykańczanie otworów przez rozwiercanie jest rzadko stosowaną metodą obróbki tworzyw sztucznych, możliwą jedynie dla niektórych twardych gatunków żywic jednorodnych oraz warstwowych wzmacnianych tkanina bawełnianą.

Ogólnym warunkiem prawidłowej pracy narzędzia i ekonomicznej obróbki jest stosowanie odpowiednich nadatków, które w zależności od średnicy otworu winny wynosić:

- 0,2 mm dla średnicy do 5 mm
- 0,3 mm dla średnicy 5 do 10 mm
- 0,4 mm dla średnicy 10 do 20 mm
- 0,5 mm dla średnicy ponad 20 mm

Obróbkę prowadzi się narzędziami ze stali szybkotnącej, najlepiej jednak stosować rozwiertaki z ostrzami ze spieków twardych przyjmując w tych przypadkach dla tworzyw prascowanych szybkość skrawania 20 do 30 m/min i posuw 0,1 mm/obr. Zaleca się stosowanie rozwiertaków nastawnych.

### 7 Gwintowanie

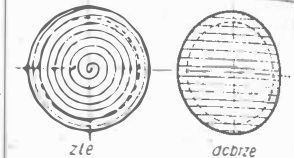
Tworzywa termoutwardzalne, z uwagi na cechę, że najczęściej duża wrażliwość na działanie karbu, nie powinny być nacinane gwintem trójkątnym, ani jakimkolwiek innym o ostrych przejściach. Jeśli niemożliwe jest zastosowanie gwintów całkowicie okrągłych należy stosować trójkątne zaokrąglone np. typu Whitwortha.

Przy nacinaniu gwintów zwracać należy większą uwagę na ich czystość, niż na prędkość skrawania. W związku z tym dość ważny jest dobór smaru, który

winien być talk lub olej, a w żadnym przypadku woda. Dla średnic poniżej 15 mm możliwe jest nacinanie gwintu w jednym przejściu, powyżej natomiast konieczna jest obróbka zgrubna i wykańczająca.

Podobnie jak dla wiertel spiralnych zaleca się stosowanie gwintowników z szerokimi zóbkami dla szybkiego odprowadzenia wiórow.

Tworzywa warstwowe należy gwintować przy zachowaniu warunku prostopadłości osi otworu do kierunku warstw wypełniacza, aby uniknąć rozwarstwienia. Przy wykonywaniu śrub z tworzyw sztucznych nie należy, powodując się względami oszczędności, wychodzić z wałków z uwagi na sposób ich uwarstwienia powodujący znaczne osłabienie gwintu. Korzystne jest natomiast wytrzymałościowo wyjście z polfabrykatu w postaci płyty, ponieważ warstwy wypełniacza leżą tu nie koncentrycznie, lecz równoległe co daje obniżenie wytrzymałości na ścinanie tylko w dwu punktach na obwodzie. Zagadnienie to najlepiej wyjaśnia rys. 11.



Rys. 11. Wadliwe i prawidłowe wykonanie gwintu na wałku z tworzywa warstwowego

Gwinty wewnętrzne wykonuje się najczęściej gwintownikami dwu lub trzy zóbkowymi; ręcznie, na tokarni lub rewolwerowce.

Gwinty zewnętrzne wykonuje się na tokarni nożem profilowym grzebieniowym lub frezem zamocowanym na przystawce typu „fortunki”, względnie na rewolwerowce za pomocą specjalnych głowic.

Gwintowniki z ujemnym kątem natarcia  $\beta = 5^\circ$  nie powodują zadziórów i łatwiejsze są do wkręcania, stosuje się jednak również kąt dodatni  $\beta = 3^\circ$ , a dla twardej gumy nawet  $6^\circ$ . Szybkość gwintowania maszynowego wynosi 3-5 m/min dla tworzyw twardych i twardej gumy oraz 8-10 m/min dla tworzyw miękkich. Zadawalające wyniki uzyskuje się również przy szybkościach do 15 m/min. Średnica gwintowników winna być większa o 0,05-0,15 mm od nominalnej średnicy gwintu ze względu na kurczenie się otworu po gwintowaniu.

Otwory pod gwinty w tworzywach sztucznych należy

c.d. na str. 3 okładki

#### CONTENTS

	Page
For new trends in production technology of aircraft industry	65
J. CHOMIAK, A. KOWALEWICZ: Application of hydraulic analogy for quantitative gasdynamic investigations	66
S. SCHEFFS: Soldering of aluminium and of its alloys, part II	77
A. J. TIESLENKO: Icing of jet engines	88
On Bookseller's Shelves	93
Aviation Documentation Review	94
Designer's Data Sheets — T. WIŚLICKI: Machining of light alloys and titanium (cont.)	on covers

#### СОДЕРЖАНИЕ

О новые направления в технологии производства авиационной промышленности	65
J. CHOMIAK: Применение гидравлической аналогии для количественных газодинамических исследований	66
S. SCHEFFS: Пайка алюминия и его сплавов, часть II	77
A. I. TIESLENKO: Обледенение газотурбинных двигателей	88
На книжных полках	93
Документационный обзор авиации	94
Конструкторские пособия. — T. WIŚLICKI: Обработка резкой легких сплавов и титана, часть II	обложки

TECHNIKA LOTNICZA — Dwumiesięcznik Sekcji Lotniczej Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich  
Wydawnictwa Czasopism Technicznych NOT. Redaguje Komitet Redakcyjny.

Redaktor naczelny — mgr inż. Stefan Sulikowski, redaktor techniczny: Zbigniew Samborski, sekretarz redakcji: Jarosława Berzyńska

Adres Redakcji: Warszawa, Czackiego 3/5, tel. 674-61.

Adres Administracji: Administracja Czasopism Technicznych NOT, Warszawa, ulica Mickiewicza 18, tel. 33-11-72 i 33-01-11

Cena pojedynczego zeszytu 12.— zł

Prenumerata roczna 72.— zł

Półroczna 36.— zł

Wydawnictwa Czasopism Technicznych NOT. Warszawa 1960 r. Ark. wyd. 10,2. Ark. druk. 4. Format A4. Nakład 700 egz.  
Papier druk. sat. kl. IV, 70 g, 61×86. Maszynopis oddano do skład. 15.IV.60. Druk ukończono w sierpniu 60 r. Cena egzemplarza 12 zł

Wrocławska Drukarnia Dzielowa — Zam. 143/A — H-15.



# TECHNIKA LOTNICZA

DWUMIESIĘCZNIK SEKCJI LOTNICZEJ STOWARZYSZENIA  
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW MECHANIKÓW POLSKICH

ROK XV

MAJ — CZERWIEC 1960 R.

ZESZYT 3

## O nowe kierunki w technologii produkcji przemysłu lotniczego

Produkcję lotniczą na przestrzeni poszczególnych etapów jej błyskawicznego wprost rozwoju cechowała zawsze różnorodność i śmiałość nowych koncepcji konstrukcyjnych i technologicznych, i temu to właśnie zjawisku przypisać należy fakt przodującej roli przemysłu lotniczego w postępie technicznym. Tego już udowodnić nie potrzeba, stało się to bowiem oczywiste dla każdego kto ma jakikolwiek kontakt z techniką. Nie dla wszystkich może jednak oczywiste jest, że nie może być nowoczesnego przemysłu lotniczego bez nowych metod produkcji nawet w tych przypadkach, jeśli aktualny program produkcyjny nie jest ultranowoczesny.

Konieczność stosowania postępowych metod technologicznych podyktowana może być względami technicznymi i ekonomicznymi. O względach technicznych mówimy wtedy, jeśli wykonanie nowoczesnej konstrukcji przy ujęciu ogólnie przyjętych metod produkcyjnych jest niemożliwe w ogóle lub dawałoby produkt o niepełnej wartości, czy niedoskonalej jakości. O względach ekonomicznych mówimy natomiast wówczas, jeżeli wprowadzenie nowej technologii pociągnie za sobą obniżkę kosztów wytwarzania.

Wydaje się, że czas już najwyższy poddać ogólnej ocenie aktywu technicznego naszego przemysłu poziom stosowanych metod technologicznych na tle produkcji bieżącej i perspektyw w tym zakresie. Należy dokonać analizy, która by spowodowała rozróżnienie aspektów technicznych i ekonomicznych i pociągnęła za sobą uwzględnienie w planach rozwojowych wyposażenia zakładów produkcyjnych w odpowiednie urządzenia. Całe to zagadnienie wydaje się jak najbardziej aktualne z tego chociażby względu, że specjalne wyposażenie produkcji lotniczej jest nie tylko drogie, ale również trudne do sprowadzenia ze względu na swą unikalność. Ponadto może ono wymagać nieraz również znacznego wyprzedzenia w postaci czy to przygotowania i zamówienia odpowiednich materiałów, czy też czasu na opanowanie procesów technologicznych.

Z obserwacji kierunków rozwojowych metod produkcji w krajach przodujących pod tym względem można wyciągnąć wnioski potwierdzające wyniki rozważań jak najbardziej ogólnych, że w zakresie wytwarzania elementów konstrukcji przodująca rola przypadnie metodom obróbki plastycznej, a w dziedzinie metod ich łączenia przyszłość należy do elektrycznego zgrzewania oporowego i klejenia. W obu tych dziedzinach ostatnie słowo będzie miała naturalnie mechanizacja i automatyzacja niektórych operacji lub też całych procesów produkcyjnych.

Nawiązując do potrzeb naszego przemysłu i to potrzeb chyba najbardziej naglących, należy zwrócić specjalną uwagę na zagadnienia plastycznego kształtowania blach i profili. Wprowadzenie właściwych metod obróbki plastycznej elementów blaszanych i pokryć płatowców pozwoli nie tylko na uzyskanie produkcji wysokiej jakości, ale przede wszystkim wpłyne na obniżenie ilości braków, ułatwienie montażu, a w efekcie końcowym na znaczne obniżenie kosztów produkcji. Dla ułatwienia bardziej wnikliwej analizy potrzeb naszych zakładów w tym względzie można podać, że kształtowanie plastyczne blach i profili stanowi w produkcji nowoczesnego płatowca około 15% całkowitej jego pracochłonności. Ciekawe może być również, jak wartość ta przyjęta za 100% rozkłada się na poszczególne metody obróbki plastycznej. Na tej bowiem podstawie najlepiej będzie można ocenić, czy przyjęte przez nas kierunki są słuszne. Nie wchodząc w szczegółowe rozważania tego zagadnienia jako całości, wymienimy tylko, że kształtowanie blach foremnikiem

elastycznym (np. na prasach tunelowych) stanowi 15%, kucie blach na młotach spadowych w foremnikach z materiałów łatwotopliwych — 16%, obciążanie profili — 27%, obciążanie blach pokrzykowych — 10%. Dodać trzeba, że w niektórych przypadkach prace związane z kształtowaniem rur przekroczycy mogą 10% pracochłonności wszystkich prac objętych obróbką plastyczną.

Przytoczone wyżej wartości mogą ulegać pewnym nieznacznym wahaniom w zależności od typu płatowca i przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych, powinny być jednak wskaźnikiem wyjściowym dla ustalenia wyposażenia produkcji nowoczesnych płatowców metalowych w tym zakresie.

Czy nie należałoby wobec tego postawić sobie pytanie: jak na tle tych wymagań wygląda rzeczywistość w naszych zakładach produkcyjnych? Pozostawiając odpowiedź kierownictwu poszczególnych zakładów, należy dodać, że jeśli dotychczas potrzeby w zakresie wyposażenia do obróbki plastycznej nie dawały o sobie znać akcentem bezwzględnej konieczności, to stanie się to z pewnością w najbliższej już przyszłości.

Potrzeba wprowadzenia nowych metod łączenia blach nie jest bynajmniej równoznaczna z rezygnacją z powszechnie dotychczas stosowanego nitowania. W dziedzinie tej pozostaje jeszcze bardzo dużo do zrobienia dla poprawienia jakości połączeń i zmniejszenia pracochłonności procesu. Niemniej jednak nitowanie z uwagi na sam charakter tego wielozadaniowego procesu zawsze będzie ustępowało innym metodom łączenia pod względem ekonomiczności. Również wymagania gładkości powierzchni nowoczesnych konstrukcji bardzo trudno jest zapewnić przez nitowanie. Wszystko to przemawia za koniecznością wprowadzenia nowych metod łączenia, z których zgrzewanie wydaje się w chwili obecnej najbardziej aktualne także z uwagi na rolę, jaką odgrywa przy produkcji silników odrzutowych.

Z obserwacji postępu technologii produkcji lotniczej należy jednak wysnuć wnioski, że w zastosowaniu do naszych potrzeb olbrzymią rolę odegrać może wprowadzenie klejenia. Jeśli nawet nie mamy obecnie konstrukcji przewidzianych dla tej techniki łączenia, to trzeba wziąć pod uwagę, że wymaga ona bardzo pracochłonnego opracowania i przygotowania łącznie z opanowaniem produkcji odpowiednich klejów, a w przypadku powodzenia na tych odcinkach konstruktorzy zachęteni bardzo poważnymi zaletami technicznymi i ekonomicznymi z pewnością natychmiast skorzystają z takiej okazji. Stąd też chyba wniosok, że zapoczątkowane już prace w tej dziedzinie należy jak najbardziej rozwinąć i otoczyć opieką.

Zagadnienie właściwej oceny roli obróbki wiórowej w budowie płatowców jest bardzo trudne do sprecyzowania zwłaszcza w ujęciu perspektywicznym. Z jednej strony należy ją uznać za najmniej korzystną z uwagi na wytrzymałość i ciężar obrabianego elementu i dążyć do zastąpienia przez odkawkę, wypraski i odlewy, z drugiej zaś — wobec dążenia do integralności konstrukcji — trzeba zdawać sobie sprawę z tego, że jest to jedna z tańszych, a w naszych warunkach jedna z niewielu dostępnych metod wytwarzania elementów integralnych. W praktyce kompromis w tym względzie wyraża się udziałem 25 do 30% pracochłonności obróbki wiórowej w stosunku do całkowitej na płatowiec klasy dużego nowoczesnego transportowca. Jednakże obróbka wiórowa, o której wspominaliśmy, w niewielkim tylko procentie da się zabezpieczyć klasycznym parkiem maszynowym — i to właśnie trzeba tu najmocniej pokreślić. Z braku miejsca na szczegółową analizę tego zagadnienia można tylko

stwierdzić, że podstawową rolę odgrywają tu specjalne frezarki, kopiarki. Chcąc nadrobić nasze zaległości w zakresie nowoczesnych metod wytwarzania wydaje się, że najwyższy już czas pomyśleć o wyposażeniu niektórych zakładów w nowoczesne frezarki ze sterowaniem programowym. Obrabiarki takie stosowane są już za granicą tak powszechnie również poza przemysłem lotniczym, że dalsze wstrzymywanie się od zdecydowanych posunięć w tym zakresie może nas postawić w położeniu takiego zacofania technicznego, z którego trudno będzie później wybrnąć drogą normalnego rozwoju, nie mówiąc już o tym, że osiągnięcie czołówki postępu technicznego w tym zakresie może stać się zupełnie nieosiągalne.

Ostatnich kilka słów należy się niewątpliwie konstrukcjom przekładkowym (warstwowym) znanym za granicą powszechnie pod nazwą sandwichowych. W krajach stojących na wysokim poziomie techniki konstrukcje te wyszły już dawno z przemysłu lotniczego, gdzie się narodziły i rozwinęły,

wkraczając nie tylko do innych gałęzi przemysłu maszynowego, ale również do budownictwa i wielu innych dziedzin nowoczesnego życia. Pierwsze kroki stawiane u nas w tej dziedzinie z jednej strony, a z drugiej nagłące potrzeby przemysłu szybowcowego i płatowcowego, narzucają konieczność zwrócenia baczonej uwagi na to zagadnienie, ponieważ technologia procesów wytwarzania i późniejszego kształtowania wypełniaczy do konstrukcji warstwowych a zwłaszcza wypełniaczy komórkowych, nastęrczy niewątpliwie szereg problemów technicznych.

Ten krótki i fragmentaryczny przegląd rzeczywistości omawianego zagadnienia nie wyczerpuje niewątpliwie wszystkich aktualnych tematów z tej dziedziny i nie to jest jego celem. Zwrócenie uwagi na te sprawy powinno zastrzec ich kontrast na tle kłopotów codziennej bieżącej produkcji i doprowadzić do dokładniejszego rozważania i przedyskutowania nowych kierunków rozwoju technologii lotniczej.

Mgr inż. JERZY CHOMIAK, mgr inż. ANDRZEJ KOWALEWICZ  
Instytut Lotnictwa

## Zastosowanie analogii hydraulicznej do ilościowych badań gazodynamicznych

*W artykule podano analizę możliwości zastosowania analogii hydraulicznej do ilościowych badań gazodynamicznych. Omówiono metody uzyskiwania pełnej analogii przepływu gazu o dowolnym wykładniku izentropii za pomocą kształtowania kanału wodnego oraz metody przeliczania danych uzyskanych dla gazu „hydraulicznego” na gaz o dowolnym wykładniku izentropii. Przedyskutowano wpływ lepkości składowych pionowych prędkości i przyspieszeń, istnienie fal kapilarnych w cieczy oraz występowanie skoków hydraulicznych. Przedstawiono także pewne podstawowe elementy techniki pomiarowej oraz przegląd zastosowań analogii hydraulicznej.*

### OZNACZENIA

$p$ kG/m <sup>2</sup>	— ciśnienie
$T$ °K	— temperatura
$\frac{\text{kG sek}^2}{\text{m}^4}$	— gęstość
$a$ m/sek	— prędkość dźwięku
$a^*$ m/sek	— krytyczna prędkość dźwięku
$u, v, w$ m/sek	— składowe prędkości w kierunku osi układu współrzędnych prostokątnych $x, y, z$
$i$ kcal/kG	— entalpia
$Ma$	— liczba Macha
$k$	— wykładnik izentropii
$\lambda$ m	— długość fali na swobodnej powierzchni cieczy
$c$ m/sek	— prędkość fal powierzchniowych
$Fr = \frac{V}{\sqrt{gZ}}$	— liczba Frouda
$Z$ m	— współrzędna swobodnej powierzchni cieczy
$\Gamma$ kG/m	— napięcie powierzchniowe cieczy
$F$ m <sup>2</sup>	— pole przekroju
$g$ m/sek <sup>2</sup>	— przyspieszenie ziemskie
$A \text{ kcal/kGm} = \frac{1}{427}$	— równoważnik cieplny energii mechanicznej
Indeksy:	
0	— stan niezaburzony
1	— stan przed falą uderzeniową
2	— stan za falą uderzeniową
$x, y, z$	— symbole różniczkowania

### 1. WSTĘP

Otrzymanie za pomocą analogii hydraulicznej dostatecznie dokładnych ilościowych danych dotyczących jedno i dwuwymiarowych przepływów gazów rzeczywistych natrafia na pewne podstawowe trudności.

Zasadniczymi przyczynami tego są:

- różne wielkości wykładnika izentropii gazu rzeczywistego i „hydraulicznego”,
- wpływ lepkości i przewodnictwa cieplnego,

- występowanie pionowych składowych prędkości i przyspieszeń,
- istnienie fal kapilarnych,
- zakłócenia analogii w przypadku występowania fal uderzeniowych.

Po przedstawieniu w artykule [lit. 14] teoretycznych podstaw analogii hydraulicznej, niniejsza praca jako uzupełnienie podaje dokładniejszą ocenę błędów wywołanych wspomnianymi czynnikami, metody ich usuwania i otrzymywania za pomocą analogii hydraulicznej ilościowych wyników pomiarowych. W pracy przedstawiono także podstawowe elementy techniki pomiarów w kanale wodnym oraz przegląd współczesnych zastosowań analogii hydraulicznej ze szczególnym uwzględnieniem potrzeb lotnictwa.

### 2. METODY OTRZYMYWANIA ZA POMOCĄ ANALOGII HYDRAULICZNEJ DANYCH DLA PRZEPŁYWU GAZÓW O DOWOLNYM WYKŁADNIKU IZENTROPY

Dla zachowania podobieństwa przepływów w sensie kinematycznym, dynamicznym i termodynamicznym należy zgodnie z teorią podobieństwa uzyskać:

- tożsamość układów równań określających ruch,
- tożsamość warunków brzegowych i początkowych,
- geometryczne podobieństwo modeli,
- równość kryteriów podobieństwa w dwu odpowiadających sobie punktach porównywanych przepływów.

Przy ruchu ustalonym cieczy ściśliwej nieważkiej tymi kryteriami są:

$$Ma = \text{idem} \quad Fr = \text{idem}$$

$$Re = \text{idem} \quad k = \text{idem}$$

W przypadku analogii hydraulicznej spośród wymienionych warunków osiągnąć można: tożsamość układów równań, warunków początkowych i granicznych w stosunku do prędkości, podobieństwo geometryczne modeli oraz zachować kryterium

$$Ma = Fr$$

Inne warunki w ogólnym przypadku nie są już spełnione. W niniejszym rozdziale rozważone zostanie zagadnienie odmiennych wykładników izentropii gazu „hydraulicznego” i rzeczywistego.

Istnieją dwie metody rozwiązania zagadnienia:

- metoda uzyskiwania w kanale wodnym przepływu o dowolnym wykładniku izentropii gazu „hydraulicznego” przez



zamianę kanału prostokątnego na kanał — dla ruchu jednowymiarowego o odpowiednim dla danego  $k$  przekroju poprzecznym — dla ruchu dwuwymiarowego o odpowiednim przekroju podłużnym;

b) metoda przeliczenia parametrów przepływu gazu „hydraulicznego” o wykładniku izentropy  $k = 2$  na przepływ gazu rzeczywistego, na podstawie utworzenia pewnych kryteriów podobieństwa.

Metoda pierwsza, kształtowania dna, jest bardzo trudna do zrealizowania praktycznego, druga nie została jeszcze ostatecznie i w pełni rozwiązana teoretycznie. Problem bezpośredniego przeliczania parametrów dla przepływów gazów o różnych wykładnikach izentropy ma znaczenie ogólne, jego rozwiązanie pozwoliłoby na ostateczne rozwiązanie zagadnienia modelowania przepływów za pomocą gazów ciężkich, co pozwala na zasadnicze obniżenie mocy urządzeń badawczych (kilkadziesiąt razy), zmniejszenie ich obciążeń i stosowanie prostszych metod i urządzeń pomiarowych.

2.1. Przepływ jednowymiarowy

2.1.1. Kształtowanie przekroju poprzecznego kanału wodnego dla uzyskania analogii z przepływem gazu o dowolnym wykładniku izentropy.

W przypadku jednowymiarowych, bezwirowych przepływów izentropowych można uzyskać analogię między przepływami „płytkiej wody” i gazu doskonałego o dowolnym wykładniku izentropy, dzięki odpowiedniemu kształtowaniu przekroju poprzecznego kanału [lit. 21, 35].

Niech kontur przekroju poprzecznego kanału określony będzie funkcją potęgową

$$y = B(x) \cdot z^n, \tag{2.1}$$

gdzie  $B = B(x)$  jest stałe w danym przekroju oraz  $n$  jest liczbą rzeczywistą.

Równania ciągłości dla cieczy i gazu mają odpowiednio postać:

$$u \cdot F = \text{const} \tag{2.2}$$

$$u \rho F = u \cdot a^{k-1} F = \text{const} \tag{2.3}$$

Pole przekroju poprzecznego przepływu, przyjmując układ współrzędnych zgodnie z rys. 1, otrzymuje się przez całkowanie równania (2.1) w granicach 0 i Z.

$$F = 2 \int_0^Z B(x) z^n = \frac{2}{n+1} B(x) \cdot Z^{n+1} \tag{2.4}$$

Równanie ciągłości dla cieczy przyjmuje zatem postać

$$u \cdot \frac{2}{n+1} B(x) \cdot Z^{n+1} = \text{const}$$

lub

$$u \cdot B(x) \cdot Z^{n+1} = \text{const} \tag{2.5}$$

a po zlogarytmowaniu i zróżniczkowaniu:

$$\frac{du}{u} + \frac{dB}{B} + (n+1) \frac{dZ}{Z} = 0. \tag{2.6}$$

Przyjmując, że  $c \propto \sqrt{Z}$  zachodzi związek

$$2 \frac{dc}{c} = \frac{dZ}{Z}.$$

Równanie (2.6) przyjmuje więc postać

$$\frac{du}{u} + \frac{dB}{B} + 2(n+1) \frac{dc}{c} = 0. \tag{2.7}$$

W analogicznej postaci napisać można równanie ciągłości dla gazu (2.3):

$$\frac{du}{u} + \frac{dF}{F} + \frac{2}{k-1} \cdot \frac{da}{a} = 0. \tag{2.8}$$

Równania (2.7) i (2.8) są identyczne, gdy spełnione są następujące warunki: 1)  $\frac{dB}{B} = \frac{dF}{F}$ , czyli charakter zmian pól

Przekrojów poprzecznych jest identyczny w przypadkach obu przepływów, oraz 2)  $2(n+1) = \frac{2}{k-1}$ , czyli  $n = \frac{2-k}{k-1}$ , (2.9)

a zatem dla dowolnego wykładnika izentropy  $k$  uzyskać można kształt przekroju poprzecznego kanału, warunkujący analogię.

Z równań (2.3) i (2.5) wynika, że gęstości gazu  $\rho$  w analogii hydraulicznej odpowiada wielkość  $Z^{n+1}$  z równania izentropy, że ciśnieniu gazu  $p$  — wielkość  $Z^{n+2}$ , natomiast z równania stanu i powyższych wniosków, temperaturze gazu — wielkość  $Z$ .

Wnioski powyższe można napisać w postaci równań, za pomocą których na podstawie znanych wielkości współrzędnych położenia swobodnej powierzchni cieczy obliczyć można wielkości parametrów gazu:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{n+2}, \tag{2.10a}$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{n+1}, \tag{2.10b}$$

$$\frac{T}{T_0} = \frac{Z}{Z_0}, \tag{2.10c}$$

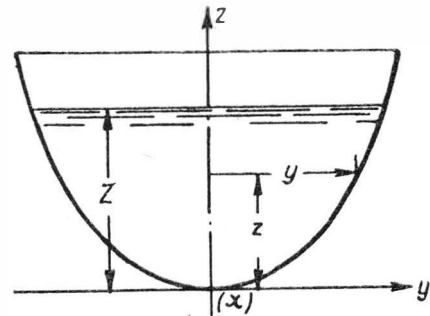
przy czym parametry z indeksem „0” odnoszą się do stanu równowagi.

Lokalnej prędkości dźwięku w gazie  $a = \sqrt{kRT}$  odpowiada prędkość rozprzestrzeniania się długich fal grawitacyjnych określona zależnością

$$c = \sqrt{\frac{gZ}{n+1}}. \tag{2.11}$$

Kryterium porównywalności przepływów jest oczywiście równość liczb Macha i Frouda  $Ma = Fr$ .

W przypadku przepływu powietrza ( $k = 1,4$ ) wielkość



TL-3/60-R1

Rys. 1. Profil przekroju poprzecznego kanału

wykładnika potęgowej funkcji (2.10) wynosi  $n = 1,5$ . Dla  $n = 0$  zależności (2.10a) i (2.10b) sprowadzają się do formy obowiązującej dla fikcyjnego gazu „hydraulicznego” o wykładniku izentropy  $k = 2$ .

2.1.2. Bezpośrednie przeliczanie parametrów gazu „hydraulicznego” na parametry gazu o dowolnym wykładniku izentropy  $k$ .

Istnieje szereg prac omawiających to zagadnienie. Poniżej opisana zostanie jedna z nich, polegająca na założeniu, że dla modeli podobnych stosunek bieżącego pola przekroju przepływu do pola przekroju krytycznego nie zależy od wielkości wykładnika izentropy. Oznaczając liczbę Macha jednego przepływu gazu o wykładniku izentropy  $k_1$  przez  $Ma_1$  oraz przez  $k_2$  i  $Ma_2$  odnośne wielkości dla drugiego przepływu gazu otrzymuje się na mocy powyższego założenia:

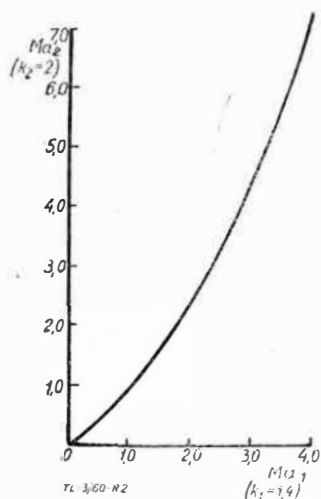
$$\frac{1}{Ma_1} \left( \frac{2}{k_1+1} + \frac{k_1-1}{k_1+1} Ma_1^2 \right)^{\frac{k_1+1}{2(k_1-1)}} = \frac{1}{Ma_2} \left( \frac{2}{k_2+1} + \frac{k_2-1}{k_2+1} Ma_2^2 \right)^{\frac{k_2+1}{2(k_2-1)}}, \tag{2.12}$$

czyli dla danych  $k_1$  i  $k_2$  zachodzi zależność  $Ma_2 = f(Ma_1)$ . Ponieważ stosunki parametrów całkowitych do statycznych są funkcjami liczby Macha i wykładnika izentropy, zatem mając dane wielkości  $k_1, k_2$  oraz  $Ma_2 = Fr_2$  dla przepływu „płytkiej wody”, można obliczyć odpowiednie wielkości

$$\frac{p_0}{p}, \frac{\rho_0}{\rho}, \frac{T_0}{T}$$

dla gazu o wykładniku izentropy  $k_1$ .

Rys. 2 przedstawia wykres funkcji  $Ma_2 = f(Ma_1)$  w przypadku  $k_1 = 1,4$  oraz  $k_2 = 2$ . Za pomocą tego wykresu obliczyć można wymienione wyżej stosunki parametrów powietrza ( $k_1 = 1,4$ ) znając liczbę Macha  $Ma_2$  przepływu gazu „hydraulicznego” ( $k_1 = 2$ ).



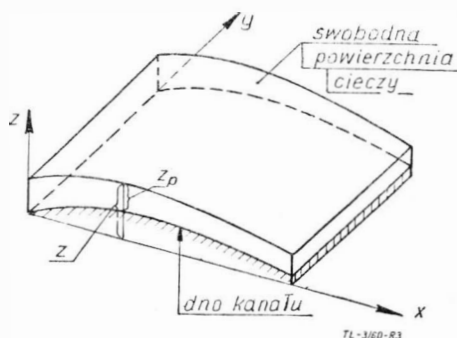
Rys. 2. Wykres zależności  $Ma_2 = f(Ma_1)$

## 2.2. Przepływ dwuwymiarowy

2.2.1. Kształtowanie przekroju poprzecznego kanału wodnego dla uzyskania analogii z przepływem gazu o dowolnym wykładniku izentropy.

Podobnie jak w przypadku jednowymiarowych także i dla przepływów dwuwymiarowych można ukształtować kanał wodny w ten sposób, aby uzyskać pełną analogię przepływu cieczy z przepływem gazu o dowolnym wykładniku izentropy [lit. 24]. Dla przepływu dwuwymiarowego nie należy oczywiście zmieniać kształtu przekroju poprzecznego kanału, który musi pozostać prostokątny, gdyż prędkość rozchodzenia się fal w danym punkcie, będąca funkcją głębokości, musi być taka sama we wszystkich kierunkach; można natomiast zmieniać profil przekroju podłużnego kanału.

Wycinek kanału o zmiennym profilu dna przedstawiono schematycznie na rys. 3. W przypadku ruchu ustalonego,



Rys. 3. Wycinek kanału o zmiennym profilu dna

przy zwykle stosowanych w analogii hydraulicznej założeniach, równanie ruchu posiada postać:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} = c_1^2 \frac{\partial Z}{\partial y}, \quad (2.13)$$

gdzie

$$c_1^2 = g \cdot Z_1 \quad \bar{Z} = \frac{Z}{Z_1}$$

$Z_1$  — głębokość w ustalonym punkcie.

Równanie ciągłości:

$$\frac{\partial}{\partial x} (Z_p \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y} (Z_p \cdot v) = 0 \quad (2.14)$$

Dla gazu odpowiednie równanie można napisać w następujący sposób:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{a_1^2}{k-1} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho}{\rho_1} \right)^{k-1} \quad (2.15)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{a_1^2}{k-1} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho}{\rho_1} \right)^{k-1}$$

$$\frac{\partial [\rho \cdot u]}{\partial x} + \frac{\partial [\rho \cdot v]}{\partial y} = 0; \quad (2.16)$$

wprowadzając w równania (2.15) i (2.16) funkcję

$$\frac{\rho}{\rho_1} = (k-1)^{\frac{1}{k-1}} H^{\frac{1}{k-1}}$$

otrzymuje się równania identyczne z równaniami (2.1) i (2.14), w których

$$\bar{Z}_p = (k-1)^{\frac{1}{k-1}} \bar{Z}^{\frac{1}{k-1}},$$

gdzie

$$\bar{Z}_p = \frac{Z_p}{Z_1} \quad (2.1)$$

Oczywiście w parametrach bezwymiarowych dla wody

$$\bar{u} = \frac{u}{c_1}; \bar{v} = \frac{v}{c_1}, \text{ a dla gazu } \bar{u} = \frac{u}{a_1}; \bar{v} = \frac{v}{a_1}.$$

Tak więc dla uzyskania pełnej analogii przepływu cieczy w kanale wodnym z przepływem gazu o dowolnym wykładniku izentropy dno w przypadku przepływu dwuwymiarowego należy ukształtować według zależności (2.17). Jak więc kształt ten zależy nie tylko od  $k$ , ale i od  $Z_p$ , czyli grubości strumienia cieczy, a więc potrzebną dla istnienia analogii powierzchnię dna kanału należy poszukiwać metodą kolejnych przybliżeń.

2.2.2. Bezpośrednie przeliczanie parametrów gazu hydraulicznego na parametry gazu o dowolnym wykładniku izentropy  $k$ .

Możliwość kształtowania dna kanału wodnego dla uzyskania analogii hydraulicznej dwuwymiarowego przepływu gazu o dowolnym wykładniku izentropy  $k$  posiada jedynie znaczenie teoretyczne. Ponieważ kształt dna zależy od  $k$  i przekładu głębokości, a więc od badanego modelu, tego rodzaju kanał bardzo trudny do wykonania przystosowany jest jedynie do jednego pomiaru.

Umiejętność przeliczania parametrów przepływu w kanale wodnym o przekroju prostokątnym na parametry gazu o dowolnym wykładniku izentropy posiada więc znaczenie podstawowe.

Istnieją dwie metody rozwiązania postawionego zadania: pierwsza oparta na zastosowaniu parametrów podobieństwa zblizonych do wyrażeń uzyskanych przez Karman [lit. 13] dla przepływów okołodźwiękowych; druga wynikająca z pewnych własności hiperbolicznych równań różniczkowych. Kolejno przedstawione zostaną obie metody.

Równanie potencjału prędkości zakłócenia

$$\varphi = -u x_0 + \Phi,$$

w którym uwzględnia się tylko najbardziej istotne wyrazy drugiego rzędu dla przypadku przepływu płaskiego, można napisać w postaci

$$(1 - Ma_0^2) \varphi_{xx} + \varphi_{yy} = K \varphi_x \varphi_{xx} \quad (2)$$

Z podstawowych założeń teorii małych zaburzeń, na podstawie której otrzymuje się równanie (2.18), wynika, że równanie to ważne zarówno dla obszarów przed, jak i za falą uderzeniową nie może być zastosowane do samej fali uderzeniowej, to znaczy nieciągłości  $\varphi$ . Do zastosowania ważnego z punktu widzenia analogii hydraulicznej należy je uzupełnić przez równanie opisujące zjawiska w fali uderzeniowej na przykład równanie biegunowej uderzeniowej

$$v_2^2 = (u_1 - u_2)^2 \frac{u_1 u_2 - a^{*2}}{2 u_1^2 - u_1 u_2 + a^{*2}}, \quad (2)$$

gdzie

$u_1$  — prędkość przed falą uderzeniową,  
 $u_2$  i  $v_2$  — prędkości za falą odpowiednio równoległą i normalną do  $u_1$ ,  
 $a^*$  — krytyczna prędkość dźwięku.

Podstawiając na miejsce prędkości gradienty odpowiednich potencjałów otrzymuje się przybliżone równanie biegunowej uderzeniowej

$$(1 - Ma_0^2) (\varphi_{x1} - \varphi_{x2})^2 + (\varphi_{y1} - \varphi_{y2})^2 = K \frac{\varphi_{x1} + \varphi_{x2}}{2} (\varphi_{x1} - \varphi_{x2}) \quad (2)$$



Warunki brzegowe dla równań (2.18) i (2.20) są następujące:

przy  $x = -\infty$   
 $\varphi_x = \varphi_y = 0$ .

Na brzegach modelu

$$\left(\frac{\varphi_y}{u_0 + \varphi_x}\right)_w \approx \left(\frac{\varphi_y}{u_0}\right)_w = \frac{\partial z}{\partial x} = t \frac{\partial}{\partial (x/l)} \cdot f\left(\frac{x}{c}\right),$$

gdzie  $\frac{\partial z}{\partial x}$  jest lokalnym pochyleniem ściany modelu określonej

równaniem  $\frac{z}{c} = t \cdot f\left(\frac{x}{l}\right)$ ,

$l$  — wymiar charakterystyczny  
 $t$  — stosunek grubości.

Stosując do równań (2.18) i (2.20) klasyczne metody teorii podobieństwa otrzymuje się parametr podobieństwa w postaci:

$$A = \frac{Ma_0^2 - 1}{(u_0 K t)^{2/3}} \quad (2.21)$$

Jako wynik pewnych niewielkich rozbieżności w analizie zakłóceń w ostatnich pracach uzyskano cztery różne określenia współczynnika  $K_1$  przy wyrazie nieliniowym w równaniu (2.18).

W pracy [lit. 33]

$$K = Ma_0^2 \frac{k+1}{u_0} \quad (2.22)$$

w [lit. 34] uproszczona wielkość powyższego

$$K = \frac{k+1}{u_0} \quad (2.23)$$

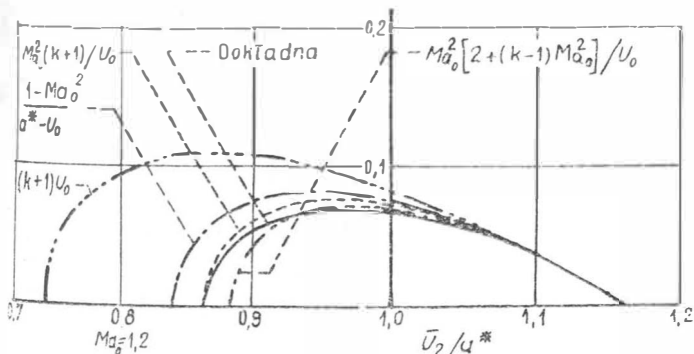
w [lit. 11]

$$K = Ma_0^2 \frac{2 + (k-1) Ma_0^2}{u_0} \quad (2.24)$$

w [lit. 28]

$$K = \frac{1 - Ma_0^2}{a^* - u_0} \quad (2.25)$$

W jakim stopniu różne wielkości  $K$  odpowiadają dokładnym rozwiązaniom pokazano na rys. 4, gdzie obok dokładnej biegunowej uderzeniowej dla  $Ma_0 = 1,2$  naniesiono przybliżone uzyskane dla różnych  $K$ .



Rys. 4. Dokładna i przybliżone biegunowe uderzeniowe

Jak widać, najwyższą dokładność uzyskuje się dla  $K$  z wzoru (2.22), za pomocą którego można zdefiniować polecany dla przeliczeń parametr podobieństwa

$$A_1 = \frac{Ma_0^2 - 1}{[Ma_0^2 (k+1) t]^{2/3}} \quad (2.26)$$

Treść reguły podobieństwa zawarta w definicji parametru  $A$  jest następująca: jeżeli umieści się serię ciał posiadających ten sam kształt określony funkcją  $z$ , lecz o różnych stosunkach grubości  $t$  w przepływie o różnych liczbach Macha strumienia niezaburzonego i różnych wielko-

ściach  $K$ , tak że parametr  $A$  pozostanie stały, to przepływy są podobne w sensie takim, że opisuje je ta sama funkcja  $\varphi(x, y)$ .

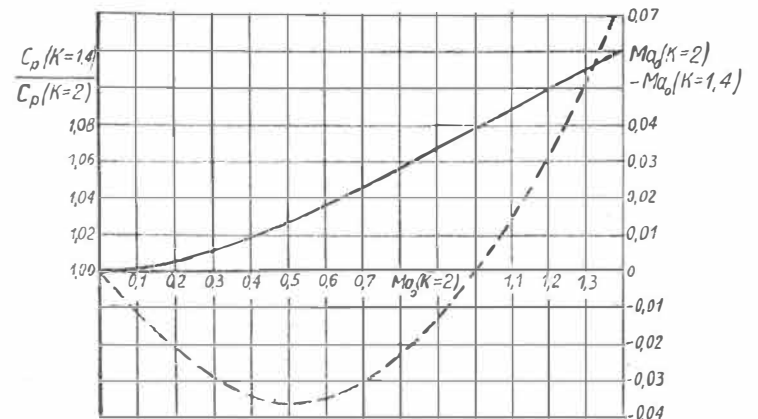
Zastosowanie otrzymanej reguły do analogii hydraulicznej jest oczywiste. Jeżeli np. otrzymano za pomocą analogii hydraulicznej ( $k = 2$ ) krzywą współczynnika ciśnienia określonego wzorem

$$C_p = -\frac{2}{u_0} \varphi_x$$

w funkcji liczby  $Ma_0$  dla określonego profilu, to korzystając z wielkości bezwymiarowych

$$C_p = \frac{t^{2/3}}{(u_0 K)^{1/3}} \cdot f\left(A_1, \frac{x}{c}\right)$$

łatwo określić tę samą krzywą dla przepływu powietrza ( $k = 1,4$ ). Na rysunku 5 przedstawiono wyniki podobnego przeliczenia podane w [lit. 3]. W pracy tej zastosowano do



TL-3/60-R5

Rys. 5. Wykres do przeliczania wielkości współczynnika ciśnienia  $C_p$  przy  $k = 2$  na odpowiadające mu wielkości przy  $k = 1,4$

otrzymania parametru podobieństwa metodę Tsien'a [lit. 36] i Kaplana [lit. 12], otrzymując bardzo podobne do przedstawionych wyżej wyników.

Na rys. 5 rzędną jest liczba  $Ma_0$ , dla której otrzymano określony współczynnik ciśnienia  $C_p$  ( $k = 2$ ), zaś odciętą z jednej strony różnica liczb Macha przepływu niezaburzonego  $Ma_0$  ( $k = 2$ ) —  $Ma_0$  ( $k = 1,4$ ), z drugiej — stosunek współ-

czynników ciśnienia  $\frac{C_p(k=1,4)}{C_p(k=2)}$

Związek między liczbami Macha dla gazu „hydraulicznego”  $Ma_2$  i odpowiadającym im liczbom Macha dla powietrza  $Ma_1$  otrzymany za pomocą parametru podobieństwa  $A_1$  (równanie 2.26) przedstawiono linią ciągłą na rys. 6.

U podstawy metod przeliczania parametrów gazu „hydraulicznego” na parametry przepływu gazu o dowolnym wykładniku izentropy przedstawionych w literaturze [5, 35, 39] leży hipoteza, że w przypadku płaskiego przepływu nadźwiękowego przy przejściu od przepływu gazu z wykładnikiem izentropy  $k_1$  na przepływ gazu o wykładniku izentropy  $k_2$  wokół tego samego modelu, kierunek przepływu pozostaje bez zmian.

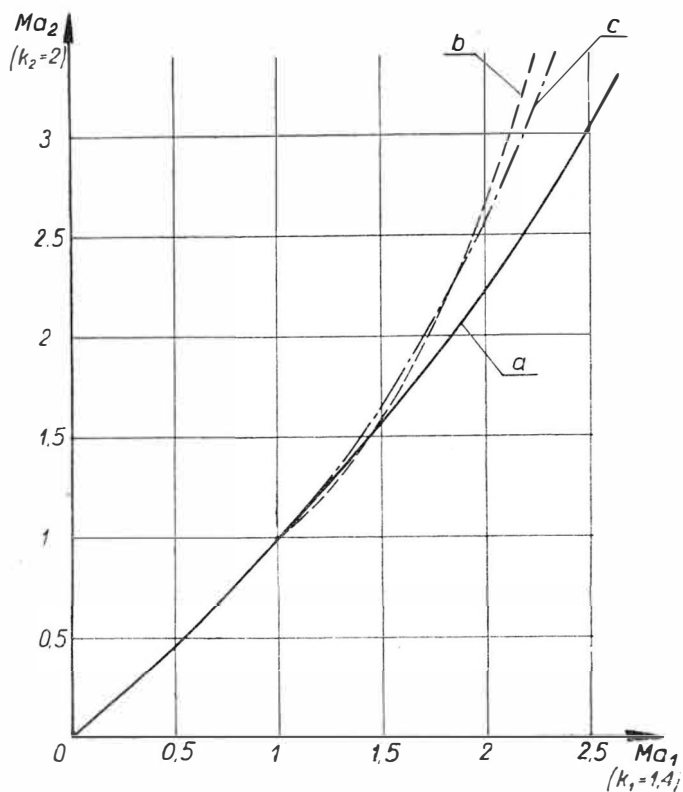
Kierunek przepływu określa się równaniem charakterystyki równania różniczkowego hiperbolicznego opisującego naddźwiękowy przepływ gazu, które w funkcji liczby Macha posiada postać [lit. 12]:

$$\beta = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \arctg \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \sqrt{Ma^2 - 1} - \arctg \sqrt{Ma^2 - 1} \quad (2.27)$$

Porównując prawe strony równania (2.27) dla różnych gazów otrzymamy równanie wiążące z sobą liczbę  $Ma_1$  dla gazu z wykładnikiem izentropy  $k_1$  i  $Ma_2$  dla gazu z  $k_2$ . Zależność tę dla gazu „hydraulicznego” i powietrza przedstawiono na rys. 6 linią kreskową. Dodatkowo dla porównania na rys. 6 naniesiono linią kropkowaną funkcję  $Ma_2 = f(Ma_1)$  dla przypadku gdy za podstawę przeliczania przyjmuje się kąt obrotu strumienia naddźwiękowego przy opływie kąta zewnętrznego [lit. 39].

Metoda przedstawiona powyżej bywa stosowana także do przepływów poddźwiękowych, mimo że jest to nieuzasadnione, gdyż ruch poddźwiękowy gazu opisują równania różniczkowe eliptyczne nie posiadające charakterystyk rzeczywistych.

Dla przepływów poddźwiękowych otrzymuje się stosując równanie (2.27) z dużą dokładnością  $Ma_1 = Ma_2$ , to znaczy, że wykładnik adiabaty nie wpływa na przepływ, co jest



Rys. 6. Wykres zależności  $Ma_2 = f(Ma_1)$  dla przepływu płaskiego a) wg wzoru (2.26), b) wg wzoru (2.27), c) wg [lit. 39]

prawdziwe jedynie dla warunków dopuszczających linearyzację równań ruchu i co w ramach tych warunków potwierdza reguła Prandtla-Glauerta.

Jak widać z rys. 6 rozbieżności różnych metod nie są duże, szczególnie dla liczb  $Ma_1 < 1,8$  istotnych z punktu widzenia analogii hydraulicznej.

Jak dotąd nie ma doświadczalnego potwierdzenia stosowności poszczególnych metod przeliczania dla liczb  $Ma_1 > 1,3$ . Wydaje się, że najbardziej uzasadniona jest metoda oparta na stosowaniu parametru  $A_1$ .

Dla ułatwienia posługiwania się tym parametrem podane zostaną wzory na główne charakterystyki cienkich profili w funkcji parametru podobieństwa  $A_1$ :

współczynnik siły nośnej

$$C_z = \frac{t^{2/3}}{[(k+1)Ma_o^2]^{1/3}} F_1(A_1),$$

współczynnik momentu

$$C_m = \frac{t^{2/3}}{[(k+1)Ma_o^2]^{1/3}} F_2(A_1),$$

współczynnik oporu

$$C_x = \frac{t^{5/3}}{[(k+1)Ma_o^2]^{1/3}} F_3(A_1).$$

### 3. WPŁYW LEPKOŚCI CIECZY NA WYNIKI UZYSKIWANE ZA POMOCĄ ANALOGII HYDRAULICZNEJ

Przy wyprowadzaniu ogólnych zasad analogii hydraulicznej przyjmuje się, że oba środowiska — ciecz i gaz — nie posiadają lepkości.

Jak wiadomo, jednak dowolna ciecz, jaką można użyć w kanale wodnym, posiada lepkość znacznie większą od

lepkości gazu, którą dla zwykle badanych za pomocą analogii hydraulicznej przepływów można pominąć jako wymagalną zmiany o wielkości niższego rzędu.

Należy więc rozważyć dokładnie problem zależności między przepływem cieczy lepkiej w kanale wodnym a przepływem gazu idealnego. Lepkość cieczy oddziałuje na dokładność pomiarów w następujący sposób:

- wywołuje dysypację energii o innym charakterze dla przepływu cieczy i gazu,
- powoduje wytworzenie warstwy przyściennej w modelu, która zmienia efektywny kształt modelu,
- prowadzi do powstania nierównego rozkładu prędkości w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni cieczy, powodując zmianę prędkości fal powierzchniowych.

Kolejno omówione zostaną wszystkie trzy wymienione elementy.

#### 3.1. Wpływ dysypacji energii wywołanej lepkością

Równania energii dla strumienia cieczy i gazu można napisać używając parametrów właściwych w postaci

$$\frac{gi}{A} + \frac{u^2}{2} = \frac{g_i o}{A}$$

$$gZ + \frac{u^2}{2} = gZ_o,$$

gdzie  $i$  — entalpia,  $A = \frac{1}{427}$  kcal/kGm — równoważnik ciepła energii mechanicznej.

Lewe strony obu równań oprócz identycznych członów odpowiadających energii kinetycznej zawierają elementy przedstawiające sumaryczną energię potencjalną gazu i cieczy, różne co do treści.

Dla gazu jest to suma energii wewnętrznej i potencjału ciśnienia

$$\frac{gi}{A} = \frac{gU}{A} + \frac{p}{\rho},$$

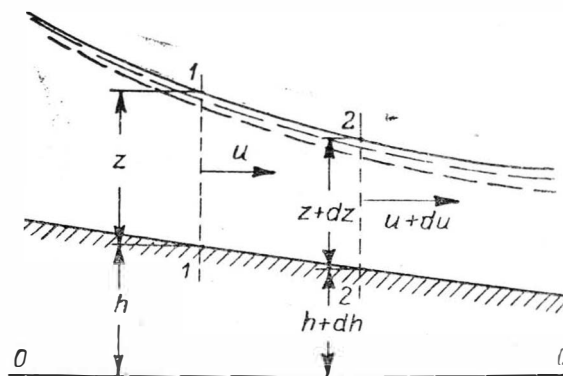
dla cieczy tylko całkowita energia potencjalna położenia (równ. 4 z lit. 14)

$$gZ = gz + \frac{p}{\rho}.$$

W cieczy stracona na skutek tarcia część energii przechodzi w ciepło i w równaniu na energię potencjalną nie jest uwzględniona, a w gazie przy przemianie adiabatycznym straty prowadzą do zwiększenia energii wewnętrznej pozostawiając całkowitą energię potencjalną bez zmian. Tym więc następuje naruszenie zasad analogii.

Występowanie sił tarcia przy przepływie cieczy, oprócz zmniejszenia energii całkowitej, wywołuje dodatkowo zwichnięcie właściwej proporcji między energią kinetyczną i potencjalną stając się źródłem dalszych błędów. Ze względu na dużą złożoność występujących zjawisk nie udało się wyeliminować wymienionych rozbieżności przez wprowadzenie odpowiednich poprawek. Dla zwiększenia dokładności bywają więc stosowane metody kompensacji sił tarcia.

Jednym z tych sposobów jest pochylenie dna kanału. Rozpatrzyć ruch cieczy w kanale posiadającym pewne pochylenie dna (rys. 7).



Rys. 7. Ruch wody w kanale z pochyłym dnem



Równanie energii dla przekrojów 1 — 1 i 2 — 2 po uwzględnieniu, że  $\frac{(u + du)^2}{2g} = \frac{u^2}{2g} + d\left(\frac{u^2}{2g}\right)$ , można napisać w postaci

$$dh + dZ + d\left(\frac{u^2}{2g}\right) + dZ_{tr} = 0$$

lub

$$\frac{dh}{ds} + \frac{dZ}{ds} + \frac{d\left(\frac{u^2}{2g}\right)}{ds} + \frac{dZ_{tr}}{ds} = 0,$$

gdzie człon  $dZ_{tr}$  uwzględnia straty wywołane przez tarcie.

Jeżeli

$$\frac{dh}{ds} = -\frac{dZ_{tr}}{cs},$$

to

$$\frac{dZ}{ds} + \frac{d\left(\frac{u^2}{2g}\right)}{ds} = 0$$

$$Z + \frac{u^2}{2g} = Z_0, \quad (3.1)$$

to znaczy równanie energii posiada taką samą postać jak dla cieczy nielepkiej.

Wielkość  $\frac{dZ_{tr}}{ds}$  określić należy doświadczalnie. Można się przy tym posłużyć wzorem

$$\frac{dZ_{tr}}{ds} = K_1 \frac{u^2}{R_h},$$

gdzie  $R_h$  — promień hydrauliczny,  $K_1$  — funkcja wielkości nierówności powierzchni kanału i modelu, promienia hydraulicznego oraz lepkości użytej cieczy.

Dla wody i przeciętnych kanałów  $\frac{dZ_{tr}}{ds} = 8 \div 10$  mm/m.

Przy badaniach modelu dających dużą zmianę kierunku przepływu, jak na przykład przekrój palisady maszyny wirnikowej, pochycenia kanału stosować nie wolno. Wpływ sił tarcia można w takim przypadku częściowo wyeliminować przez odpowiednie rozszerzenie strumienia za dyszą służącą do uzyskania właściwych parametrów przepływu. W takim strumieniu uzyskuje się analogiczny jak przy przepływie cieczy nielepkiej rozkład głębokości, kosztem pewnej straty prędkości strumienia.

Warunkiem określającym wielkość rozszerzenia przepływu jest uzyskanie  $Z = \text{const}$  dla przepływu niezaburzonego.

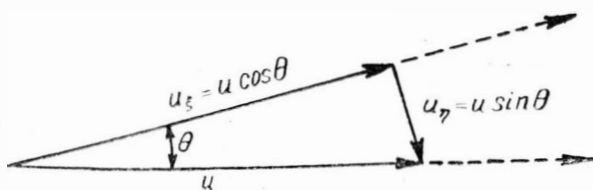
To, że rozkład prędkości w strumieniu cieczy nielepkiej jest inny, uwzględnić można przez odpowiednie przeprowadzenie doświadczeń, a mianowicie mierzenie wyłącznie rozkładu głębokości i określanie prędkości za pomocą wzoru (3.1).

### 3.2. Wpływ nierównomiernego rozkładu prędkości

W rzeczywistym przepływie cieczy pod wpływem sił lepkości powstaje nierównomierny wzdłuż głębokości rozkład prędkości, który wywołując zmianę prędkości rozprzestrzeniania się fal powierzchniowych i zmianę rozkładu głębokości w stosunku do przepływu cieczy nielepkiej obniża dokładność pomiarów.

Rozpatrzmy ruch falowy w kanale przy przepływie cieczy rzeczywistej.

Niech na przepływ w kierunku  $x$  z prędkością  $u_x = u$  nakłada się ruch falowy. Kierunek rozchodzenia się fal tworzy z osią  $x$  kąt  $\theta$  (rys. 8).



T1-3/60-PA

Rys. 8. Rozchodzenie się fal powierzchniowych

Oznaczając prędkość ruchu falowego przez  $\bar{u}$ , sumaryczne składowe prędkości przepływu będą:

$$\begin{aligned} \text{w kierunku } x: & \bar{u}_\xi + u \cos \theta \\ \text{„ „ } y: & u \sin \theta \\ \text{„ „ } z: & \bar{u}_z. \end{aligned}$$

Równanie ciągłości ma postać

$$\frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{u}_\xi + u \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial \xi} u \sin \theta + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

Równanie ruchu w kierunku osi  $\xi$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{u}_\xi + u \cos \theta) + (\bar{u}_\xi + u \cos \theta) \frac{\partial}{\partial \xi} (\bar{u}_\xi + \cos \theta) +$$

$$+ u \sin \theta \frac{\partial}{\partial \eta} (\bar{u}_\xi + u \cos \theta) + \bar{u}_z \frac{\partial}{\partial z} (\bar{u}_\xi + u \cos \theta) = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial \xi}. \quad (3.3)$$

Ponieważ  $u$  nie zależy od  $\xi$ ,  $\eta$  i  $t$  oraz  $\bar{u}$  od  $\eta$  a  $\bar{u}_\xi$  i  $\bar{u}_z$  są wielkościami małymi i można odrzucić człony zawierające ich iloczyny, równania (3.2) i (3.3) znacznie się uproszczą.

Jeżeli głębokość strumienia wody przedstawimy w postaci sumy

$$Z = Z_0 + Z^1,$$

gdzie  $Z_0$  — głębokość niezaburzonego strumienia,  $Z^1$  — wielkość dodatkowa wynikająca z ruchu falowego, wtedy rozkład ciśnienia hydrostatycznego przy założeniu, że przyspieszenia pionowe są niewielkie, będzie następujący:

$$p = p_a + \gamma(Z - z) = p_a + \gamma(Z_0 + Z^1 - z); \quad (3.4)$$

podstawiając to wyrażenie do uproszczonego równania (3.3) otrzymuje się:

$$\frac{\partial \bar{u}_\xi}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_\xi}{\partial \xi} u \cos \theta + \frac{\partial u}{\partial z} \bar{u}_z \cos \theta = -g \frac{\partial Z^1}{\partial \xi}. \quad (3.5)$$

Z warunkami brzegowymi:

$$\text{przy } z = 0 \quad \bar{u}_z = 0$$

$$\text{przy } z = Z \quad \bar{u}_z = \frac{dZ^1}{dt} = \frac{\partial Z^1}{\partial t} + w \cos \theta \frac{\partial Z^1}{\partial \xi}, \quad (3.6)$$

gdzie  $w$  — prędkość na powierzchni cieczy.

Biorąc pod uwagę uproszczone równanie (3.2)

$$\frac{\partial \bar{u}_\xi}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{u}_z}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

można wprowadzić dla ruchu falowego funkcję prądu

$$\psi(\xi, z, t) = f(z) e^{ik(\xi - ct)} \quad (3.8)$$

gdzie

$$K = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$c_1$  — prędkość rozprzestrzeniania się fal względem dna

$$c_1 = c + w \cos \theta$$

$i$  — jednostka urojona;

stąd

$$\bar{u}_\xi = \frac{\partial \psi}{\partial z} = f'(z) e^{ik(\xi - ct)} \quad (3.9)$$

$$\bar{u}_z = -\frac{\partial \psi}{\partial \xi} = -ik f(z) e^{ik(\xi - ct)}$$

$$Z^1 = A e^{ik(\xi - ct)}, \quad (3.10)$$

gdzie

$A$  — amplituda fali.

Podstawiając (3.9) i (3.10) w (3.5) i wykorzystując warunki brzegowe (3.6) po prostych przekształceniach otrzymuje się

$$\int_0^h \frac{dz}{(u \cos \theta - c_1)^2} = \frac{1}{g} \quad (3.11)$$

W strumieniu cieczy nielepkiej, gdzie  $u = w = \text{const}$  z (3.11) wynika

$$c_1 = \sqrt{gZ} + w \cos \theta$$

$$c = \sqrt{gZ}$$

to znaczy, że prędkość rozprzestrzeniania się fal powierzchniowych jest jednakowa we wszystkich kierunkach i taka sama jak w wodzie stojącej.

W rzeczywistych kanałach wodnych rozkład prędkości wzdłuż głębokości z dobrym przybliżeniem określa równanie

$$u = w \left( \frac{z}{Z} \right)^{1.7} \quad (3.12)$$

W takim przypadku z równania (3.11) otrzymuje się następujące transcendentne równanie:

$$\frac{7}{5} + \frac{7}{2} \bar{c} + 7\bar{c}^2 + 14\bar{c}^3 + 35\bar{c}^4 + 42\bar{c}^5 \ln \frac{\bar{c}-1}{\bar{c}} - 7 \frac{\bar{c}^6}{1-\bar{c}} = Ma_m^2 \cos \theta$$

gdzie

$$Ma_m = \frac{w}{\sqrt{gZ}} \text{ mierzona liczba}$$

$$\bar{c} = \frac{c_1}{w \cos \theta}$$

które można aproksymować z dużą dokładnością szczególnie dla liczb  $Ma$  w zakresie od 0,9 do 2,5 zależnością

$$\bar{c} = \frac{0,94 Ma_m (\cos \theta + 1)}{Ma_m \cos \theta} \quad (3.13)$$

Z (3.13) łatwo znaleźć prędkość rozprzestrzeniania się fal powierzchniowych

$$c = (1 - 0,06 Ma_m \cos \theta) \sqrt{gZ}$$

Jak widać, zmienny wzdłuż głębokości rozkład prędkości w warstwie cieczy lepkiej prowadzi do tego, że prędkość rozprzestrzeniania się fal powierzchniowych w różnych kierunkach jest różna. W gazie tymczasem prędkość rozchodzenia się dźwięku we wszystkich kierunkach jest ta sama.

Należy więc dla przepływu cieczy przyjąć jedną jednakową dla wszystkich kierunków poprawioną prędkość fal powierzchniowych

Najlepsze wyniki otrzymuje się za pomocą zależności

$$c = (1 - 0,06 Ma_m) \sqrt{gZ} \quad (3.14)$$

stąd dla przepływu idealnego liczba Macha

$$Ma = (1 - 0,06 Ma_m) \cdot Ma_m$$

a rozkład głębokości

$$Z_i = (1 - 0,06 Ma_m^2) Z$$

oraz wielkość poprawki na niejednakowy rozkład prędkości

$$Z = Z_i - Z = (0,036 Ma_m^2 - 0,12 Ma_m) Z.$$

### 3.3. Wpływ warstwy przyściennej modelu

Rzeczywisty rozkład ciśnień na powierzchni modelu przy płaskim opływie płynem lepkiem odpowiada rozkładowi ciśnienia przy opływie płynem idealnym elementu wytworzonego przez nałożenie na model „grubości wypierania” warstwy przyściennej  $\delta^*$ . Ponieważ „grubość wypierania” warstwy przyściennej (w danym miejscu) jest przede wszystkim funkcją lepkości płynu oraz wielkości modelu, a te wielkości są nieporównywalne dla przepływu gazu i warunków w kanale wodnym przy badaniach za pomocą analogii hydraulicznej, powstaje pewien „efektywny” model, który nie jest podobny do modelu rzeczywistego. Wynikające stąd niedokładności pomiarowe usunąć można przez taką zmianę wymiarów modelu do badań w kanale wodnym, że uzyskiwane przy danych warunkach przepływu efektywny model jest liniowym przekształceniem elementu badanego [lit. 6].

Jako przykład rozważmy profil w kształcie podwójnego klina jak na rys. 9 a.

Efektywny profil będący liniowym przekształceniem danego do badań w kanale wodnym otrzymuje się po prostu przez skrócenie tylnej części modelu jak na rys. 9 b.

Dla wszystkich przypadków spotykanych w praktyce  $\delta_1^*$  i  $\delta_2$  mogą być obliczone jak dla płaskiej płytki [lit. 19]

$$\delta_1^* = 1,72 \sqrt{\frac{\nu}{u} \cdot \frac{l}{2}}$$

$$\delta_2 = 1,72 \sqrt{\frac{\nu}{u} \left( \frac{l}{2} + x \right)},$$

gdzie

$\nu$  = lepkość kinematyczna.

Długość  $x$  można otrzymać z równania:

$$\frac{t + 2\delta_1^*}{l} = \frac{2\delta_2^*}{l - 2x} \quad (3.15)$$

Rozwiązanie równania (2.15) posiada postać

$$x = \frac{l}{2} + \frac{A^2}{8B^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{A}{B} \sqrt{\frac{A^2}{16B^2} + l} \quad (3.16)$$

gdzie

$$A = 3,44 \sqrt{\frac{\nu}{u}}$$

$$t + A \sqrt{\frac{l}{2}}$$

$$B = \frac{\quad}{l}$$

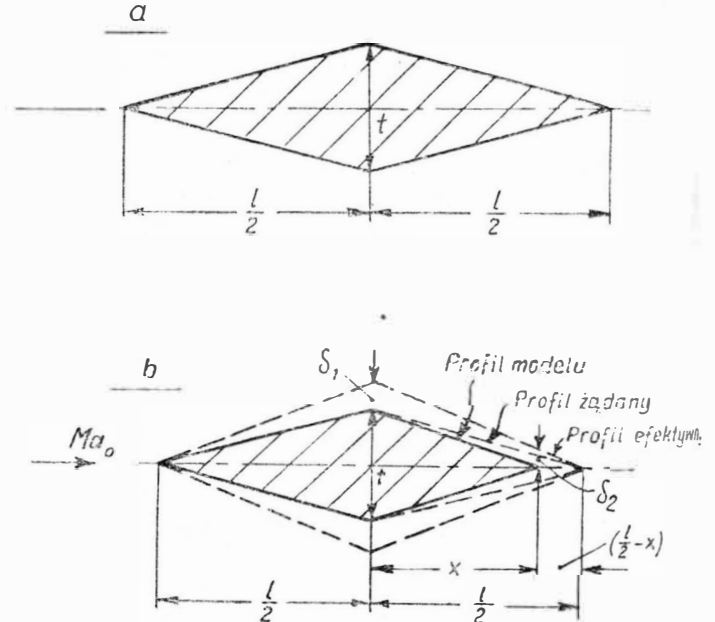
odrzucając małe wyższego rzędu otrzymuje się

$$x = \frac{l}{2} - \frac{A}{2B} \sqrt{l} \quad (3.17)$$

i

$$\frac{x}{l/2} = 1 - \frac{A}{t + A \sqrt{\frac{l}{2}}} \sqrt{l} \quad (3.18)$$

Jak wynika ze wzoru (3.18) wielkość zmian zmniejsza się silnie ze wzrostem długości cięciwy i grubości profilu (przy grubości względnej 5% i cięciwie 75 mm  $\frac{x}{2/l} = 0,6$ ).



TL-3/69-P3

Rys. 9. a) profil przeznaczony do badań, b) profil zmodyfikowany

### 4. WPŁYW PRZYŚPIESZEŃ PIONOWYCH I NAPIĘCIA POWIERZCHNIOWEGO NA ANALOGIE

Prędkość rozchodzenia się fal na swobodnej powierzchni cieczy w ogólnym przypadku określona jest równaniem [lit. 18]

$$c = \sqrt{\left( \frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\Gamma}{\rho\lambda} \right) \operatorname{tgh} \frac{2\pi Z}{\lambda}} \quad (4)$$

uwzględniającymi przyspieszenia pionowe cząstek cieczy i napięcie powierzchniowe. Z równania tego wynika między



innymi zależność prędkości rozchodzenia się fal powierzchniowych od długości fali  $\lambda$ .

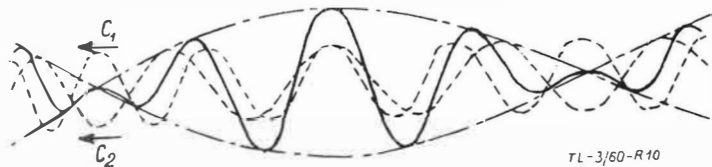
Z uwagi na porównywanie z prędkością dźwięku w ośrodku gazowym, prędkość fal na swobodnej powierzchni cieczy powinna być funkcją tylko jednego parametru ( $Z$ ) i nie zależy od długości fali. W przeciwnym przypadku analogia przepływów nie istnieje, gdyż prędkości dźwięku w gazie nie odpowiada żadna określona stała w przepływie cieczy. Ponadto samo pojęcie prędkości falowej traci sens, bowiem prędkość określona równaniem (4.1) nie jest ani prędkością przenoszenia energii, ani prędkością fal o określonej amplitudzie i długości [lit. 18, 29].

W przypadku małych grubości warstwy cieczy  $Z \rightarrow 0$  i małych długości fali  $\lambda$  przeważa napięcie powierzchniowe i fale na powierzchni cieczy są falami kapilarnymi, dla których nie ma analogii z przepływem gazu. Natomiast dla dużych

$$\text{długości fal powierzchniowych } \lambda \gg Z \text{ tgh } \frac{2\pi Z}{\lambda} \rightarrow \frac{2\pi Z}{\lambda}$$

i wyrażenie pod pierwiastkiem w równaniu (4.1) upraszcza się do postaci  $c = \sqrt{gh}$ , przy czym prędkość fal powierzchniowych przestaje zależeć od ich długości, fale zaś są długimi falami grawitacyjnymi, dla których istnieje analogia z prędkością rozprzestrzeniania się dźwięku w gazie.

Dodatkowo w ogólnym przypadku indywidualne fale powierzchniowe nie zachowują swego kształtu wskutek wzajemnej interferencji. Fale powierzchniowe o równej amplitudzie ale różnych długościach i prędkościach nakładając się tworzą tak zwane grupy, charakteryzujące się zespołem fal o zmiennej amplitudzie od zera do sumy arytmetycznej amplitud fal składowych. Granice grupy fal określone są przez węzłowe punkty dudnienia, o zerowej amplitudzie, przez które nie zachodzi przenoszenie energii ruchu drgającego (rys. 10). Prędkość końca grupy fal (punktów węzło-



TL-3/60-R10

Rys. 10. Schemat grupy fal powierzchniowych

wych) jest określona mianem prędkości grupowej. Prędkość grupowa fal jest stała i odpowiada prędkości przenoszenia energii ruchu falowego. Z punktu widzenia analogii istotne jest, aby prędkość indywidualnych fal powierzchniowych odpowiadała prędkości grupowej fal.

Prędkość grupowa określona jest zależnością [lit. 18]

$$c^* = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} \quad (4.2)$$

Pomijając napięcie powierzchniowe w równaniu (4.1), po podstawieniu  $c$  do zależności (4.2) otrzymuje się:

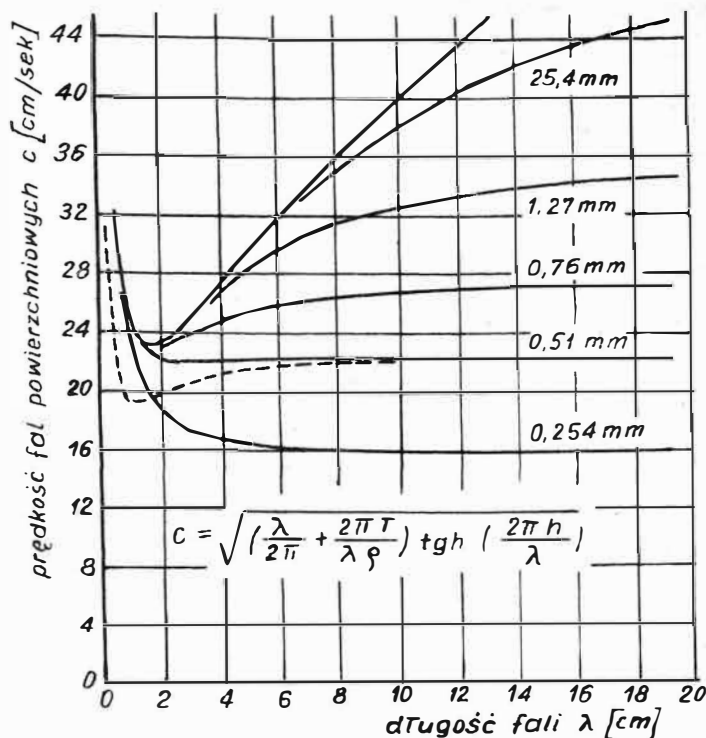
$$\frac{c^*}{c} = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{4\pi Z/\lambda}{\sin h(4\pi Z/\lambda)} \right] \quad (4.3)$$

Dla  $Z/\lambda \gg 1$   $c^* \rightarrow \frac{1}{2} c$ , czyli prędkość grupowa staje się równa połowie prędkości indywidualnych fal powierzchniowych. Dla  $Z/\lambda \ll 1$   $c^* \rightarrow c$ , prędkość grupowa i prędkość fal indywidualnych stają się równe.

Wykres prędkości fal powierzchniowych w funkcji długości fali dla różnych głębokości wody przedstawia wykres na rys. 11. Przyjęto wielkość napięcia powierzchniowego dla wody  $\Gamma = 7,4 \cdot 10^{-3}$  kG/m. Z wykresu tego wynika, że prędkość fal powierzchniowych przestaje zależeć od długości fali w zakresie  $\lambda \gg 2,5$  dla głębokości wody rzędu  $6 \div 6,5$  mm.

Dla mniejszych głębokości zależność ta również znika, ale począwszy od wyższych wielkości długości fali. Wielkość prędkości dla  $\lambda < 2,5$  mm przy  $Z = 6 \div 6,5$  mm odpowiadają falom kapilarnym. Z uwagi na powyższe, głębokość wody warunkująca analogię przepływów winna być rzędu  $6 \div 6,5$  mm. Tego samego rzędu głębokości wody są również najważniejsze, co wykazano w sposób doświadczalny, w przypadku przepływów ze słabymi falami uderzeniowymi, występującymi przy opływie cienkich ostrzy [lit. 16].

W przypadku innych wielkości głębokości wody istnieją rozbieżności między przepływami „płytkiej wody”



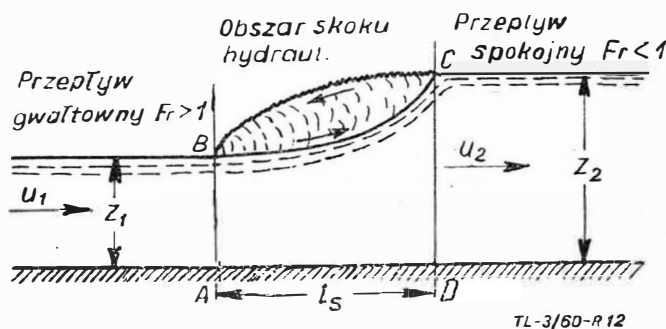
TL-3/60-R11

Rys. 11. Wykres prędkości fal powierzchniowych, w funkcji długości fali. Przyjęto wielkość napięcia powierzchniowego =  $7,4 \cdot 10^{-3}$  kG/m (woda)

i gazu występujące najsilniej przy prędkościach okołodzwiękowych, gdzie charakter przepływu zmienia się co do jakości, w zależności od tego czy prędkość jest większa czy mniejsza od prędkości dźwięku.

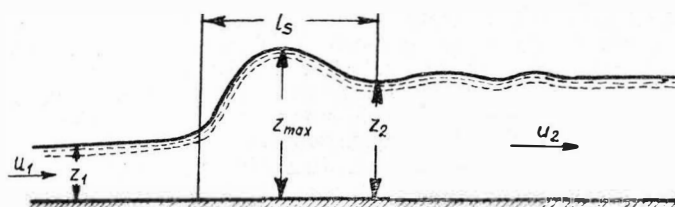
### 5. DOKŁADNA ANALIZA HYDRAULICZNEJ FALI UDERZENIOWEJ W CIECZY. ANALOGIA Z FALĄ UDERZENIOWĄ W PRZEPLYPWIE GAZU

Przedstawiony w [lit. 14] model fali uderzeniowej w cieczy jest w pewnym sensie uproszczony. Rzeczywisty profil fali zależy głównie od liczby Frouda stramienia cieczy przed falą [lit. 35]. Z uwagi na strukturę rozróżnia się dwa rodzaje skoków hydraulicznych, które zostały przedstawione na rys. 12 i 13.



TL-3/60-R12

Rys. 12. Hydrauliczna fala uderzeniowa w cieczy (skok hydrauliczny)



Rys. 13. Hydrauliczna fala uderzeniowa w cieczy (skok-fala)

Skok hydrauliczny przedstawiony na rys. 12 (o którym mowa poniżej) charakteryzuje się występowaniem burzliwego obszaru między wyższym i niższym poziomem cieczy, w którym zachodzi dysypacja energii. Długość skoku hydraulicznego posiada pewną skończoną wielkość, będącą funkcją grubości warstwy cieczy i prędkości przed falą.

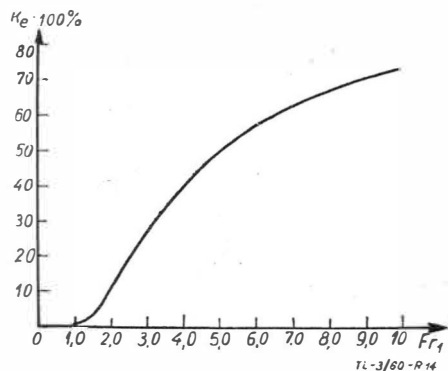
Strata całkowitej energii strumienia równa energii dysypowanej w stosunku do pełnej energii przed skokiem hydraulicznym jest określona zależnością:

$$K_e = \frac{\Delta E}{E_1} = 1 - \frac{Z_2 + \frac{u_2^2}{2g}}{Z_1 + \frac{u_1^2}{2g}} = 1 - \frac{h_2}{h_1} \cdot \frac{1 + \frac{1}{2} Fr_2^2}{1 + \frac{1}{2} Fr_1^2} \quad (5.1)$$

Ponieważ  $Fr_2 = f(Fr_1)$ , współczynnik straty całkowitej energii strumienia  $K_e$  jest funkcją liczby Frouda przed falą:  $K_e = K_e(Fr_1)$ . Z wykresu funkcji  $K_e(Fr_1)$  przedstawionego na rys. 14 wynika, że straty bardzo silnie rosną ze wzrostem  $Fr_1$ .

Związek między grubościami warstwy cieczy przed i za skokiem hydraulicznym, wyprowadzony w [lit. 14] dla przypadku fali prostopadłej, w ogólnym przypadku (fali skośnej) przedstawia zależność:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2 \sin^2 \theta} - 1 \right) \quad (5.2)$$



Rys. 14. Wykres współczynnika straty energii całkowitej w skoku hydraulicznym w funkcji liczby Frouda przed falą

Inny charakterystyczny profil fali uderzeniowej spotykany najczęściej w przypadku analogii hydraulicznej przedstawiono na rys. 13. Charakteryzuje się on stromym frontem, w którym zachodzi przyrost grubości warstwy cieczy do wielkości wyższej od grubości warstwy w pewnej odległości za falą uderzeniową, gdzie powierzchnia cieczy wygładza się (za stromym frontem pojawiają się fale powierzchniowe o niedużej amplitudzie, zanikające w dostatecznej za nim odległości). Opisana wyżej fala posiada charakter przejściowy; gdy wielkość  $Z_{max}$  wzrośnie do wielkości odpowiadającej

całkowitej energii strumienia przed falą:  $Z_1 + \frac{u_1^2}{2g}$ , wielkość

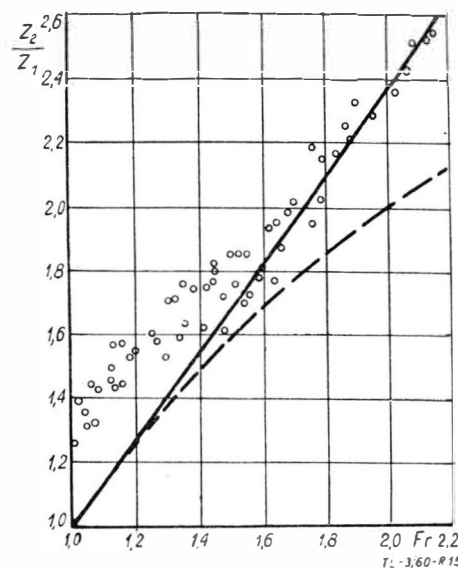
lokalnej prędkości spada do zera i dalszy ruch grzebienia fali staje się niemożliwy; grzebień rozmywa się, a fala przyjmuje profil jak na rys. 12.

Zgodnie z danymi w literaturze [lit. 35] w zakresie  $Fr_1 < 1,7$  występuje typ fali przedstawianej na rys. 12, w przedziale  $Fr_1 = 1,7-4$  można spodziewać się obu typów fal, zaś przy  $Fr_1 > 4$  — fali przedstawionej na rys. 13. Wg Suncowa [lit. 35] przy badaniach w kanale wodnym z zasady występował skok hydrauliczny (rys. 12) w całym zakresie liczb Frouda.

Wykres funkcji  $Z_2/Z_1 = f(Fr_1)$  wg równania (5.2) przedstawiono na rys. 15 w postaci linii ciągłej. Wielkości tej funkcji uzyskane doświadczalnie przez Suncowa i Czertousowa przedstawiono za pomocą punktów. Dobrą zgodność uzyskuje się w zakresie  $Fr_1 > 1,7$ . Należy zwrócić uwagę na sposób pomiaru grubości cieczy za falą (rys. 13), który jest najzupełniej dowolny. W omawianym przypadku Suncow i Czertousow mierzyli grubość warstwy cieczy ze stromym frontem w pierwszym wglębeniu (patrz rys. 13).

W [lit. 14] wykazano, że między hydrauliczną falą uderzeniową a falą uderzeniową w gazie w ogólnym przypadku

nie ma analogii, głównie z uwagi na straty energii całkowitej. Biorąc pod uwagę profil fali uderzeniowej w cieczy (rys. 12 i 13), należy stwierdzić, że i w tym sensie analogii nie występuje.



Rys. 15. Stosunek grubości warstwy cieczy za i przed hydrauliczną falą uderzeniową w funkcji liczby Frouda przed falą. Linia ciągła zaznaczono zależność według równania (5.2), przerywaną według (5.3), punktami wielkości określone doświadczalnie

Obecnie rozpatrzy się, w jakim stopniu zależności słuszne dla gazu „hydraulicznego” ( $k = 2$ ) zgodne są z wielkościami odnośnych stosunków  $Z_2/Z_1$ , przy założeniu związku  $\rho \sim \xi$  obowiązującego w przypadku przepływów izentropowych [lit. 14, wzór (15)].

W przypadku  $k = 2$  stosunek gęstości za i przed falą uderzeniową przedstawia związek:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{3Ma_1^2}{2 + Ma_1^2} \quad (5.4)$$

Przyjmując  $\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$  oraz  $Ma_1 = Fr_1$  powyższą zależność

przedstawiono na wykresie (rys. 15) linią przerywaną w postaci funkcji:  $Z_2/Z_1 = f(Fr_1)$ . Z wykresu tego wynika, że wielkości obliczone według zależności (5.3) są niższe od wielkości obliczonych według równania (5.4). W równaniu tym powołując się na analogię między falą uderzeniową w gazie „hydraulicznym” i w cieczy nie uwzględniono skończonej długości tej ostatniej oraz charakteru jej profilu.

Poniżej podany zostanie sposób obliczania grubości warstwy cieczy za falą z uwzględnieniem kształtu jej profilu i długości.

Fikcyjną, obliczeniową grubość warstwy cieczy za falą określono zależnością:

$$Z^2 = Z \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^4 \quad (5.5)$$

gdzie:

$Z$  — grubość warstwy cieczy w dostatecznej odległości za falą, gdzie powierzchnia jej jest wyrównana,

$Z_2$  i  $Z_1$  obliczone są wg zależności (5.3),

$\Delta$  — funkcja  $\xi$  przedstawiona na wykresie rys. 16, przy czym

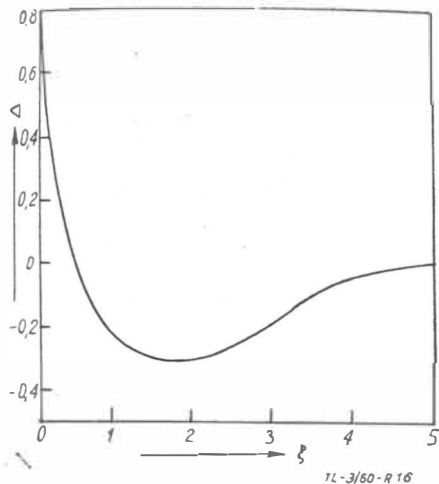
$$\xi = \frac{X/Z_1}{\sqrt{Z_2/Z_1 - 1}} \quad (5.6)$$

Współrzędna  $X$  jest to odległość liczona od początku fali do punktu, w którym mierzy się wielkość  $Z$ ; winna być ona nie mniejsza niż długość fali

$$X \geq l_s = 4,75 Z_1 \sqrt{Z_2/Z_1 - 1},$$

zaś wielkości  $Z_1$  i  $Z_2$  mierzone są w punktach uwidocznych na rys. 13. Przyjmując wielkość grubości warstwy cieczy za falą według zależności (5.5) otrzymuje się wykres  $\frac{Z'}{Z_1}$  w funkcji  $Fr_1$  przedstawiony na rys. 17. Z wykresu tego wynika, że istnieje dobra zgodność wyników uzyskanych z

pomocą pomiarów i przeliczonych wyżej podaną metodą (punkty) z krzywą określoną równaniem (5.3) w zakresie  $Fr \leq 2,2$ .



Rys. 16. Wykres wielkości  $\alpha$  w funkcji  $\xi$

W przypadku przepływów płaskich, wielkości kątów zmiany kierunku przepływu określone dla gazu „hydraulicznego” i cieczy (wody) w kanale drogą eksperymentalną są dostatecznie zgodne we wspomnianym zakresie liczb Macha (Frouda).

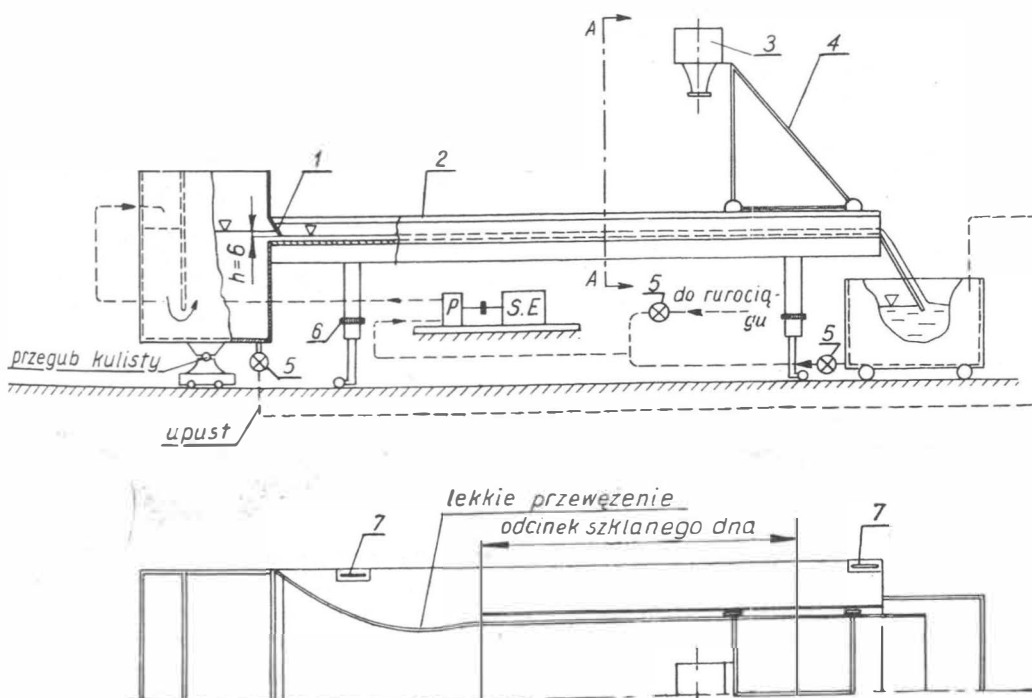
Przeliczanie parametrów gazu „hydraulicznego” na parametry gazu o innym wykładniku izentropy było przedstawione w punkcie 2.

### 6. ELEMENTY TECHNIKI POMIAROWEJ

Poniżej opisane zostaną elementy techniki pomiarowej, stosowane do realizacji metody analogii hydraulicznej.

#### 6.1. Kanał wodny

Schemat kanału wodnego przedstawiono na rys. 18. Przepływ wody uzyskuje się w kanale za pomocą obiegu otwartego lub co najczęściej ma miejsce — zamkniętego. Woda podawana jest do zbiornika zasilającego przez pompę ze zbiornika zlewczego, co ma miejsce, gdy obieg jest zamknięty, lub bezpośrednio z sieci wodnej — gdy jest otwarty. Odcinek kanału doprowadzający wodę do przestrzeni pomiarowej



Rys. 18. Schemat kanału wodnego do realizacji metody analogii hydraulicznej: 1 — śluza spiętrzająca, 2 — bieżnia rolek stojąca, — aparat fotograficzny, 4 — stojak ruchomy, 5 — zawór odcinający, 6 — urządzenie do regulacji długości nóg kanału, 7 — poziomnice

kanалу, w której usytuowany jest badany model, powinien być ukształtowany w postaci dyszy, celem przyspieszenia strumienia i z uwagi na konieczność ujednoczenia rozkładu prędkości. Stałą grubość warstwy cieczy, przy jednoczesnej możliwości uzyskiwania zmiennych prędkości strumienia, otrzymuje się za pomocą śluzy, spiętrzającej poziom wody przed dyszą. Dno przestrzeni pomiarowej kanału może być zaopatrzone w otworki do pomiaru ciśnień statycznych, których wielkości odczytuje się za pomocą baterii manometrów, widocznych na zdjęciu fotograficznym kanału laboratorium N.A.C.A. (rys. 19).

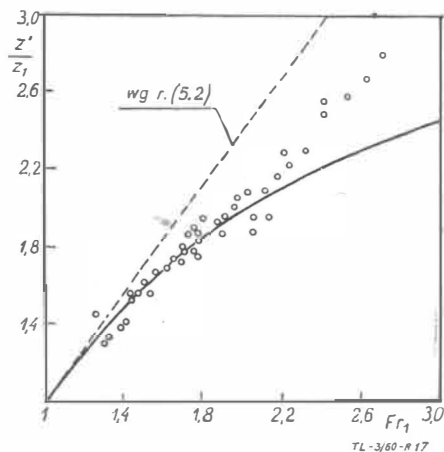
Warunkiem poprawności pomiaru grubości warstwy cieczy i ciśnień jest staranne spoziomowanie dna kanału, który z tego względu powinien być zaopatrzone w dokładne urządzenia poziomujące.

W celu umożliwienia dokonywania zdjęć przepływu, kanał winien być wyposażony w ruchomy suport, służący do mocowania aparatu fotograficznego. Profil przekroju poprzecznego jest zazwyczaj prostokątny lub kształtowany metodami podanymi w punktach 2.1.1. i 2.2.1.

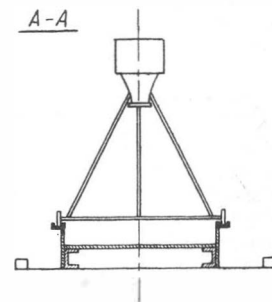
#### 6.2. Pomiar parametrów przepływu „płytkiej wody”.

Pomiaru rozkładu ciśnień statycznych dokonuje się za pomocą otworków w dnie kanału, zaś ciśnień całkowitych za pomocą rurki Pitota.

Prędkość przepływu mierzy się za pomocą rurki Pitota, lub pomiaru kąta fali stojącej wywołanej umieszczeniem



Rys. 17. Stosunek grubości warstwy cieczy za i przed hydrauliczną falą uderzeniową w funkcji Frouda przed falą (linia ciągła). Wielkość  $Z'$  obliczono według równania (5.5). Linia przerywana przedstawiono zależność według równania (5.2)

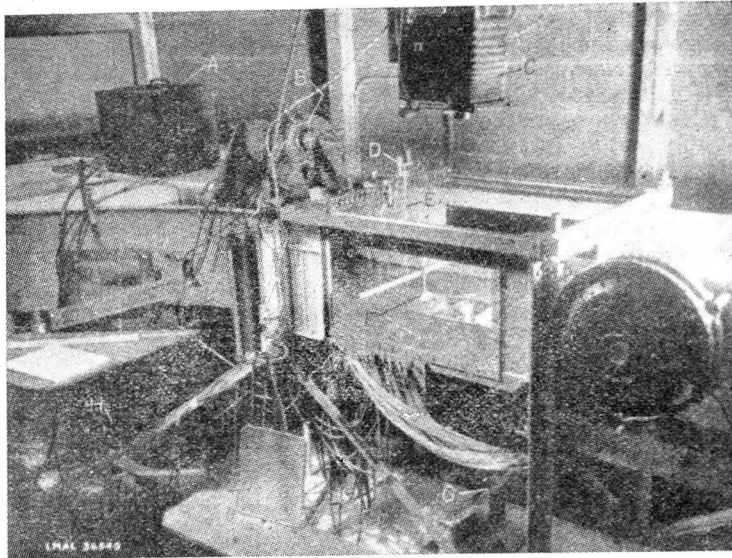


TL-3/60-R18

w polu przepływu naddźwiękowego cienkiego, zaostrego ciała (igły), przy czym prędkość określić można z zależności:

$$u = \frac{c}{\sin \theta} = \frac{\sqrt{gZ}}{\sin \theta}$$

Grubość warstwy cieczy określa się za pomocą śruby mikrometrycznej zakończonej igłą, która przy zetknięciu się ze swobodną powierzchnią cieczy zamyka obwód elektryczny, powodując uruchomienie instalacji sygnalizacyjnej, włączonej w obwód.



Rys. 19. Zdjęcie przestrzeni pomiarowej kanału wodnego laboratorium N.A.C.A.

A, B — urządzenia do migawkowego oświetlenia, C — aparat fotograficzny, D — bateria manometrów, E — igła do pomiaru grubości warstwy cieczy, F — suport podtrzymujący szklane nno, G — lustro, H — pozycja źródła światła

### 6.3. Metody jakościowe badania przepływów — wizualizacja hydrodynamiczna

W przypadku niektórych zastosowań metody analogii hydraulicznej do badania płaskich dwuwymiarowych i jednowymiarowych przepływów gazu poprzestać można na jakościowym charakterze podobieństwa przepływów cieczy i gazu, uzyskując tzw. wizualizację hydrodynamiczną przepływu.

Badany za pomocą wizualizacji hydrodynamicznej model winien być geometrycznie podobny do badanego ciała opływającego strumieniem gazu; w przypadku przepływów wewnętrznych (przez przewody o zmiennym przekroju) poprzeczne wymiary modelu winny być dobrane tak, aby zachować stosunki pól przekrojów poprzecznych przepływów (wody w kanale hydraulicznym) i rzeczywistego (gazu). Kryterium porównawczym obu przepływów jest oczywiście równość:  $Ma = Fr$ . Obraz przepływu można uzyskać za pomocą oświetlenia równoległą wiązką promieni, załamanych następnie na nierównej powierzchni cieczy, lub za pomocą światła rozproszonego. W przypadku oświetlenia światłem rozproszonym na powierzchni cieczy można równomiernie rozsypać proszek, celem uzyskania lepszego obrazu przepływu. W tym przypadku ze zdjęć fotograficznych określić można prędkości lokalne przepływu na podstawie długości śladów pyłków i znanego czasu ekspozycji zdjęcia. Z uwagi na stosunkowo małe prędkości przepływu (których wielkości wynikają z kryterium  $Ma = Fr$  i skali modelu) i ich zmian możliwa jest obserwacja niestabilnych przepływów gołym okiem. Jest to jedna z ważnych zalet metody wizualizacji.

## 7. PRZEGLĄD ZASTOSOWAŃ METOD ANALOGII HYDRAULICZNEJ

Po raz pierwszy analogia hydrauliczna została zastosowana do badania przepływów izentropowych przez dyszę Lavalą (Riabouchinsky). Następnie stosowano analogię do badania opływu profili aerodynamicznych w przepływie dwuwymiarowym. Pomyślne wyniki otrzymane przez pierwszych badaczy (Riabouchinsky, Preiswerk) zaczęły, dzięki niskim kosztom badań i prostocie urządzeń niezbędnych do ich realizacji, do stosowania analogii hydraulicznej jako metody

badania profili w pod- i naddźwiękowym strumieniu gazu [lit. 1, 5, 15, 22, 27, 35]. Pewne rozbieżności między wynikami badań opływu profili za pomocą metod analogii hydraulicznej i badań doświadczalnych na modelach umieszczonych w strumieniu gazu dostrzeżono w przypadkach przepływów okołodźwiękowych [lit. 10]. Rozbieżności te zostały zbadane [lit. 4 i 7] i wyjaśnione; źródłem ich okazał się niewłaściwy sposób przeprowadzania pomiarów i przeliczenia wyników.

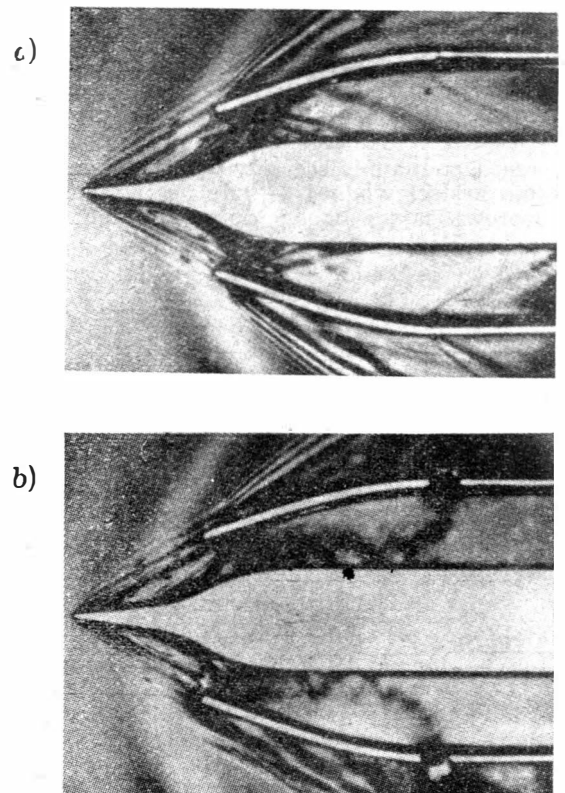
Analogia hydrauliczna znalazła zastosowanie do badania odległości fali uderzeniowej powstałej w dwuwymiarowym przepływie przed określonym ciałem w strumieniu naddźwiękowym [lit. 9], badania interferencji fal uderzeniowych oraz do badania zachowania się fal uderzeniowych w przepływie jednoparametrowym przez przewody o zmiennym przekroju [lit. 30].

Analogia hydrauliczna znalazła także zastosowanie do innego rodzaju przepływów wewnętrznych, między innymi do badania eżektora [lit. 23]. Ogólne uwagi odnośnie zastosowania analogii hydraulicznej do badania przepływów wewnętrznych podane są w [lit. 8].

Analogia hydrauliczna jednowymiarowych przepływów z doprowadzeniem ciepła znalazła zastosowanie jako metody badania rozwoju fali detonacyjnej [lit. 25, 26]. Zastosowanie analogii hydraulicznej do badania naddźwiękowych palisad turbin przyniosło wyniki dokładnie zgodne z badaniami gazdynamicznymi [lit. 39].

Wizualizacja hydrodynamiczna znalazła zastosowanie do badania przepływów „wewnętrznych” przez elementy silników przepływowych, głównie dyfuzory i komory spalania [lit. 20]. Pozwala ona ocenić porównawczo wymienione przepływy: w przypadku dyfuzorów zaś wykryć oderwania i lokalne turbulencje, określić przedział niestatecznej pracy dyfuzora (pompaż), zaś w przypadku komór spalania — optymalną turbulencję w strefie ustatecznienia płomienia. Zdjęcia na rys. 20 przedstawiają przepływy przez dyfuzor naddźwiękowy i komorę spalania.

Wizualizacja hydrodynamiczna może być również zastosowana do badania przepływów przestrzennych; przypadek



Rys. 20. Zdjęcia uzyskane w czasie badań dyfuzora naddźwiękowego za pomocą wizualizacji hydrodynamicznej (O.N.R.A.): a) przypadek przepływu wewnętrznego naddźwiękowego, b) przypadek niestatecznej pracy dyfuzora

ten nie ma jednak nic wspólnego z metodą analogii hydraulicznej i z uwagi na to nie będzie omawiany. Nadmieniamy tylko, że metoda ta znalazła zastosowanie do badania przepływów przez komory spalania silników odrzutowych



wych [lit. 37, 38], ponieważ badania przepływów przez komorę „na zimno” i „gorąco” wykazały bardzo niewielkie różnice rozkładów prędkości wskutek spalania, przepływy zaś gazu i cieczy mogą być porównywalne z uwagi na małe zmiany gęstości w pierwszym z wymienionych przepływów.

## LITERATURA

1. Bozinowitch B. — „Analogie hydraulique dans l'aéronautique expérimentale”. Proceedings of the Second European Aeronautical Congress, 1956
2. Bömelburg H. — „Die praktische Anwendbarkeit der Wasseranalogie in quantitativer Form auf spezielle Probleme der Gasdynamik”. Mitteilungen Max-Planck Institut für Strömungsforschung, No 10, 1954
3. Bömelburg H. — „Eine Verallgemeinerung des Karmanschen Ähnlichkeitsgesetzes für schallnahe Strömungen”. Zeitschrift für Flugwissenschaften, September 1955
4. Bömelburg H. — Comment on „Wedge Pressure Coefficients in Transonic Flow by Hydraulic Analogy” by Fedderman and Stencil. Journal of the Aeron. Sc., No 10, 1955
5. Broude B. G. — „Ispolzowanie gazogidrawliczeskoj analogii dla celi gazowej dynamiki”. Żurnal mechaniczeskoj fiziki, t. XXVI, 7, 1956
6. Bryant R. A. A. — „The Size of Aerofoil Models for Quantitative Hydraulic Analogy Research”. Journal of R.A.S., March 1956
7. Bryant R. A. A. — „The Transonic Flow Hydraulic Analogy”. Journal of the Aeron. Sc., No 1, 1956
8. Bryant R. A. A. — „Use of the Hydraulic Analogy for „Inside” Problems”. Journal of the Aero/Space Sc., No 8, 1956
9. Bryant R. A. A. and Grant J. N. G. — „Two-Dimensional Bow Shock Wave Detachment Distances”. Journal of the R. A. S., June 1957
10. Fedderman R. G. and Stencil R. T. — „Wedge Pressure Coefficients in Transonic Flow by Hydraulic Analogy”. Journal of Aeron. Sc., No 4, 1955
11. Gullstrand T. — „The Flow Over Symmetrical Aerofoils Without Incidence at Sonic Speed”. K T H Aero TN 24, Roy, Inst. Tech. Stockholm 1952
12. Kaplan C. — „On Similarity Rules for Transonic Flows”. N.A.C.A. Report No 894, 1948
13. Karman Th. — „The Similarity Law of Transonic Flow”. Journal of Mathematics a. Physics, vol. XXVI, No 3, 1947
14. Kowalewicz A. — „Analogia hydrauliczna gazu ściśliwego”. Technika Lotnicza, zeszyt 6, 1959
15. Laitone E. V. — „A Rational Discussion of the Hydraulic Analogy”. Journal of Aeron. Sc., No 1, 1953
16. Laitone E. V. — „A Study of Transonic Gas Dynamics by the Hydraulic Analogy”. Journal of the Aeron. Sc., No 4, 1952
17. Laitone, Nielsen, Helmer — „Transonic Flow Past Wedge Profiles by Hydraulic Analogy”. Journal of the Aeron. Sc., No 6, 1954
18. Lamb — „Hydrodynamics”, New York, 1945
19. Landau i Lifszic — „Mechanika ośrodków ciągłych”, PWN, 1959
20. Le Manch J. et Robert E. — „Sur quelques applications actuelles de l'analogie hydraulique”. La Recherche Aéronautique, Juillet-Août, 1959
21. Loh W. H. T. — „Hydraulic Analogy for Two-Dimensional and One-Dimensional Flows”. Journal of the Aero/Space Sc., No 6, 1959
22. Ludberg B. K. O. — „Aeronautical Research in Sweden”. Journ. of the R. A. S., No 10, 1955
23. Matsunaga S. — „On the Mach Number of the Diffuser Throat of an Ejector According to the Hydraulic Analogy”. Journ. of the Aeron. Sc., No 12, 1957
24. Munsztukow D. A. — „Gidrawliczeskaja analogia pri  $k > 1$ ”. Izwiestia Wyssh. Uczeb. Zawied., Awiacjonnaja technika, 3, 1959
25. Oppenheim A. K. — „Gasdynamic Analysis of the Development of Gaseous Detonation and its Hydraulic Analogy”. IV Symposium on Combustion, 1953
26. Oppenheim A. K. — „Analogue to High Velocity Combustion”. Journ. of Applied Mechanics, March, 1953
27. Orlin J. W., Linder N. J., Bitterly J. G. — „Application of the Analogy between Water Flow with a Free Surface and Two-Dimensional Compressible Flow”. N.A.C.A. Report No 875
28. Oswatich K. — „Die Geschwindigkeitsverteilung bei lokalen Überschallgebieten an flachen Profilen”. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Bd 30, No 1/2, Jan/Febr., 1950
29. Prandtl L. — „Dynamika przepływów” PWN, 1956
30. Rościszewski J. — „Dysertacja doktorska”, Politechnika Warszawska
31. Rouse H. — „Fluid Mechanics for Hydraulic Engineers”, 1938
32. Shapiro A. H. — „Free Surface Water Table”. High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion, vol IX (Physical Measurements)
33. Spreiter J. — „On the Application of Transonic Similarity Rules to Wings of Finite Span”. N.A.C.A. Report 1153, 1953
34. Spreiter J. — „On the Application of Transonic Similarity Rules”. N.A.C.A. TN 2726, 1952
35. Suncow N. N. — „Metody analogii w aerogidraulikie”. 1958
36. Tsien — „Similarity Laws of Hypersonic Flows”. Journal Math. and Physics, No 3, 1946
37. Winter E. F., Detering J. H. — „Apparatus and Techniques for Application of a Water Flow System to the Study of Aerodynamic System”. British Journal of Applied Physics, vol. 7, No 7, July 1956
38. Winter F. F. — „Flow Visualization Techniques Applied to Combustion Problems”
39. Żukowskij M. I. — „Primenienie gidroanalogii dla pribliżennogo issledowanija swerchszukowych tieczienij w riesziotkach profilej”. Tieploenergiatika, No 2, 1959

STANISŁAW SCHEFFS

## Lutowanie aluminium i jego stopów

### Część II<sup>1)</sup>

W części II Autor omawia metody lutowania oraz zastosowanie lutowania aluminium i jego stopów. Szczególną uwagę zwrócono na przemysłowe sposoby lutowania: lutowanie piecowe, przez zanurzenie i ultradźwiękowe. Omówiono również lutowanie beztopnikowe przy zastosowaniu lutowni na podstawie cynku z dodatkiem aluminium. Porównano właściwości mechaniczne uzyskiwane za pomocą lutowania aluminium z innymi metalami.

Ze względu na rodzaj użytego lutowni rozróżnia się lutowanie miękkie — niskotemperaturowe i twarde — wysokotemperaturowe. Lutowanie nazywamy miękkim, jeśli temperatura lutowania nie przekracza 350 °C, powyżej tej temperatury lutowanie określa się jako twarde. Nazwy te uzasadnione są różnymi właściwościami mechanicznymi połączenia uzyskiwanymi z poszczególnych metod, w zależności od rodzaju użytego lutowni. Ogólnie — wytrzymałe połączenia uzyskuje się przy wysokotemperaturowych lutowaniach, słabe zaś przy niskotemperaturowych. W przypadku lutowni miękkich rola ich polega głównie na uszczelnieniu i scaleniu danego zestawu.

Ze względu na rodzaj źródła ciepła użytego do nagrzania elementów podczas lutowania, rozróżnia się lutowanie: za pomocą kolby (elektrycznej lub ogrzewanej gazem), palnikowe, w piecu, na podgrzanej płycie, oporowe, przez sprasowanie (tzw. lutowanie blokowe) oraz prądami wysokiej częstotliwości. Dzięki przejściu od metod lutowania kolbą do metod całkowicie zmechanizowanych, lutowanie aluminium znajduje ostatnio coraz szersze zastosowanie. Lutowa-

nie przy użyciu kolby możliwe jest tylko w przypadku mniejszych elementów, ze względu na dużą przewodność i szybkie stygnięcie, charakterystyczne dla aluminium.

Aluminium może być lutowane za pomocą wszystkich powszechnie stosowanych metod, jak:

- 1) lutowanie nacieranio-we,
- 2) lutowanie za pomocą reakcji chemicznych,
- 3) lutowanie piecowe,
- 4) lutowanie przez zanurzenie,
- 5) lutowanie palnikowe,
- 6) lutowanie przez zanurzanie,
- 7) lutowanie oporowe,
- 8) lutowanie indukcyjne,
- 9) lutowanie przez sprasowanie,
- 10) lutowanie beztopnikowe przy użyciu specjalnego lutowni,
- 11) lutowanie ultradźwiękowe.

Niektóre z powyższych metod, jak lutowanie: nacieranio-we, przez zanurzenie, beztopnikowe przy użyciu specjalnego lutowni i ultradźwiękowe, są specjalnie przeznaczone dla aluminium.

<sup>1)</sup> Patrz Technika Lotnicza nr 1/60, str. 17.

Wybór jednej z powyższych metod lutowania zależy od kształtu zestawu, konstrukcji połączenia, przeznaczenia lutowanych konstrukcji oraz dostępności i ekonomiczności poszczególnych metod.

Proces lutowania podzielić można na szereg zasadniczych czynności:

- nadanie łączonym częściom wzajemnie odpowiadających kształtów,
- oczyszczenie łączonych powierzchni,
- lutowanie,
- usunięcie resztek topnika,
- usunięcie nadmiaru lutowia i wykończenie połączenia.

Dobre rezultaty przy lutowaniu aluminium osiąga się tylko w tym przypadku, gdy zestaw jest należycie oczyszczony. Należy usunąć rdzę, farby, tlenki i inne zanieczyszczenia powierzchni. Dokonuje się tego przez skrawanie, szlifowanie, ręczne opielowanie, skrobanie skrobakiem, szlifowanie papierem ściernym lub inne metody obróbki mechanicznej.

Przedmioty przed lutowaniem powinny być odtłuszczone. Tłuszcz można usunąć za pomocą rozpuszczalników organicznych, jak trójchlorek etylenu lub alkalicznych, jak roztwór zawierający: 1 — 3% krzemianu sodu, 1 — 3% fosforanu trój sodowego oraz niewielką ilość środka zwilżającego. Jako środek zastępczy można użyć 1—3-procentowy roztwór węglań sodu lub sody kaustycznej. Po oczyszczeniu, przedmiot winien być dokładnie opłukany w wodzie i osuszony.

Między powierzchniami, które ma się zlutować, winna znajdować się szczelina takiej szerokości, aby roztopione lutowie wypełniło ją pod wpływem działania sił kapilarnych. Siły kapilarne muszą przewyższyć siłę ciężenia, która powoduje wyciekanie lutowia. Lutowie pozostaje jedynie w włoskowatych szczelinach i tam krzepnie.

Ponieważ własności wytrzymałościowe lutowia są na ogół niższe od własności wytrzymałościowych elementów łączonych, warstwa lutowia powinna być możliwie cienka, co zapewnia dużą wytrzymałość połączenia. Najczęściej stosowana jest szerokość szczeliny około 0,1 mm. Jednak zbyt mały odstęp między łączonymi powierzchniami uniemożliwia należyte przeniknięcie lutowia.

Należy pamiętać, że w razie uprzedniego pocynowania łączonych powierzchni, połączenie można wykonać szybciej i w niższej temperaturze. Dalszą zaletą wstępnego cynowania jest możliwość uniknięcia stosowania korodującego topnika przy lutowaniu.

Dla powierzchni, które przed lutowaniem nie zostały pocynowane wystarczy zwykle odstęp od 0,08 do 0,15 mm, natomiast dla powierzchni pocynowanych — około 0,03 mm lub nieco większy.

### LUTOWANIE NACIERANIOWE

W tej metodzie lutowania, lutowie o temperaturze wyższej od temperatury solidusa nanosi się na powierzchnię elementów i rozciera na miejscu połączenia. W procesie nacierania lutowiem lutowanych powierzchni zachodzi wytworzenie metalicznego połączenia między nimi; w trakcie tego warstwa tlenków zostaje usunięta. Naskórek tlenkowy usuwa się przez mechaniczne tarcie i skrobanie nagrzaną do odpowiedniej temperatury powierzchni metalu.

Najpierw, wstępnie skrobie się powierzchnię metalu aż do uzyskania metalicznego połysku i natychmiast pokrywa lutowiem, ogrzewając równocześnie powierzchnię palnikiem lub lampą lutowniczą. Z chwilą roztopienia się lutowia powierzchnię aluminium naciera się silnie szcztoką drucianą, piłką do metalu lub pilnikiem, do chwili, gdy utworzy się dobrze związane lustro metalowe. Od tej chwili można nakładać dalsze partie lutowia, przy czym roztopione lutowie ochrania miejsce lutowania przed utlenieniem. W zastosowaniu na skalę przemysłową w celu usunięcia tlenków stosuje się zanurzone w roztopionym lutowiu, obracające się tarcze miedziane z drucianą szcztoką. W przypadku nagrzewania powierzchni palnikiem gazowym, płomień winien być lekko redukujący i dostatecznie duży, aby zapewnić należyte nagrzanie materiału oraz zapobiec szybkiemu stygnięciu na skutek dużej przewodności cieplnej, charakterystycznej dla aluminium. W stosunku do cienkich przedmiotów grozi niebezpieczeństwo przepalenia materiału, na co należy zwrócić szczególną uwagę.

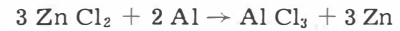
Do mniejszych części używa się przy lutowaniu nacieranym kolbę miedzianą, nagrzaną do czerwoności. Lutowanie można przeprowadzać również na gorącej płycie.

Zwilżenie powierzchni następuje szybciej, gdy stosowane są topniki nakładane na lutowaną powierzchnię równocześnie

z lutowiem, chociaż w zasadzie jest to sposób lutowania beztopnikowy. Ze względu na niskie temperatury lutowania stosuje się topniki organiczne.

### LUTOWANIE REAKCYJNE

Źródłem lutowia w tej metodzie lutowania jest proces chemiczny (reakcja). Proces powstawania lutowia przebiegać można na przykładzie lutowania aluminium za pomocą chlorku cynku; zachodzi następujący proces:



Powstające w wyniku reakcji pary chlorku aluminium ulatują do atmosfery. Wydzielony cynk przy temperaturze 419 °C topi się i zwilża lutowane powierzchnie.

W podobny sposób z chlorków metali uzyskuje się cynk, ołów, antymon, kadm, srebro oraz bizmut. Powstające srebrno w połączeniu z aluminium tworzy eutektykę o temperaturze topności 558 °C.

Topniki dla lutowania aluminium za pomocą reakcji chemicznych przedstawione są w tabeli 9.

Tabela 9  
Topniki reakcyjne dla lutowania aluminium

Skład topników w %					Temperatura wydzielenia się metalu w °C
ZnCl <sub>2</sub>	SnCl <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub> Br	NH <sub>4</sub> Cl	NaF	
90	—	8	—	2	420
90	—	—	8	2	380
—	90	—	8	2	330
90	—	—	10	—	410
—	90	—	10	—	360
45	45	—	10	—	330
76,5	13,5	8	—	2	380
76,5	13,5	—	8	2	370
72	18	8	—	2	350
72	18	—	8	2	340
46,8	43,2	8	—	2	330
46,8	43,2	—	8	2	320

Lutowanie przeprowadza się w sposób następujący. Lutowane miejsce pokrywa się topnikiem w formie pasty. Nagrzewanie połączenia przeprowadza się tak, aby topnik nie stykał się bezpośrednio z płomieniem. Pod wpływem wysokiej temperatury następuje reakcja. Sole niszczą naskórek tlenkowy z równoczesnym wydzieleniem cynku, który zwilża wolną od tlenku powierzchnię aluminium i umożliwia połączenie. Nie związane z aluminium tlenki wpływają na powierzchnię roztopionego lutowia. Po wydzieleniu się par chlorku aluminium oraz lutowia i przeniknięciu jego w szczelinę połączenie ochładza się, a resztki topnika dokładnie usuwa.

Topniki, zawierające NH<sub>4</sub>Cl, mają pewne zalety w porównaniu z topnikami zawierającymi NH<sub>4</sub>Br. Przy zastosowaniu SnCl<sub>2</sub> zamiast ZnCl<sub>2</sub>, obniża się temperatura, przy której następuje wydzielenie się lutowia. Higroskopijność topnika zawierającego SnCl<sub>2</sub>, jest mniejsza niż topnika z ZnCl<sub>2</sub>.

Wytrzymałość lutowanych tą metodą zakładkowych połączeń z cienkich blach zawiera się w granicach 11—16 kg/cm<sup>2</sup> przy zcięciu w miejscu połączenia. Ponieważ wydzielony cynk wystarcza tylko do lutowania połączeń wymagających małej ilości stopu wypełniającego, przy większych powierzchniach dodaje się dodatkowo miękkiego lutowia w postaci proszku lub pasty.

Ten sposób lutowania stosuje się często w zestawach rurkowo-zeberkowych. Przykładem może być aluminium rurociąg rurkowo-zeberkowy (rys. 8), którego zeberka połączone są z rurką za pomocą lutowania topnikiem o wysokiej zawartości chlorku cynkowego. Sposób ten stosuje się również do lutowania aluminium z innymi metalami.

Do wad tej metody należy skomplikowana kontrola jakości lutowanego połączenia. Zaleta jej polega na prostocie technologii lutowania, bez skomplikowanej aparatury i urządzeń. Mimo swych zalet sposób ten nie znalazł szerokiego zastosowania.

### LUTOWANIE PIECOWE

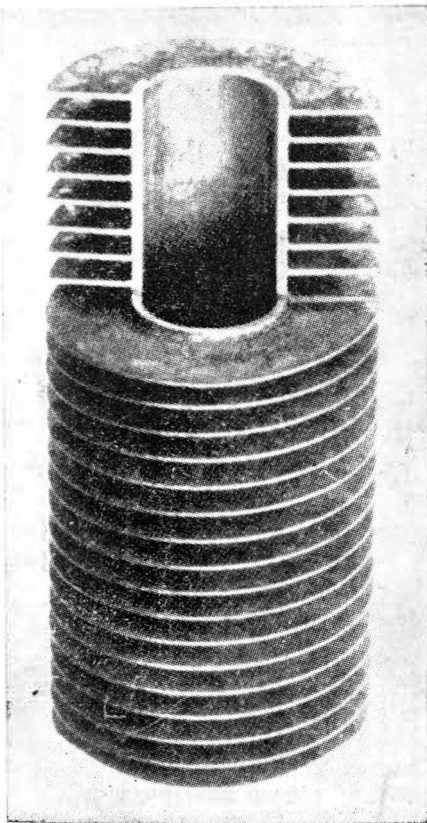
Ten sposób lutowania ma dużo zalet. Jedną z najważniejszych jest, że można jednocześnie w ciągu jednej operacji dokonać szeregu łączy, bez względu na ich długość. Dla słabiej pracochłonności procesu jest szeroko stosowany w produkcji seryjnej i masowej.

Jako źródło ciepła przy lutowaniu piecowym stosowane są piece lub tygły ogrzewane elektrycznie, naftą lub gazem.

Proces lutowania przeprowadza się w sposób następujący. Elementy z nałożonym uprzednio w miejscach lutowania lutownikiem zbiera się dla nałożenia topnika. Dla wyrobów sporządzonych z platerowanej lutownikiem blachy ceiowe jest pokrycie topnikiem całego wyrobu; daje to dużo lepsze rezultaty w porównaniu z miejscowym nałożeniem topnika. Topnik наноси się przez zanurzenie całego wyrobu w mieszance składającej się z równych części proszku solnego topnika i wody (lub alkoholu). Można również posłużyć się rozpylaczem. Wtedy warstwa topnika może mieć dowolną grubość. Bardzo ważne jest nałożenie dostatecznej ilości topnika. Orientacyjnie sądzić o tym można po zewnętrznym wyglądzie warstwy. Warstwa topnika po osuszeniu winna być całkowicie nieprzezroczysta. Dokładnego sprawdzenia ilości zastosowanego topnika dokonać można przez ważenie wyrobu przed topnikowaniem i po wysuszeniu wody. Suszenia dokonuje się w piecach elektrycznych w temperaturze 150 °C. Na każdy metr kwadratowy powierzchni winno przypadać średnio 3—6 gramów suchego topnika. Jeśli na wyrobie pozostałby wilgotny topnik, spowodowałoby to zniszczenie powierzchni podczas lutowania. Dlatego w żadnym przypadku nie można umieszczać wyrobu w piecu do lutowania, gdy topnik jest jeszcze wilgotny. Najszybciej wysuszyć można przez wstępne osuszenie wyrobu w strumieniu gorącego powietrza i usunięcie resztek wilgoci w piecu o temperaturze 150 °C.

Bezpośrednio po dokonaniu tych czynności wyrób umieszcza się w piecu, bez straty ciepła uzyskanego przy nagrzewaniu dla osuszenia. Temperatura pieca winna być taka, aby wyrób szybko osiągnął temperaturę lutowania. Dobre wyniki uzyskuje się przy nagrzaniu wyrobu w ciągu 1—2 minut do temperatury lutowania, nie przekraczając jej górnej granicy. Następnie wyrób wyjmuje się z pieca, szybko ochładza i poddaje obróbce cieplnej, odpowiedniej dla głównego metalu i charakterystyki wyrobu.

Zbyt wysokie nagrzewanie przy lutowaniu lub zbyt długie przebywanie lutownikiem w stanie roztopionym na powierzchni wyrobu może spowodować znaczną międzykrystaliczną dyfuzję zwłaszcza w stopach Al-Mg.

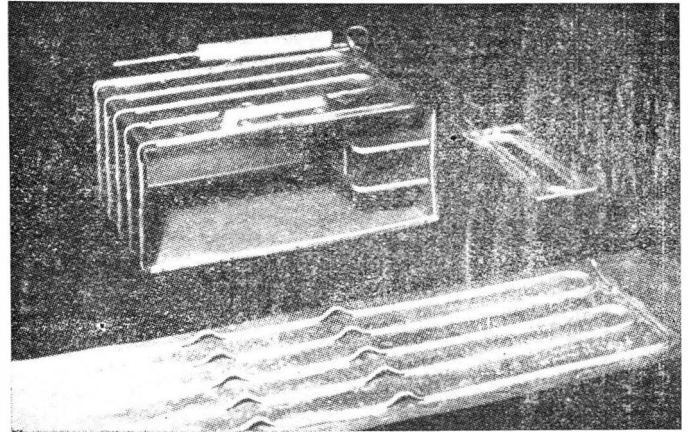


Rys. 8. Zestaw rurkowo-żeberkowy zlutowany topnikiem o wysokiej zawartości chlorku cynkowego (nagrzanie w piecu)

Jeśli połączenie wykonuje się za pomocą lutownika luźno ułożonego (w odróżnieniu od blachy platerowanej), to w tym przypadku wyrób umieszcza się w piecu tak, aby siła ciężkości spowodowała wyparcie topnika i wnikanie lutownika we

właściwym kierunku. Jeśli elementy są cienkie w porównaniu z ich wielkością, to należy uwzględnić możliwość wypaczeń i ugięć pod własnym ciężarem. W krańcowych przypadkach należy stosować powierzchnie oporowe, aby przeciwdziałać wykrzywianiu się zestawu.

Przy konstruowaniu należy zwrócić uwagę na takie formy połączeń, które umożliwiają automatyczne połączenie łączonych powierzchni, bez stosowania ustalających przyrządów, które szybko zużywają się w warunkach lutowania. Przyrządy ustalające sporządza się z nierdzewnej stali lub stopu niklowo-chromowego. Materiały te są w pewnym stopniu odporne na działanie topnika i jego par, ale mając na uwadze ich krótki czas pracy konstrukcja ich winna być



Rys. 9. Elementy lodówki lutowane w piecu — blacha pokryciowa z przylutowanymi rurkami i gotowy zestaw

w miarę możliwości prosta. Oczyszczanie przyrządów ustalających po każdej operacji przedłuża czas ich pracy.

Drugą ważną rzeczą jest należyte oczyszczenie elementów przed włożeniem do pieca, gdyż tylko w tym przypadku uzyskuje się dobre rezultaty. Proces oczyszczania elementów do lutowania przedstawiony jest dokładnie przy omawianiu lutowania przez zanurzenie.

Bardzo ważną sprawą jest przy lutowaniu piecowym dokładna kontrola temperatury i czasu nagrzewania. Wymagane jest utrzymanie temperatury w granicach  $\pm 10$  °C. Stopień nagrzewania winien być taki, aby zapewnił szybkie uzyskanie temperatury lutowania.

W większości przypadków lutowania stopów aluminium stosuje się sprzęt podobny do stosowanego w obróbce cieplnej tych materiałów. Stosuje się zazwyczaj piece i tygły ogrzewane elektrycznie, naftą lub gazem. Zastosowanie atmosfery obojętnej czy redukcyjnej nie daje żadnych efektów, dlatego do lutowania aluminium stosuje się piece komorowe z atmosferą powietrzną. Stosować można zarówno piece przepychowe, jak i zwykłe. W niektórych konstrukcjach pieców szybkie podgrzewanie przedmiotu uzyskuje się przez stworzenie strefy o wysokiej temperaturze przy wejściu do pieca. W niej doprowadza się zestaw do temperatury mniejszej o 10 do 40 °C od temperatury lutowania, a następnie przesuwają do strefy lutowania, którą reguluje się w granicach  $\pm 10$  °C.

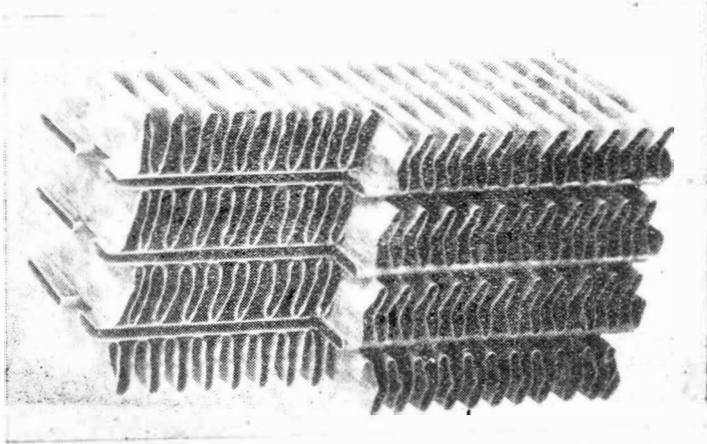
Wymagane jest, aby piec po lutowaniu zapewnił szybkie ochłodzenie poniżej temperatury solidusa lutownika.

Należy unikać zetknięcia roztopionego topnika z metalowymi częściami pieca, gdyż powoduje on korozję każdego ze zwykłych materiałów piecowych.

Resztki topnika winny być usunięte (w sposób przedstawiony przy omawianiu sposobu lutowania przez zanurzenie).

Sposób ten znalazł szerokie zastosowanie z chwilą wprowadzenia do przemysłu pieców elektrycznych. Przy lutowaniu w piecach przebieg nagrzewania łatwo można kontrolować i w zależności od potrzeby regulować. Przy lutowaniu piecowym zachodzi znacznie mniejsze pęcznienie się wyrobu niż przy spawaniu lub lutowaniu z zastosowaniem miejscowego nagrzewania. Zwiększa się jednorodność lutowanych szwów i zmniejsza rozrzut w mechanicznych właściwościach tych połączeń. Na rys. 9 przedstawiono elementy lodówki lutowane sposobem piecowym. Widoczne są rurki przylutowane do blachy aluminiowej. Na rys. 10 przedstawiono element chłodnicy samochodowej wykonany jako zestaw rurkowy, falisto-żeberkowy. Konstrukcję sporządzono z blachy aluminiowej pokrytej cynkiem.





Rys. 10. Lutowanie piecowe — zestaw rurkowy i falisto-żebarkowy. Do utworzenia rurek zastosowano blachę pokrytą cynkiem

### LUTOWANIE PRZEZ ZANURZENIE

Jest to bardzo niedawno opracowana w Stanach Zjednoczonych metoda lutowania, obecnie szeroko stosowana. Twarde lutowanie aluminium rozwinęło się od niepozornej pracy specjalnej (w fabrykach firmy Glenn L. Martin Company), do produkcji masowej, która pozwoliła podnieść wydajność o 200%, przy jednoczesnym wzroście jakości wykonania.

Po odpowiednim przygotowaniu i montażu elementów z ułożonym w miejscach połączenia lutowiem w przyrządzie ustalającym, rozgrzewa się całość równomiernie do temperatury zbliżonej do temperatury cieczy kąpielowej, po czym zanurza w wannie z roztopionym topnikiem na 1—3 minut.

Metoda ta powstała w wyniku rozwoju produkcji rakiet zdalnie sterowanych, które dla pewnych części wymagają całkowicie nowoczesnych metod wytwarzania. Aby sprostać wymaganiom zawężonym tolerancjom próbowano odejść od sposobu lutowania przez topnienie, a lutowanie przeprowadzać nowoczesnym sposobem przez zanurzenie. Jakość wykonania połączeń tą metodą, jak również duża prędkość produkcyjna zdecydowały o tym, że rozszerzono ten sposób również do konstrukcji samolotowych. Dotąd lutowano poszczególne części samolotowe tylko ręcznie, co szło nie tylko powoli, ale zawierało również niebezpieczeństwo deformacji przez miejscowe podgrzanie.

Proces lutowania składa się z sześciu operacji:

- 1) usunięcie zadziorów
- 2) oczyszczenie elementów
- 3) montaż w przyrządzie ustalającym
- 4) podgrzanie w piecu
- 5) lutowanie przez zanurzenie w roztopionym topniku
- 6) usunięcie resztek topnika

Ad 1. Usunięcie zadziorów. Jest to proces bardzo ważny. Połączenia lutowane powstają dzięki temu, że przez działanie kapilarnie lutowie wpływa do miejsc połączenia. Zadziory przeciwstawiają się temu, dając słabe powiązanie lutowia z głównym metalem, dlatego muszą być dokładnie usunięte.

Ad. 2. Oczyszczanie elementów. Operację tę przeprowadza się w następujący sposób:

1. Odłuszczenie w roztworze trójchlorku etylenu ( $C_2HCl_3$ ).
2. Rozświetlenie w gorącym roztworze wodorotlenku sodu NaOH w ciągu 45 sekund.
3. Mycie w zimnej wodzie.
4. Trawienie w 50% roztworze  $HNO_3$  w ciągu 45 sek.
5. Zanurzenie w środku usuwającym tlenki w ciągu 1 minuty.
6. Mycie w gorącej wodzie.
7. Suszenie w strumieniu suchego powietrza.

Ad 3. Montaż w przyrządzie ustalającym. Odpowiedni materiał zalewowy, np. lutowie 88% Al i 12% Si w formie blachy o grubości od 0,08 do 0,5 mm lub w postaci drutu o średnicy od 1 do 6 mm, układa się w miejscach lutowania. Następnie ustala się całość w odpowiednim przyrządzie, przez szczipające spawanie (elektryczne spawanie punktowe), utwierdzenie za pomocą sprężyn, klamer lub zacisków. Przy zastosowaniu spawania użycie przyrządów ustalających jest zbędne. Wykonane są one ze stali nierdzewnej lub stopu niklu z chromem (inkonelu).

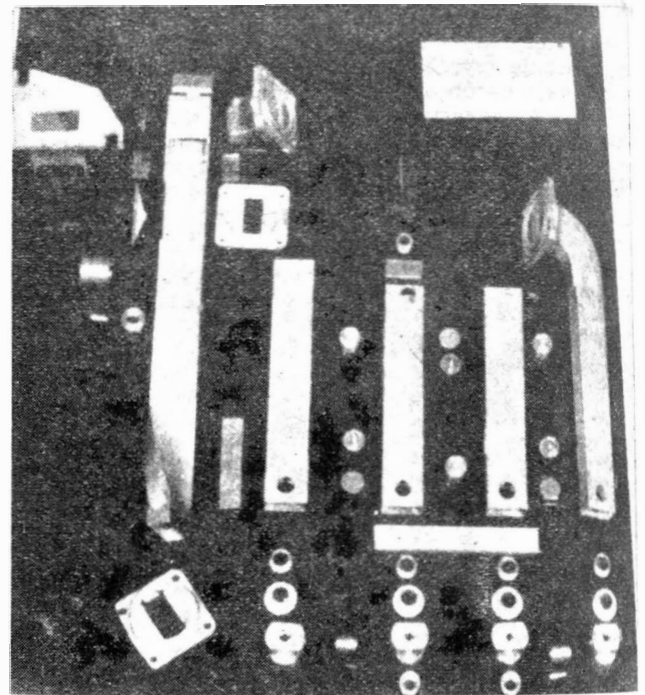
Sposób postępowania przy lutowaniu przez zanurzenie przedsięwzięć można na następującym przykładzie: na rys. 11 pokazane są elementy konstrukcji przeznaczonej do lutowania. Na rys. 12 widoczna jest konstrukcja ustalająca w przyrządzie i gotowa do zanurzenia.

Ad 4. Podgrzanie w piecu. Części zamocowane w przyrządzie ustalającym umieszcza się w piecu o temperaturze 540—580 °C na 1 do 3 minut, w zależności od masy wyrobu.

Podgrzanie to usuwa równocześnie wszelką wilgoć z części przeznaczonych do lutowania oraz z przyrządów ustalających. Wyklucza się przez to możliwość eksplozji w chwili zanurzenia w topniku, a jednocześnie zbliża temperaturę zestawu do temperatury topnika. Unika się dzięki temu większej redukcji cieplnej cieczy kąpielowej. Redukcja cieplna kąpiel może spowodować krzepnięcie topnika w miejscach bezpośrednio stykających się z konstrukcją lutowaną. Skrzepnięty topnik zamyka małe otworki i szczeliny, uniemożliwiając dojdzie roztopionego topnika do wnętrza.

Ad 5. Lutowanie przez zanurzenie. Skonstruowana osiągnęła temperaturę 540—580 °C, wyjmując ją z pieca i zanurza w roztopionym topniku o temperaturze ok. 600°. W tym momencie zachodzi proces lutowania. Czas zanurzenia, zależnie od masy części, wynosi 1—3 minut. Są to warunki graniczne. Zwykle czas zanurzenia określa się drogą doświadczalną.

Lutowanie przeprowadza się przy użyciu topnika omówionego poprzednio, składającego się z chlorowych i fluorowych soli. Topnik jest względnie drogim materiałem, dlatego w



Rys. 11. Detale konstrukcji z rys. 13

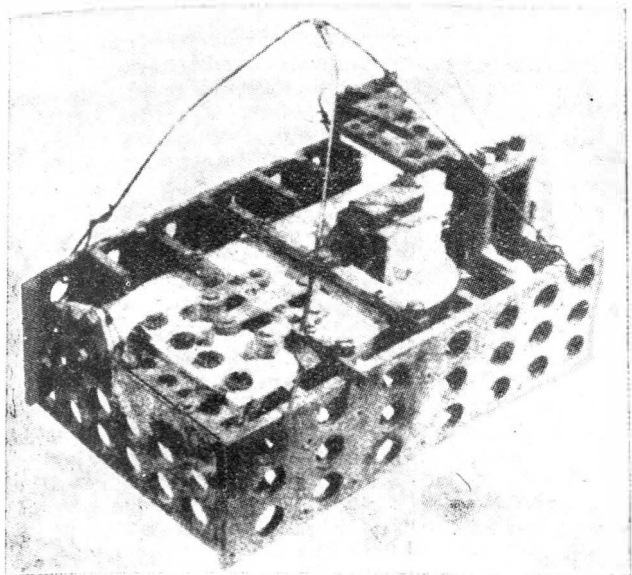
maga się, aby osadzony na wyrobie topnik wrócił do wanny. Uzyskuje się to przez odpowiednie przechylenie zestawu i usuwanie ze szczelin strumieniem sprężonego powietrza. Ilość topnika w wannie winna być taka, aby temperatura nie obniżyła się więcej niż o 15 °C przy zanurzeniu elementów.

Wanna z kąpielą nagrzewana jest dwiema parami pokrytych niklem elektrod.

Ad 6. Usunięcie pozostałości topnika. Po ochłodzeniu lutowanych części, dokonuje się usunięcie pozostałości topnika w sposób następujący:

1. Mycie w gorącej wodzie w ciągu 10 min. Usunięcie przyrządów ustalających.
2. Przemycie elementów w 10% roztworze kwasu siarkowego w czasie 1—2 min, w celu zneutralizowania pozostałości topnika.
3. Mycie w zimnej wodzie.
4. Rozświetlenie w roztworze składającym się z 10%  $HNO_3$  i 0,25% HF w ciągu 3—5 minut.





Rys. 12. Montaż detali w przyrządzie ustalającym

## 5. Płukanie w zimnej wodzie.

Gotowa, zlutowana tym sposobem konstrukcja jest przedstawiona na rys. 13.

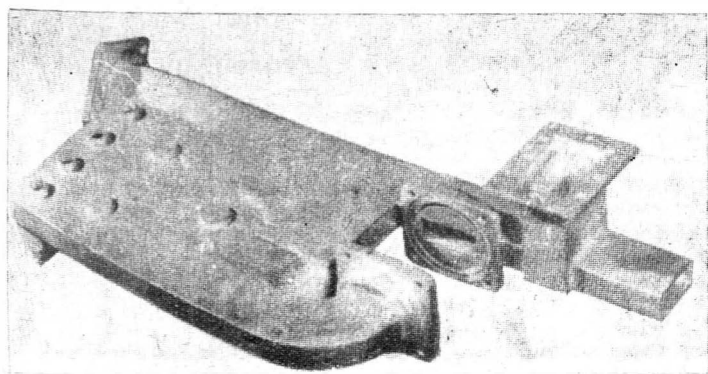
Na rys. 14 przedstawiono inną konstrukcję zlutowaną sposobem przez zanurzenie.

Sposób lutowania przez zanurzenie wymaga następujących urządzeń:

- piec do podgrzewania: na przykład elektryczny dla temperatury do 650 °C,
- tygiel do zanurzania wyłożony ceramiką, ogrzewany za pomocą zanurzonych elektrod pokrytych niklem. W pomieszczeniach z tyglami winna być ciągła wentylacja dla odprowadzenia par chlorków i fluorków,
- cztery naczynia ze stali nierdzewnej dla usunięcia topnika po lutowaniu.

Istnieją dwa typy tygli i dwie metody nagrzewania zbiorników topnika. Pierwszy typ, to tygiel niklowy, ogrzewany z zewnątrz najczęściej elektrycznymi elementami oporowymi. Ten typ tygla stosuje się dla niedużego zakresu prac i dla prac przygotowawczych, zwłaszcza gdy ma się do czynienia z wyrobami o małej masie. W masowej produkcji stosuje się drugi typ tygla, nagrzewany dzięki oporności istniejącej przy przepływie prądu elektrycznego o niskim napięciu między zanurzonymi w topniku elektrodami.

Cały proces lutowania należy dokładnie zaplanować. Przez należyte zaprojektowanie miejsc połączeniowych i użycie części samoustalających się można uprościć technologię lu-



Rys. 13. Gotowa konstrukcja zlutowana przez zanurzenie

towania i uniknąć wielkich kosztów. Należy unikać stosowania śrub i nitów, gdyż zalewają się one płynnym lutem i topnikiem, który z trudem można usunąć.<sup>2)</sup>

<sup>2)</sup> Doświadczenia wykazują, że tylko te środki ustalające są dobre, które — zależnie od potrzeby — zapewniają szybki demontaż.

Jeśli wyroby są duże i ciężkie, należy je mechanicznie przemieszczać z pieca do wanny z topnikiem. Urządzenie do przemieszczania winno zapewniać równoległe przesunięcie, aby nie nastąpiły wzajemne przemieszczenia miejsc połączeniowych i umieszczonego w nich lutowia.

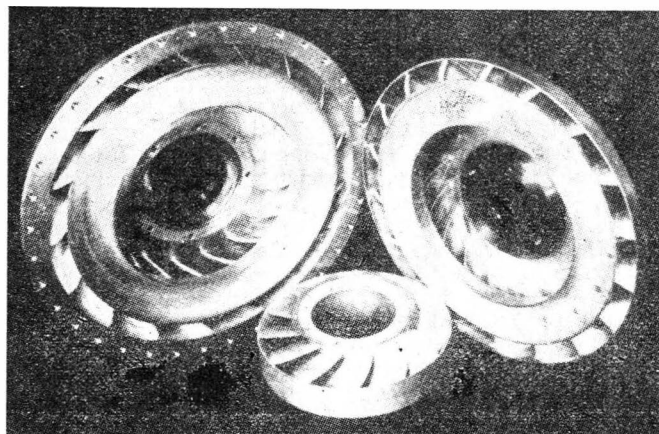
Jakość lutowania zależy w dużym stopniu od właściwego utrzymania całego urządzenia. W Glenn Martin Company tygiel zanurzeniowy jest dwa razy w tygodniu oczyszczany od pozostałości solnych i żużla. Skład topnika jest raz w tygodniu badany i zależnie od analizy poprawiany. W kilku miejscach mierzy się stale temperaturę i nastawia, z dokładnością do 1 °C.

Zalety tej metody lutowania są następujące:

1. Wysoka jakość połączenia — wysoka wytrzymałość i duża dokładność.
2. Możliwość jednoczesnego przeprowadzenia lutowania w kilku miejscach (często niedostępnych).
3. Małe koszty zwłaszcza przy dużej produkcji.
4. Duża wydajność.

### PORÓWNANIE ZALET LUTOWANIA PIECOWEGO I PRZEZ ZANURZENIE W TOPNIKU

W stosunku do części prostych oba sposoby są jednakowo stosowane. Jednak, gdy lutowaniem łączy się względnie cienkie elementy oraz gdy zachodzi potrzeba łączenia wielu drobnych elementów (zwłaszcza gdy głównym metalem jest stop Al—Mg—Si), stosuje się metodę zanurzenia w topniku.



Rys. 14. Trzy elementy przekładni turbinowej. Konstrukcję sporządzono z odlewów kokilowych i odpowiednio ukształtowanej blachy lutowniczej

Metoda ta zapewnia szybkie nagrzanie do wysokiej temperatury bez niebezpieczeństwa przegrzania cienkościennych konstrukcji. Inną ważną zaletą jest to, że cienkie konstrukcje z dużymi powierzchniami na skutek działania prawa Archimidesa mniej ulegają wypaczeniu pod działaniem własnego ciężaru.

W połączeniach otrzymanych tą metodą lutowie znajduje się w miejscu połączenia dokładnie tam, gdzie ono jest potrzebne.

Typowy przykład pokazany jest na rys. 15 a i b. Analogiczne połączenia sporządzone zostały ze stopu aluminium o zawartości 1—1,52 Mn, przy czym część z prawej strony rysunku a i b pokryta jest lutowiem 95 Al i 5 Si.

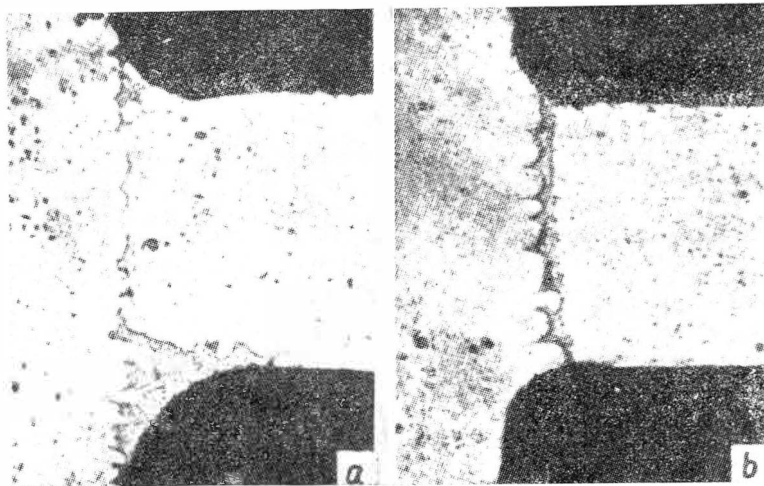
Podsumowując, przy lutowaniu niedużej ilości elementów i jeśli prace lutowania są przypačkowe, należy zastosować piec lub niedużą wannę z topnikiem, ogrzewaną z zewnątrz.

Produkcja masowa i łączenie dużych skomplikowanych lub cienkich wyrobów usprawiedliwia zastosowanie wyposażenia dla zanurzenia w topniku.

### LUTOWANIE PALNIKOWE<sup>3)</sup>

Jest to odpowiednik lutowania piecowego przeprowadzany ręcznie. Jako źródło ciepła stosowany jest płomień palnika. Sposób ten jest odpowiedni przy wtórnych operacjach lutowniczych takich jak łączenie rur i zestawów, które już uprzednio były polutowane przy zastosowaniu innych środ-

<sup>3)</sup> Inna często używana nazwa — lutowanie płomieniowe.



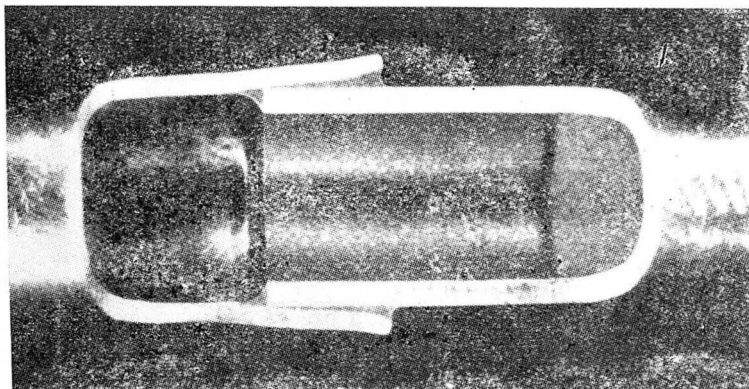
Rys. 15. Połączenia stopu Al o zawartości 1–1,5% Mn. a) połączenie lutowane w piecu — eutektyczny skład lutowania aluminiowo-krzemowego spłynął do niższej części połączenia, b) połączenie lutowane przez zanurzenie — lutowie pozostało dokładnie w miejscu połączenia

ków. Sposób ten jest szczególnie zalecany do lutowania połączeń nasuwkowych oraz połączeń zakładkowych.

Lutowanie przy użyciu palnika wymaga odpowiedniego zestawienia rur, umieszczenia lutowia i pokrycia miejsca połączenia topnikiem o wysokiej zawartości chlorku cynkowego. Lutowie może być naniesione przez oddzielne polutowanie poszczególnych części. Podgrzanie miejsca połączenia winno nastąpić szybko. Podczas procesu lutowania będzie miała miejsce dyfuzja i wzajemne rozpuszczanie się poszczególnych składowych materiałów zależnie od czasu działania wysokiej temperatury. Na powierzchni styku lutowia i podstawowego metalu mogą powstać kruche międzymetaliczne związki. Zmniejszają one wytrzymałość połączeń pracujących na ścinanie i naprężenia dynamiczne. Aby zmniejszyć tworzenie się tych związków należy nagrzewanie przerwać, skoro tylko lutowie dostanie się do złącza. Grubość warstwy międzymetalicznej może dochodzić do 0,008 mm. Zaleca się, zwłaszcza przy topniku o wysokiej zawartości chlorku cynkowego, nagrzewać w pobliżu miejsca połączenia, aby ciepło przewodzone było do złącza poprzez metal, ponieważ wilgoć z płomienia może reagować z topnikiem i utworzyć tleno-chlorki. Powstrzymują one łączenie i utrudniają usunięcie resztek topnika. Skoncentrowany płomień nie powinien działać zbyt długo w jednym miejscu ze względu na możliwość przepalenia. Gdy tylko złącze osiągnie temperaturę odpowiednią dla reakcji topnika, wydziela się metaliczny cynk zapewniając zwilżenie i wypełnienie miejsca połączenia przez lutowie.

Jako gazu palnego użyć można tlenu, tleno-wodoru, tleno-acetyleny lub innego gazu o wysokiej wartości opałowej. Palnik winien być tak wyregulowany, aby atmosfera była lekko redukująca.

Sposób ten jest odpowiedni dla lutowania połączeń nasuwkowych rur (rys. 16), gdzie zastosować można topnik o wysokiej zawartości chlorku cynkowego i dopasowany materiał wypełniający. Połączenia takie stosuje się w urządzeniach klimatyzacyjnych i wymiennikach ciepła.



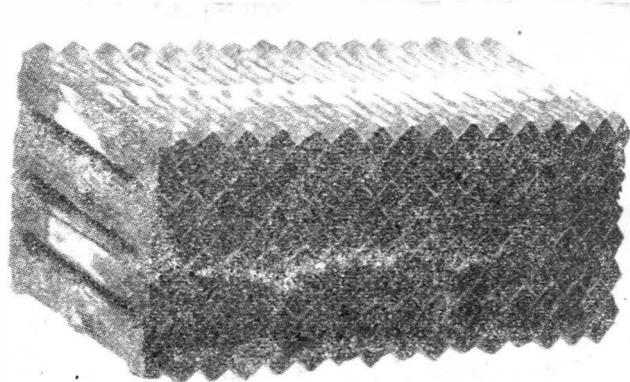
Rys. 16. Lutowanie palnikowe — przekrój poprzeczny aluminiowej rurki. Zastosowano topnik o wysokiej zawartości chlorku cynkowego i dopasowany materiał wypełniający

## LUTOWANIE PRZEZ ZANURZANIE

Lutowanie przez zanurzenie jest odpowiednie dla łączenia wymienników ciepła o budowie komórkowej i podobnych zestawów, mających dużą ilość połączeń włoskowatych (rys. 17). Sposób ten opiera się na wykorzystaniu zjawiska włoskowatości. Przy zastosowaniu właściwego toku postępowania następuje pionowe włoskowate podniesienie się lutowia na wysokość 25 mm dla lutowii cynkowych. Dla lutowii cynowych jest ono większe i rośnie ze wzrostem zawartości cyny. Dla czystej cyny wysokość podnoszenia w naczyńkach włoskowatych wynosi 125 mm.

Sposób postępowania w tej metodzie jest następujący. Zestaw oczyszcza się w sposób przedstawiony na wstępie artykułu, umieszcza w odpowiednim szablonie ustalającym i nagrzewa do odpowiedniej temperatury. Gdy tylko zestaw osiąga żądaną temperaturę, pierwszą ścianę, która ma być złączona, zanurza się w roztopionym topniku. Działanie włoskowate wciąga topnik do złącza i umożliwia mu oczyszczenie powierzchni. Następnie zestaw zanurza się w roztopionym lutowiu, które łatwo daje się wciągnąć do miejsc włoskowatych, tworząc wymagane połączenie. Czynność tę powtarza się w stosunku do innych ścianek. Topnik pozostawia na konstrukcji musi być usunięty.

Ścisłe przestrzeganie wymaganych temperatur jest bardzo ważne w metodzie lutowania przez zanurzenie. Topnik nagrzewa się do temperatury maksymalnej jego aktywności, zaś lutowie winno mieć temperaturę nieco wyższą od zakresu topliwości. Pożądane jest, aby temperatura topnika była nieco wyższa od temperatury lutowia, ze względu na możliwość krzepnięcia topnika w miejscach włoskowatych. Na skutek straty ciepła. Z drugiej strony zbyt wysokie tempe-



Rys. 17. Zestaw komórkowy lutowany przez zanurzenie kąpieli z roztopionego cynku — lutowanie przez zanurzenie

ratury, zwłaszcza gdy czas ich trwania jest długi, mogą spowodować poważne rozpuszczenie się aluminium. Lutowanie w spoiwie wysokocynkowym może spowodować rozpuszczenie się aluminiowej części zestawu.

## LUTOWANIE BEZTOPNIKOWE

Jest to nowa znajdująca się jeszcze w stadium badań metoda beztopnikowego, niskotemperaturowego lutowania aluminium. Opiera się ona na zastosowaniu specjalnego lutowia na osnowie cynku, zapewniającego wysoką odporność na korozję. Metoda ta nie wymaga oczyszczenia powierzchni i daje połączenia bardzo wytrzymałe, jak aluminium techniczne.

Znanych jest kilka składów lutowia:

1. Zn 85; Cu 5; Al 8; Pb 1,5; Sn 0,5;
2. Zn 87; Al 5; Pb 5; Sn 3;
3. Zn 90; Pb 7; Sn 3.

Skład lutowii podano w procentach.

Pierwsze z powyższych lutowii zaspokajają dużo różnorodnych wymagań, jednak zawartość miedzi zmniejsza niektóre jego właściwości.

Drugie lutowie z  $\sigma_r = 17,5$  kG/mm<sup>2</sup> odznacza się wysokimi właściwościami przeciwnociernymi. Temperatura topliwości tego lutowia wynosi 315 °C.

Ostatnie z powyższych lutowii, posiadające temperaturę topliwości 260 °C i  $\sigma_r = 7$  kG/mm<sup>2</sup>, wykorzystuje się do lutowania bardzo cienkich blach aluminiowych.

Istnieje specjalna technologia przygotowania tych lutowii. Znane są inne lutowia z jeszcze bardziej niską temperaturą topliwości, lutowanie którymi możliwe jest za pomocą zwykłego palnika. Źródła zachodnie nie podają niestety ich składow. Z uwagi na wymagane silne obniżenie temperatury topliwości odznaczają się one zwiększoną zawartością ołowiu i cyny. Zastosowanie ich znacznie ułatwia lutowanie różnych materiałów, umożliwia wykorzystanie najbardziej dostępnych źródeł ciepła, obniża wymagania w stosunku do kwalifikacji pracownika. Za pomocą powyższych lutowii łatwo przeprowadza się lutowanie aluminium z miedzią i miękkie lutowanie wyrobów z aluminium.

Najlepszym lutowiem do beztopnikowego lutowania aluminium jest stop cynku<sup>4)</sup> zawierający 3,5—4,3% Al<sup>5)</sup>. Dopuszczalne są przymieszki magnezu i manganu. Zwiększają one trwałość spoiny. Zawartość domieszek niskotopliwych metali takich, jak Pb, Sn, Bi i Cd jest bardzo szkodliwa, gdyż wybitnie zmniejsza odporność połączenia na korozję.

Lutowie to nie wymaga stosowania topnika i wstępnego oczyszczenia powierzchni z tlenków rdzy i tłuszczów. Zwilżanie lutowiem powierzchni głównego metalu przeprowadza się przez pocieranie kawałkiem lutowia o powierzchnię metalu, nagrzaną do temperatury topliwości lutowia. Warstwa tlenków w tuszczy się i odpada po lekkim potarciu o powierzchnię metalu. Oddzielne cząstki tlenków usuwa się końcem pręta z lutowia. Przypuszcza się, że stopione lutowie przenika pod warstwę tlenków i niszczy ją. Po zwilżeniu powierzchni aluminium nakładamy drugą warstwę dla wykańczającego lutowania. W przypadku lutowania połączeń z włoskowatymi szczelinami nanosi się lutowia na każdą z łączonych powierzchni oddzielnie i łączy przez podgrzanie złączonego połączenia.

Metoda ta nadaje się szczególnie do małej produkcji, do lutowania stykowych i zakładkowych połączeń. Uzyskane tą drogą połączenia odznaczają się wysokimi właściwościami antykorozyjnymi i dużą wytrzymałością.

## INNE METODY LUTOWANIA

Ze względu na rodzaj źródła ciepła użytego do nagrzania przedmiotów istnieje jeszcze lutowanie oporowe, indukcyjne i blokowe (przez sprasowanie).

Między łączonymi powierzchniami umieszcza się odpowiednią ilość lutowia i topnika. Przy lutowaniu oporowym ciepło potrzebne do roztopienia lutowia powstaje na skutek oporu stawianego przez łączone powierzchnie przy przepływie prądu elektrycznego o dużym natężeniu.

W metodzie indukcyjnej nagrzanie następuje na skutek oporu, jaki stawia metal przy przepływie prądów wirowych wytworzonych w cewce indukcyjnej.

Lutowanie blokowe jest nowoczesnym odpowiednikiem kowalskiego lutowania ciężkimi rozgrzanymi kleszczami. Ogrzane kostki dopasowane do ogólnego zarysu części lutowanej zaciska się dostatecznie mocno, aby wytłoczyć topnik z brzegów połączenia. Metodę tę stosuje się do lutowania typu talerzowego wymienników ciepła i parowników.

Wszystkie te sposoby mają ograniczone zastosowanie.

## LUTOWANIE ULTRADŹWIĘKOWE

Jest to nowy i mający przed sobą wielkie perspektywy kierunek w opanowaniu procesu lutowania aluminium. Pierwsze urządzenia, oparte na wykorzystaniu zjawiska ultradźwięków, opatentowano w Niemczech w 1939 r. Metoda ta w pełni rozwinęła się dopiero w ostatnich latach.

Lutowanie ultradźwiękowe jest jedynie operacją beztopnikowego cynowania powierzchni i następująca po niej operacja lutowania jest właściwym procesem łączenia części. Zniszczenie warstwy tlenków w tej metodzie następuje na skutek działania ultradźwiękowych drgań wywołujących kawitację (tworzenie się pęcherzyków) na granicy rozdziału ciekłego lutowia i powierzchni obrabianego metalu. Pod wpływem kawitacji zachodzi zjawisko wyrwania oddzielnych cząstek struktury materiału (tlenków i zanieczyszczeń), które — jako lżejsze — wypływają na powierzchnię ciekłego lutowia.

Jako źródła ultradźwiękowych drgań stosuje się wzбудniki (generatory) piezoelektryczne i magnetostrykcyjne. Kon-

strukcja ich oparta jest na wykorzystaniu zjawiska magnetostrykcji, to znaczy — zmiany wymiarów kryształów niektórych materiałów pod wpływem zmiennego pola magnetycznego.

Piezoelektryczne wzбудniki oparte są na właściwościach takich materiałów, jak kwarc, sól Seignetta (winian potasowo-sodowy), fosforan amonu lub potasu, tytanian baru i innych.

Budowa magnetostrykcyjnych wzbudników oparta jest na właściwościach metali ferromagnetycznych (niklu i kobaltu), oraz stopów: inwaru (36% Ni, 64% Fe), monelu (68% Ni, 32% Cu), permalloyu (45% Ni, 55% Fe), permenduru (50% Fe, 50% Co) i innych zmieniających swoje liniowe wymiary przy zmianie pola magnetycznego. Zjawisku temu towarzyszy wydzielanie się ciepła, które odprowadza się w odpowiedni sposób.

W lutowaniu metali większe zastosowanie znalazły wzbudniki magnetostrykcyjne, które w odróżnieniu od piezoelektrycznych mogą pracować przy wysokich temperaturach. Efekt magnetostrykcyjny w metalach i ich stopach osłabia się ze wzrostem temperatury i w punkcie Curie zanika zupełnie. Wykorzystując dla magnetostryktora permendur, można otrzymać wzbudniki pracujące przy temperaturach do 400 °C. Wzbudniki piezoelektryczne stosuje się dla niskich temperatur i na duże częstotliwości drgań ultradźwiękowych.

Drgania powstające w ultradźwiękowym wzbudniku są przekazywane do lutowia drgającego z tą samą częstotliwością co i wzbudnik. Niszczą one warstwę tlenków znajdującą się na powierzchni stopów aluminiowych. Na skutek działania dostatecznie silnych drgań w cieczy powstają fale wzdłużne. W tych samych miejscach ciecz podlega na przemian naprężeniom ściskającym i rozciągającym, na skutek zmiany ciśnienia od fal ultradźwiękowych. Gdy ciśnienie zmienia się co do wielkości, od zera do wartości większych od ciśnienia atmosferycznego, to w węzłach fal po ujemnej ich stronie powstają zerowe lub ujemne ciśnienia, które mogą spowodować rozerwanie cieczy i powstanie pęcherzyka. Pęcherzyki te pozostają puste lub gromadzą się w nich gazy rozpuszczone w cieczy i pary fazy płynnej. Przy następnym narastaniu ciśnienia pęcherzyki zamykają się z trzaskiem. Wzrost ciśnienia w czasie zamykania pęcherzyków oraz chwilowy brak cieczy w pobliżu twardego ciała jest czynnikiem działającym niszcząco na jego powierzchnię. Działanie fal ultradźwiękowych objawia się burzeniem roztopionego lutowia z równoczesnym oderwaniem wszelkich zanieczyszczeń i wyniesieniem ich na powierzchnię. Ze zjawiskiem kawitacji można się spotkać i w innych dziedzinach techniki.

Warstwa tlenków na powierzchni aluminiowych stopów jest niszczone szybciej niż główny metal. W niektórych warunkach, zwłaszcza przy temperaturze w pobliżu 400 °C, pod wpływem działania ultradźwiękowych drgań odrywają się również cząstki głównego metalu. Dlatego metodą tą nie można lutować cienkich blach; ulegają one zniszczeniu pod wpływem kawitacji. W tych przypadkach stosuje się spawanie ultradźwiękowe. Właściwości kawitacyjne samych lutowii nie są jeszcze dostatecznie zbadane.

W procesie lutowania stosowane są ultradźwiękowe drgania o częstotliwości nie większej niż 25 kHz. Doświadczenia wykazały, że ze zmniejszeniem częstotliwości drgań ultradźwiękowych zwiększa się efektywność kawitacyjnego działania, prawdopodobnie na skutek zmniejszenia ujemnego działania sił bezwładności, występujących w czasie procesu. Człowiek nie słyszy drgań dźwiękowych o częstotliwości powyżej 16 kHz. Z tych względów w procesie lutowania stosuje się wzbudniki drgań na częstotliwość 18—22 kHz. Większe częstotliwości są również niepożądane ze względu na zużywanie się wyposażenia do ultradźwiękowego lutowania.

Ultradźwiękowe lutowanie jest zwykle operacją cynowania, następująca po niej operacja lutowania jest właściwym procesem łączenia ocynowanych części. Ocynowane elementy nagrzewa się do temperatury wyższej od temperatury likwidusa lutowia o 30—50 °C i dokonuje lutowania jedną ze zwykłych metod, najlepiej przez przytknięcie lutowia w formie pręta lub za pomocą kolby elektrycznej.

Możliwe jest połączenie procesu cynowania i lutowania. Jednak ze względu na możliwość niedokładnego ocynowania i wynikających stąd braków oraz ze względu na szybkie zużywanie się kosztownego wyposażenia ultradźwiękowego (wanny) nie jest stosowane.

Efektywność procesu lutowania zależy od składu lutowia. Lutowia do lutowania ultradźwiękowego przedstawione są w tab. 1 — część I artykułu 1960 T.L. nr 1. Stosowane są

<sup>4)</sup> Cynk ma wysokie właściwości rozpuszczające w stosunku do stopów aluminium. Aluminium dodano dla zwiększenia zdolności zwilżania lutowia.

<sup>5)</sup> Autor artykułu przeprowadzał próby przy zastosowaniu powyższego lutowia.



różne łatwotopliwe lutowia na osnowie Zn—Cd i Zn—Sn o wysokiej zawartości Zn, z dodatkami lub bez dodatków srebra. Zwykle ze względu na odporność na korozję stosuje się lutowia:

1. 20—30% Zn, 1—2% Ag, reszta Sn z temp. topliwości 260—280 °C,
2. 44—40% Zn, 2—3% Ag, reszta Sn z temp. topliwości 320—350 °C.

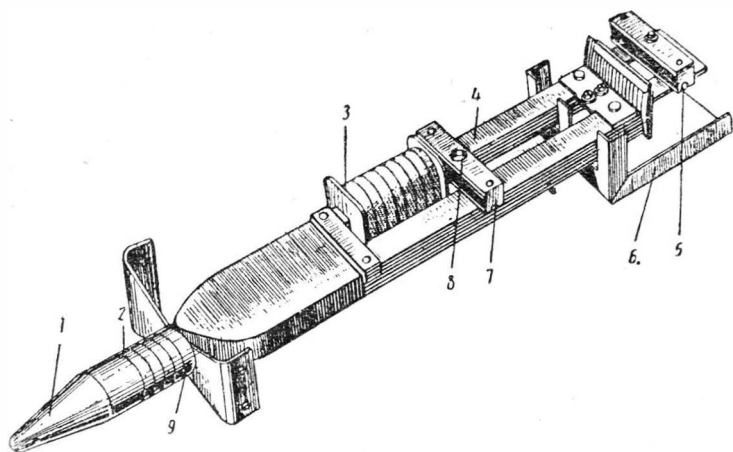
Zawartość srebra zwiększa odporność na korozję i wytrzymałość spoiny. Lutowia te mają zadowalające właściwości w zwykłych warunkach atmosferycznych i w wilgotnej atmosferze.

Przy lutowaniu niskotopliwymi lutowiami (91 Sn 9 Zn) należy szczególnie dokładnie kontrolować jakość cynowanej powierzchni. Uzasadnione to jest dlatego, że w tak niskich temperaturach procesy dyfuzji, warunkujące szepienie się lutowia z głównym metalem, zachodzą wolniej.

Stosowane są dwa schematy lutowania (cynowania):

1. Lutowanie ultradźwiękowym palnikiem (kolbą).
2. Lutowanie w wannie lutowniczej.

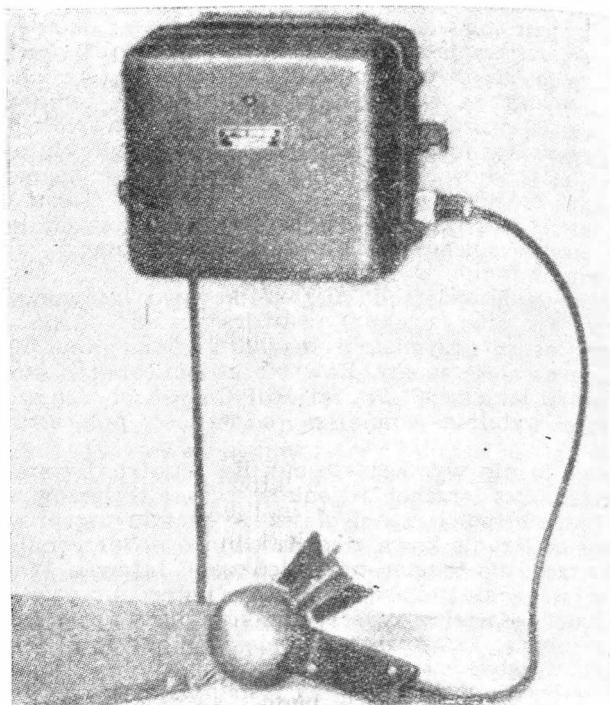
Na rys. 18 pokazana jest budowa ultradźwiękowego palnika obsługiwanego ręcznie. Prąd elektryczny o niskiej częstotliwości w specjalnym kilkulampowym generatorze zamieniany jest na prąd o ultradźwiękowej częstotliwości. Prąd o wysokiej częstotliwości przepływa przez uzwojenie cewki i wytwarza wokół niej pole magnetyczne o wysokiej częstotliwości. Magnetostryktor, umieszczony wewnątrz cewki indukcyjnej, pod działaniem pola magnetycznego zaczyna wytwarzać podłużne fale ultradźwiękowe. W ultradźwiękowym palniku dla wytworzenia stałego podmagmiesowywa-



Rys. 18. Budowa ultradźwiękowego palnika: 1—końcówka palnika; 2—element nagrzewający; 3—uzwojenie wzbudzające; 4—wzbudnik magnetostrykcyjny; 5—włącznik; 6—ekran; 7—wkładka elastyczna; 8—miejsce węzłowego zamocowania; 9—przepona

nia ustawia się równoległe z cewką magnes stały. Do końca magnetostryktora przylutowuje się trzpień ze stopu o małej przewodności cieplnej (na przykład z nowego srebra); długość trzpienia dobiera się taką, aby wibrował z tą samą częstotliwością rezonansową co i wzbudnik. Końcówka palnika połączona jest z wzbudnikiem przez elastyczną przeponę, wykonaną z monelu, stali chromowej lub stopu niklu ze srebrem, to znaczy z materiałów mało podlegających niszczeniu działaniu kawitacji. Miedź ze względu na zanieczyszczanie lutowia nie jest stosowana. Końcówka palnika nagrzewana jest za pomocą uzwojenia, przez które przepływa prąd elektryczny o niskim napięciu. Ultradźwiękowy palnik z generatorem wysokiej częstotliwości pokazany jest na rys. 19.

Cynowanie stopów aluminiowych za pomocą ultradźwiękowego palnika odbywa się zwykle w sposób następujący: Detale oczyszcza się z tłuszczu, farb i brudu, a miejsca przeznaczone do lutowania oczyszcza się z tlenków zwykłymi mechanicznymi lub chemicznymi sposobami. Detal podgrzewa się nieco powyżej temperatury topliwości lutowia; jednocześnie włącza się obwód nagrzewający końcówkę ultradźwiękowego palnika i oczyszczoną końcówkę palnika cynuje się przez szybkie zanurzenie w roztopionym lutowiu. Po włączeniu obwodu wysokiej częstotliwości następuje cynowanie detali płynnymi ruchami palnika w roztopionym lutowiu, równoległe do cynowanej powierzchni, bez trącenia jej końcówką palnika. Lutowie może być naniesione na detal



Rys. 19. Ultradźwiękowy palnik z generatorem wysokiej częstotliwości. Widoczne żebra ochładzające

kroplami, w które przy cynowaniu zanurza się końcówkę palnika.

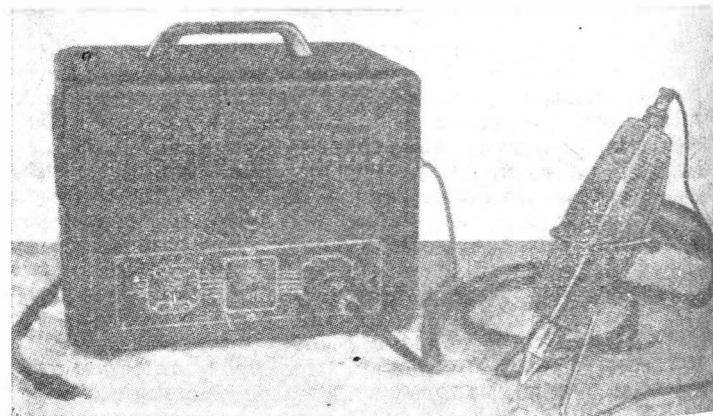
Szybkość cynowania detali tą metodą wynosi 0,25—0,15 cm<sup>2</sup>/sek.

Przy łączeniu detali za pomocą ultradźwiękowego palnika nie mającego oddzielnego obwodu nagrzewającego stosuje się wstępne podgrzanie na płycie ogrzewanej elektrycznie lub w piecu.

Przy pracy z ultradźwiękowym palnikiem możliwe jest nie dość dokładne usunięcie warstwy tlenków. Zwykle w miejscach, gdzie nie została ona usunięta, warstwa cyny odstaje od powierzchni detalu i w miejscach tych obserwuje się charakterystyczne pęcherzyki. Jakość cynowania sprawdza się prostym sposobem; detal pokryty jeszcze płynnym lutowiem odwraca się pionowo w dół i w tym momencie niedokładnie pocynowane powierzchnie zostają odsłonięte. Miejsca te powinny być pokryte powtórnie.

Zwykle na skraju cynowanych miejsc tlenki nie dają się dokładnie usunąć i warstwa lutowia w tych miejscach może odstawać.

Obecnie stosowane są ultradźwiękowe palniki o różnych konstrukcjach, na przykład firm Mullard (Wielka Brytania) i Siemens (NRF). W Związku Radzieckim wypuszczono pal-



Rys. 20. Palnik ultradźwiękowy UP-21 produkcji radzieckiej

niki pod nazwą UP-21 (rys. 20) o mocy generatora 40 wat i częstotliwości 18—22 kHz.

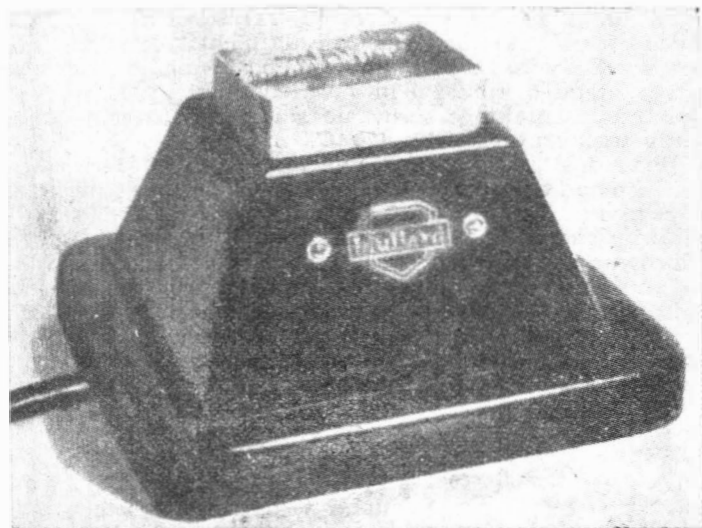
Łączenie mniejszych detali można przeprowadzać przez zanurzenie ich w wannę z płynnym lutowiem. Wymiary



wanny są ograniczone mocą generatora wysokiej częstotliwości. Dane gabarytowe generatora określa się wychodząc z ekonomicznych rozważań oraz wymiarów konstrukcji podlegających cynowaniu. Magnetostrykcyjny wibrator na częstotliwość 22 kHz winien być wzbudzany prądem wysokiej częstotliwości o natężeniu  $5 \frac{\text{wat}}{\text{cm}^2}$  powierzchni obrabianej.

Jako źródło ultradźwiękowych drgań może być użyty magnetostryktor zwykłego ultradźwiękowego palnika, z którego zdjęto końcówkę. Na rys. 21 pokazana jest wanna lutownicza o mocy 250 wat. Dla wzbudzenia ultradźwiękowych drgań użyty został wzbudnik magnetostrykcyjny przylutowany do dna wanny, która służy jednocześnie jako izolacja od zetknięcia z lutowiem. Specjalny grzejnik włącza się tylko dla początkowego roztopienia lutowia. Ciepło potrzebne do utrzymania lutowia w stanie roztopionym pokrywane jest z ciepła wydzielającego się we wzbudniku w czasie jego pracy i z rozpraszania się energii drgań ultradźwiękowych w wannie. Wanna lutownicza ze stale włączonym wzbudnikiem winna mieć ograniczone gabaryty, w wyniku czego wielkości zbiornika i ilości stosowanego lutowia nie można zwiększyć bez zwiększenia mocy wzbudnika.

Najbardziej intensywną kawitację otrzymujemy w wannie w bezpośredniej bliskości wzbudnika. Magnetostrykcyjne wzbudniki mają zwykle płaszczyznę promieniującą, która wysyła ultradźwiękowe drgania w postaci wiązki reflektorowej rozprzestrzeniającej się podobnie do wiązki światła.



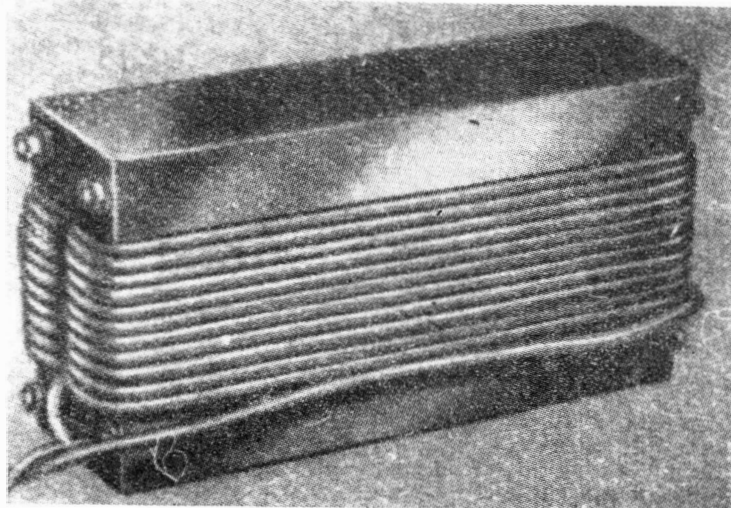
Rys. 21. Wanna lutownicza o mocy 250 wat

Oczyszczany i cynowany przedmiot umieszcza się w bezpośredniej bliskości wzbudnika. Potrzeba wtedy mniej czasu na oczyszczenie powierzchni. Czas potrzebny do obróbki wynosi zwykle 3—30 sekund.

Za granicą produkowanych jest kilka typów wanien lutowniczych. W Związku Radzieckim wyprodukowano ultradźwiękową wannę pod nazwą UP-31 na częstotliwość 18—22 kHz i mocy 250 wat. Wymiary wanny w mm wynoszą 245 X 350 X 370.

Duże gabaryty wzbudnika nie mają praktycznego znaczenia, dlatego że moc na jednostkę powierzchni winna być na takim poziomie, aby wystąpiła kawitacja. Przy dużych powierzchniach wymaga to generatorów wysokiej częstotliwości o dużej mocy. Na rys. 22 i 23 pokazany jest wzbudnik magnetostrykcyjny o mocy 1 kW, na częstotliwość 25 kHz zasilany z sześciolampowego generatora, stosowany przy nakładaniu pokryć metalicznych za pomocą ultradźwięku. Dla uzyskania większej płaszczyzny promieniującej można ustawiać równolegle obok siebie kilka takich wibratorów. Wzbudnik ten pracuje całkowicie zanurzony w lutowiu. Przewody jego izolowane są włóknem szklanym. Tego typu wzbudniki są bardzo kosztowne i stosowane do specjalnych celów.

Dlatego gdy trzeba lutować duże powierzchnie stosuje się wzbudniki o mniejszej mocy, ale wystarczającej do wytworzenia kawitacji, które można przesuwać nad obrabianą powierzchnią. Wzbudnik tego typu pokazany jest na rys. 24.



Rys. 22. Wzbudnik magnetostrykcyjny o mocy 1 kW — pracuje zanurzony w wannie lutowniczej

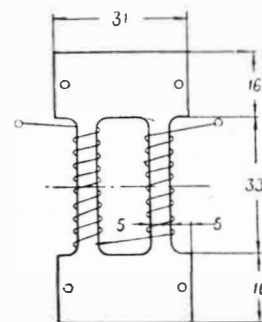
Koniec stożkowego koncentratora wystaje za przegrodą diafragmy, spełniającej rolę węzłowego utwierdzenia i izolującej wzbudnik od roztopionego metalu. Pozostałe ściany osłonięte są stalową osłoną z rączką do przemieszczania wzbudnika.

Powierzchnie, które nie podlegają cynowaniu w ultradźwiękowej wannie, uprzednio anoduje się lub fosfatyzuje.

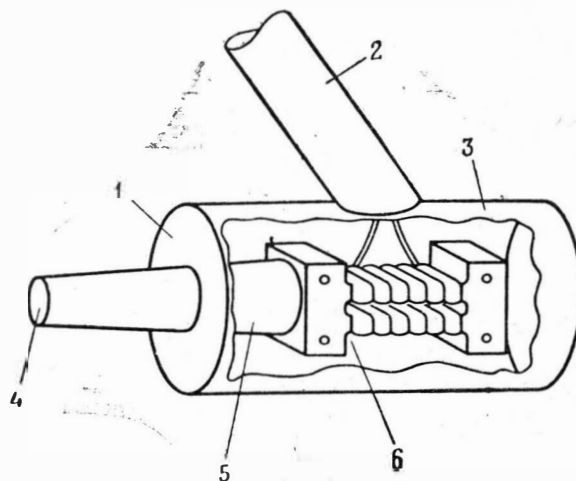
Cynowanie w ultradźwiękowej wannie jest ekonomiczniejsze niż łączenie za pomocą palnika i zapewnia bardzo wysoką jakość lutowanych szwów. Ultradźwiękowe wanny dobrze się opłacają przy dłuższej pracy. Niektóre z nich amortyzują włożone koszty już po kilku miesiącach. Nową metodą ma oczywiste zalety dzięki ekonomii siły roboczej, zmniejszeniu braków i podwyższeniu jakości lutowania.

Metoda ta ma jednak kilka ujemnych cech. Należą do nich:

- 1) stosunkowo złożona elektroniczna aparatura,
- 2) szybkie zużywanie się niektórych detali palników i wanien lutowniczych.
- 3) niemożność cynowania bardzo cienkich blach,
- 4) szybkie występowanie u pracownika uczucia zmęczenia na skutek silnego szumu towarzyszącego procesowi lutowania.



Rys. 23. Wymiary wzbudnika z rys. 22



Rys. 24. Wzbudnik ultradźwiękowy dla miejscowego łączenia w zwykłych wannach lutowniczych; 1 — przepona stalowa będąca jednocześnie węzłowym utwierdzeniem; 2 — uchwyt; 3 — osłona stalowa; 4 — powierzchnia robocza wzbudnika; 5 — stalowy stożkowy koncentrator; 6 — wzbudnik zbudowany z cienkich blach

Lutowanie za pomocą ultradźwięków nie wyszło u nas jeszcze niestety z fazy prób przemysłowych, aczkolwiek za granicą jest szeroko stosowane. Doświadczenia uzyskane w innych krajach przy przemysłowym wykorzystaniu tej metody wykazują jej celowość.

### ZASTOSOWANIE LutowANIA ALUMINIUM

Lutowane połączenia ze stopów aluminium otrzymywano początkowo metodą nacierania za pomocą łatwotopliwych lutowii. Lutowanie aluminium, jako metoda uzyskiwania nierozłącznych połączeń, rozwinęło się na początku XX wieku, gdy zastosowano topniki z chlorków metali.

Mała odporność na korozję połączeń lutowanych za pomocą topników ograniczała rozwój lutowania z zastosowaniem topników. Gazowe spawanie aluminium i jego stopów wyparło stosowanie lutowanych połączeń. Gazowe spawanie aluminium zapewniło większą wytrzymałość i lepszą odporność na korozję niż przy lutowaniu, chociaż przy spawaniu stosuje się te same topniki co przy lutowaniu.

Mimo tej przewagi spawania lutowanie nie zostało wyparte, a w ostatnich latach znacznie się rozwinęło.

Zastosowanie lutowania zamiast spawania jest celowe przy wykonywaniu złożonych konstrukcji, które nie mogą być łączone za pomocą spawania, a także konstrukcje, w których zachodzi konieczność łączenia detali o dużej różnicy grubości, na przykład przy łączeniu konstrukcji blaszanych z masywnymi odlewami lub odkuwkami oraz wyrobów z cienkich blach. W stosunku do wyrobów z blach aluminiowych celowe jest stosowanie blach platerowanych lutowiem.

Niektóre detale skomplikowanych konstrukcji nie mogą być łączone za pomocą spawania, na przykład: falowody, różne detale urządzeń elektrycznych i radiowych, konstrukcje ulowe, części chłodnic i wymienników ciepła, detale urządzeń klimatyzacyjnych, zbiorniki paliwa, części samolotowe itp. wyroby.

Szczególnie duże zastosowanie znajduje lutowanie w przemyśle elektrotechnicznym. Zastąpienie miedzi przez aluminium pozwala otrzymać lekkie i niedrogie konstrukcje z dobrymi elektrycznymi właściwościami. Otrzymanie dobrego elektrycznego styku jest problemem, którego nie można rozwiązać za pomocą mocujących kontaktów i innych mechanicznych sposobów.

Tabela 11

Zakres wytrzymałości spawanych połączeń ze stopów Al (blacha grubości 1,5 mm)

Spawany stop	Materiał wypełniający	Zakres wytrzymałości spawanego połączenia w KG/mm <sup>2</sup>	Uwagi
AMc AMg3 AMg6T	AMc AMg3 AMg6T	9—11 17—18 32—34	} Zniszczenie w podstawowym materiale
D16T D20T	B61 D20	30—33 28—32	

Sposób lutowania ultradźwiękiem znajduje między innymi duże zastosowanie w odlewnictwie przy usuwaniu powierzchniowych wad odlewów, wytwarzaniu i modyfikacji modelek odlewniczych (zmiana wymiarów modeli przez napawanie), oraz w remoncie i naprawach. Zastosowanie ultradźwięków pozwala uprościć i ulepszyć istniejące metody pokryć metali.

Różnorodność metod lutowania zwiększa możliwości zastosowania lutowania aluminium i jego stopów. Skomplikowane zestawy z wielu niedostępnymi złączami, wykonane z materiałów o różnej grubości, łączyć można w ciągu jednej operacji przez lutowanie piecowe i zanurzeniowe. Szerokie nowe zastosowanie znajdują niedawno opracowane metody lutowania: lutowanie przez zanurzenie, lutowanie beztopnikowe przy zastosowaniu specjalnego lutowia oraz ultradźwiękowe.

W tabeli 10 przedstawiono wytrzymałość na ścinanie lutowanych na zakładkę połączeń dla niektórych stopów aluminiowych. Próbkę z blachy o grubości 1,5 mm lutowano w piecu w ciągu 5 min. Po lutowaniu próbki ochłodzono na powietrzu, a niektóre sztucznie starzono w ciągu 8—10 godz przy temperaturze 160—170 °C.

Przy dostatecznie dużej wielkości zakładki ścięcie połączenia zachodzi w materiale podstawowym, jednocześnie z lutowanym szwem. Ma tutaj miejsce ciekawe zjawisko. Zwykle główny metal w miejscu połączenia jest pokryty lutowiem. Porównanie wytrzymałości i kąta zagięcia próbek z głównego materiału podlegającego termicznemu cyklowi lutowania oraz próbek z tego samego materiału pokrytych (pobielonych) lutowiem (przy lutowaniu w piecu) wykazuje znaczną różnicę wytrzymałości. Tak na przykład ze stopu AMg6T z pokrytą lutowiem powierzchnią przy rozrywaniu mają wytrzymałość nie większą niż 21 KG/mm<sup>2</sup>, a te same próbki po dane termicznej obróbce wykazują wytrzymałość do 32 KG/mm<sup>2</sup>.

Zwłaszcza duża jest ta różnica w przypadku, gdy lutowie silnie rozpuszcza główny metal. Jest to szczególnie godne uwagi w przypadku lutowii cynkowych mających wysokie właściwości rozpuszczające w stosunku do stopów aluminium. Dlatego lutowanie za pomocą tego typu lutowii winno zachodzić szybko i bez rozplywania się lutowia w miejsce połączenia. W celu zapobieżenia temu stosuje się specjalną pastę składającą się ze szkła wodnego i kredy lub oleju maszynowego i grafitu.

Do tej pory nie wyjaśniono wpływu pobielania na właściwości głównego materiału przy temperaturach niższych od temperatury krystalizacji lutowia.

Jeśli przy zastosowaniu różnorodnych lutowii (jak np. w przypadku stopu D20) otrzymano jednakową wytrzymałość, należy zastosować lutowanie w niższej temperaturze topliwości i zwrócić uwagę na silne nadtopienie i defuzję wewnętrzną materiałów połączenia.

Należy zaznaczyć, że mechaniczne właściwości lutowanych połączeń oprócz kombinacji głównego metalu

Tabela 10

Zakres wytrzymałości lutowanych połączeń dla niektórych stopów Al

Stop	Lutowie	Robocza temp. lutow. w °C	Sposób nagrzania	Stan po lutowaniu	Zakres wytrzymałości lutow. połąc. w KG/mm <sup>2</sup>	Uwagi
AMc	eutektyczny silumin	590—610	w piecu	—	9,3	Zniszczenie w głównym materiale jednocześnie z zakładką
	eutektyczny silumin	590—610	lampą lutowniczą	—	9,2	
D16T	34A	535—550	lampą lutowniczą	naturalne starzenie (5 dni)	20	
	B62	500—510	lampą lutowniczą	—	25,1	
	B62	500—510	w piecu elektrycznym	—	27	
D20	34A	~550	lampą lutowniczą	sztuczne starzenie 8—10 godz. przy 160—170°	20,4	
	B62	500—510	lampą lutowniczą	—	23,8	
	B62	500—510	w piecu elektrycznym	—	28,8	
	34A	353—540	w piecu elektrycznym	—	25,5	
AMg-6T	B63	490—510	lampą lutowniczą	—	17,1	
	B63	490—510	w piecu elektrycznym	—	25,3	
D16T	ZnAlCu	380—420	lampą lutowniczą, topnik φ 320 A	naturalne starzenie (3 doby)	26,0	Zniszczenie w głównym materiale jednocześnie z zakładką

z lutowiem i topnikiem zależą od całego szeregu czynników technologicznych, jak wpływ kwalifikacji pracownika, regulacji temperatury lutowania, czystości łączonych powierzchni, wpływu topnika na mechaniczne właściwości struktury połączenia oraz technologicznych metod lutowania.

Dla porównania w tab. 11 przedstawiono zakres wytrzymałości łączonych na zakładkę spawanych połączeń dla niektórych stopów aluminium. Z porównania danych w tab. 10 z odpowiednimi danymi w tab. 11 widoczna jest nieco mniejsza wytrzymałość połączeń lutowanych w stosunku do spawanych. Można to tłumaczyć dwiema przyczynami:

- 1) fizyczno-chemicznym wpływem pobielania lutowiem na główny metal,
- 2) mniej intensywnym i bardziej długotrwałym nagraniem podstawowego metalu podczas lutowania.

Pewność i trwałość połączeń z aluminium i jego stopów, zwłaszcza lutowanych łatwotopliwymi lutowiami, zależą od korozyjnej odporności lutowia i od przyczepności lutowia do lutowanego metalu. Lutowia, w których skład wchodzi metale słabo rozpuszczające się w aluminium (Sn, Pb, Cd), tworzą lutowane szwy słabo powiązane z podstawowym materiałem. Prawdopodobnie wobec niskiej temperatury lutowania w ciągu niedługiego ułamka czasu, w którym płynne lutowie kontaktuje z lutowanym metalem, nie zdążyły zajść w stopniu wystarczającym procesy dyfuzji i tworzą się niezbyt trwałe połączenia. Znane są wypadki zniszczenia połączeń po upływie dłuższego okresu czasu (około roku od chwili lutowania) pod wpływem działania stosunkowo małych i zupełnie przypadkowych sił. Żadnych śladów korozji przy tym nie zauważono. Zjawisko to można wytłumaczyć tym, że połączenie zachodzące w czasie lutowania było mało wytrzymałe i z upływem czasu na skutek wyrównywania się wewnętrznych naprężeń w lutowanym szwie zostało naruszone. Dodatek srebra w niskotemperaturowych lutowiach w pewnym stopniu zwiększa wytrzymałość i trwałość połączeń.

Ogólnie, przy niskotemperaturowych lutowiacz uzyskuje się słabe połączenia. Zakres wytrzymałości zakładkowych połączeń z aluminium przy lutowaniu nacieraniem łatwotopliwymi lutowiami wynosi 2—5 kG/mm. Przy lutowaniu metodą ultradźwięków jest nieco wyższy.

W przypadku lutowii miękkich rola ich polega głównie na uszczelnieniu i scaleniu danego zestawu. Ten rodzaj lutowania jest dopuszczalny w mniej odpowiedzialnych połączeniach, nie przenoszących dużych naprężeń i nie pracujących w aktywnych środowiskach korozyjnych; nie jest on również zalecany do lutowania łatwotopliwymi lutowiami aluminiowych naczyń kuchennych i zasobników do przechowywania produktów żywnościowych.

Najpoważniejszym jednak problemem jest zjawisko korozji połączeń lutowanych, które w stosunku do lutowania miękkiego nie zostało dotychczas w sposób zadowalający opanowane, co powoduje znaczne ograniczenie w możliwościach stosowania tej metody.

Przy wprowadzeniu cynku do lutowii procesy dyfuzyjne między nim a lutowanym stopem wzmacniają się i lutowane połączenia stają się bardziej stabilne. Sprzyja temu prawdopodobnie podwyższona temperatura lutowania, przyspieszająca procesy dyfuzji.

Lutowia oparte na cynku dają połączenia bardzo wytrzymałe, a odporność na korozję w atmosferycznych warunkach zadowalająca.

## LUTOWANIE ALUMINIUM Z INNYMI METALAMI

Bezpośrednie lutowanie aluminium z innymi metalami odznacza się tym, że oprócz doboru lutowia należy dobrać odpowiedni topnik działający aktywnie na ich tlenki. Dobór ten jest bardzo skomplikowany. Lutowanie różnych metali upraszcza się przy cynowaniu lub pokryciu jednego lub obu łączonych metali takimi metalicznymi warstwami, że dla ich lutowania można łatwo dobrać odpowiednie lutowie i topnik. Sposób ten nosi nazwę lutowania pośredniego.

Za pomocą łatwotopliwych lutowii można lutować aluminium z wielu metalami i ich stopami, stosując metodę nacierania lub za pomocą topników z chlorków i fluorków metali oraz topników organicznych.

Z innymi metalami, takimi jak żelazo, miedź, stopy miedzi i niklu, aluminium można lutować po uprzednim pokryciu go elektrolitycznie miedzią, srebrem, cynkiem, po chemicznym nikiowaniu lub przy pocynowaniu łatwotopliwymi lutowiami. Te same zabiegi oraz dodatkowe zanurzenie w płynnym aluminium lub cynku stosuje się w stosunku do

Tabela 12  
Lutowanie aluminium z innymi metalami

Metal lub stop łączony z aluminium	Lutowność	Uwagi
Stopy żelaza	A	Najlepsze rezultaty osiąga się przez elektro-galwanizowanie, pokrywanie za pomocą aluminium części żelaznych lub cynowanie ultradźwiękowe
Nikiel, inconel	A	Można lutować pośrednio lub uprzednio pokryć aluminium
Tytan, kovar	A	Części przed lutowaniem pokrywać aluminium
Beryl	B	Można lutować pośrednio
Monel	B	Można lutować pośrednio, lecz może wystąpić kruchość
Miedź, mosiądz	C	Trudne, wymaga specjalnych technik dla uniknięcia kruchości; może być użyta stalowa warstwa przejściowa
Magnez	D	Nie nadaje się, za kruchy

Wskaźniki lutownicze jak w tabeli 4\*  
Źródło: Brazing Alcoa Aluminium

stali. Lutowanie pokrytych w ten sposób powierzchni przeprowadza się za pomocą zwykle stosowanych lutowii i odpowiednich topników.

Połączenia między aluminium i miedzią mają mniejszą wytrzymałość na ścinanie z powodu kruchego międzymetalicznego przejścia między miedzią i aluminium. Na granicy miedzi i aluminium tworzy się łatwotopliwa eutektyka Al—CuAl<sub>2</sub>, o temperaturze topliwości 550°. Podobne międzymetaliczne związki tworzą się między lutowiem cynkowym i innymi metalami, jak na przykład stałą, chociaż utrata wytrzymałości jest mniejsza niż w związkach z miedzią. Ta międzymetaliczna warstwa tworzy się i narasta ze wzrostem temperatury i czasu lutowania. Z tego względu parametry te powinny być jak najmniejsze.

Przedział wytrzymałości połączeń aluminium ze stałą wynosi 6—10 kG/mm<sup>2</sup>, a aluminium z miedzią 4—5,5 kG/mm<sup>2</sup>.

Wytrzymałość połączeń aluminium z miedzią można zwiększyć po uprzednim pokryciu miedzi metalami nie tworzącymi z aluminium kruchych międzymetalicznych związków, na przykład Ni, Ag, Zn.

Do tej pory jest praktycznie niemożliwe bezpośrednie lutowanie z aluminium takich metali, jak magnez, cyrkon, niob, tantal, chrom, molibden i wolfram. Dla stworzenia możliwości ich lutowania konieczne są dalsze badania w dziedzinie metalurgii lutowii.

## ZAKOŃCZENIE

Okazuje się, że lutowanie aluminium i jego stopów jest całkowicie celowe i daje połączenia odznaczające się wysokimi właściwościami mechanicznymi i dobrą odpornością na korozję, zakładając, że użyte zostały odpowiednie topniki, lutowia i że zachowano właściwy tok postępowania. Bogaty wybór metod zwiększa możliwości zastosowania lutowania aluminium.

Wybór metody lutowania zależy od kształtu zestawu, konstrukcji połączenia, przeznaczenia lutowanych części oraz dostępności i ekonomiczności poszczególnych metod. Szczególnie zalecane są twarde sposoby lutowania.

Lutowanie aluminium należy traktować jako uzupełnienie spawania, zwłaszcza w tych przypadkach, gdy zastosowanie spawania jest niemożliwe lub niecelowe.

\* Tabela 4 zamieszczona została w I części artyk. w nr 1/60 Techn. Lot.

## LITERATURA

1. Referativnyj Żurnal — Metalurgia 1957, 1958, 1959
2. N. F. Laszko, S. W. Laszko-Awakjan — Pajka Metalow — Masz-giz, Moskwa 1959
3. Technische Rundschau, 1957 nr 1—2, 1958 nr 21, 19, 21
4. Landtechnik, 1957 nr 7
5. Metalloberfläche, 1956 nr 10
6. Brocker, Beatson — Industrial Brazing — London, 1953
7. R. E. Crawford — Ultrasonic Engineering — London, 1955
8. Light Metal, 1956 nr 216
9. Weld. Engineer, 1957 nr 9, 1956 nr 9
10. Steel, 1957 nr 17
11. Weld. Journal, 1957, nr 10
12. Modern Metals, 1957 nr 10
13. Bell Labs. Record, 1957 nr 11, 1958 nr 5
14. Light Metal Age, 1958 nr 1—2
15. West. Metalwork, 1958 nr 1
16. Lewis — Lutowanie miękkie — P.W.T., 1951



Inż. A. J. TIESLENKO  
Moskwa, ZSRR

## Oblodzenie silników odrzutowych

Rozwój lotnictwa, duży wzrost prędkości, konieczność lotów na duże odległości w każdych warunkach meteorologicznych i klimatycznych ujawniły nowe trudności związane z problemem właściwego zabezpieczenia silników odrzutowych przed oblodzeniem.

Mozna uważać za pewne, że jeśli zagadnienie walki z oblodzeniem nie zostanie rozwiązane, to w sprzyjających warunkach meteorologicznych nie będzie możliwe uniknąć oblodzenia. W lotnictwie szybkim zagadnienie walki z oblodzeniem przybrało bardziej ostre formy z powodu nowo powstałych problemów specjalnych.

W ostatnich latach pojawiły się w publikacjach wiadomości o tym, że ciepłe instalacje przeciwooblodzeniowe, które do ostatniej chwili spełniały wszelkie wymagania, w pewnych warunkach zaczęły powodować oblodzenie.

W eksploatacji zaczęto obserwować przypadki niebezpiecznego oblodzenia szybkich samolotów w czasie lotów w chmurach pierzasto-warstwowych na wysokościach od 9 do 14 km, przy temperaturze otoczenia  $-50^{\circ}\text{C}$ ... $-65^{\circ}\text{C}$ . Zjawisko to obserwowano też w podobnych warunkach w czasie lotów w pozornie bezchmurnym powietrzu. Stwierdzono duże niezgodności zaobserwowane w eksploatacji w czasie szybkich lotów na dużych wysokościach przez krystaliczne chmury, w strefach z klimatem tropikalnym lub bardzo zbliżonym do tropikalnego, gdzie z powodu silnego nagrzania powierzchni ziemi zawsze występują mocne ruchy pionowe mas powietrza z bardzo dużą zawartością wilgoci na ogromnych obszarach. Przypadki takie wskazują, że w czasie lotów na dużych wysokościach i z dużymi prędkościami warunki oblodzenia pod względem jakości są zupełnie inne.

Nasze więc pojęcie o tym, jakie warunki są niebezpieczne pod względem oblodzenia, należy uzupełnić. Prócz tego należy wskazać środki, jakie niezbędne jest przedsięwziąć w tej sprawie, oraz jakie zadania należy rozwiązać w najbliższym czasie dla całkowitego zapewnienia bezpieczeństwa silników odrzutowych w dowolnych sprzyjających warunkach meteorologicznych.

Oblodzenie silników odrzutowych polega na powstawaniu warstw lodu na niektórych powierzchniach wlotowego kanału silnika. Wiadomo jest, że oblodzenie możliwe jest w różnorodnych warunkach eksploatacji zespołu silnikowego, jeśli istnieją sprzyjające warunki meteorologiczne. Przy przepływie powietrza w kanale wlotowym silnika zawiesiny kropel wody albo kryształki lodu cięższe od powietrza mają tendencję poruszania się z powodu bezwładności po torach bardziej zbliżonych do prostoliniowych, dlatego jakiegokolwiek odchylenie strumienia powietrza powoduje zderzenie się kropelek wody lub kryształków lodu z powierzchniami odchylającymi strumień, co staje się przyczyną osadzania się lodu; silniejsze odchylenie strumienia powietrza powoduje również bardziej aktywne osadzanie lodu.

Nieznaczne osady w postaci śniegu lub szronu nie należy uważać za oblodzenie, nie są one bowiem niebezpieczne dla silnika.

Na powierzchniach wlotowego kanału silnika mogą zaistnieć następujące zasadnicze rodzaje oblodzenia:

Krótkotrwałe oblodzenie — występuje na powierzchniach wlotowego kanału silnika, mającego temperaturę poniżej  $0^{\circ}\text{C}$ , przy wejściu w strefę powietrza zawierającego wodę w stanie płynnym kropelowym o temperaturze powyżej  $0^{\circ}\text{C}$ ; jeśli woda ta znajduje się w powietrzu w postaci bardzo drobnych kropli, to na powierzchniach podlegających oblodzeniu powstaje biały lód; w przypadku deszczu powstają przezroczyste warstwy lodu. W obu tych przypadkach powierzchnie wlotowego kanału silnika podlegają cieplnemu oddziaływaniu strumienia powietrza; ten rodzaj oblodzenia kończy się zazwyczaj szybko, a lód, który zdążył się utworzyć — topi się.

Długotrwałe oblodzenie — występuje na powierzchniach wlotowego kanału silnika w przypadku lotu w atmosferze o temperaturze poniżej  $+3^{\circ}\text{C}$ ... $+5^{\circ}\text{C}$  w obecności w powietrzu przechłodzonej wody (chmury, mgły, przechłodzony deszcz). Zetknięcie się kropelek wody z powierzchnią wlotowego kanału silnika lub z już powstałą warstwą lodu na tej powierzchni przerywa stan przechłodzenia kropelek,

które zamieniają się w lód. Powoduje to powstawanie warstw lodu lub zwiększenie już istniejących warstw. W przypadku istnienia w powietrzu kryształków lodu proces oblodzenia ma inny charakter.

Przypadek długotrwałego oblodzenia jest bardziej niebezpieczny i wymaga dla ochrony przed oblodzeniem odpowiedniego działania instalacji przeciwooblodzeniowej.

Ten rodzaj oblodzenia może występować o dowolnej porze roku, tak latem, jak i zimą, i na różnych wysokościach. Występowanie oblodzenia może zachodzić w różnych stanach pracy silników odrzutowych.

Przy uruchamianiu silników, jeśli temperatura otaczającego powietrza jest poniżej  $0^{\circ}\text{C}$ , powierzchnie kanałów wlotowych mają też temperaturę poniżej  $0^{\circ}\text{C}$  i coraz więcej ochładzają się strumieniem powietrza płynącym przez kanał. Jeśli w powietrzu znajduje się przechłodzona woda (w postaci drobnokropliczej zawiesiny lub przechłodzonego deszczu), to nawet w obecności ciepłej instalacji przeciwooblodzeniowej na powierzchniach tych pojawia się osadzanie lodu, ponieważ same powierzchnie na początku rozruchu nie zdążą się nagrzać, gdy zaczyna się ich oblodzenie. Oblodzenie to może przestać występować tylko po dostatecznym nagrzaniu powierzchni. Dlatego też ten przejściowy stan od momentu naciśnięcia przycisku „rozruch” winien przejść w możliwie najkrótszym odstępie czasu. Jeśli instalacja przeciwooblodzeniowa nie zapewni wystarczającego ogrzania powierzchni w fazie pracy na małym gazie, to przy przejściu na obroty małego gazu i przy odpowiednio długim czasie pracy przy tym stanie oblodzenie nie tylko nie ustąpi, lecz na odwrót jeszcze zwiększy się. Przypadek taki spotyka się najczęściej na silnikach mających nie regulowaną instalację przeciwooblodzeniową powietrzno-cieplną z poborem powietrza za sprężarką: w czasie pracy na małym gazie energia cieplna powietrza pobieranego za sprężarką jest jeszcze niewystarczająca do potrzebnego ogrzania powierzchni. Są to przyczyny powodujące często wprowadzenie chwilowego ograniczenia pracy silnika na małym gazie i w stanach zbliżonych. W czasie pracy silnika na większych obrotach instalacja taka przy określonych warunkach może zapewnić całkowite zabezpieczenie przed oblodzeniem, lecz na dużych obrotach występuje zbyt duże zużycie powietrza instalacji przeciwooblodzeniowej.

Równoczesne wystąpienie warunków sprzyjających oblodzeniu może wystąpić i w innych stanach pracy silnika i oblodzenie może być też obserwowane w czasie pracy silnika odpowiadającej startowi, lądowaniu, lotowi poziomemu a czasem i przy pracy silnika w warunkach na ziemi (próba na hamowni).

Dla elektryczno-cieplnych instalacji przeciwooblodzeniowych silników odrzutowych stan pracy silnika przy dużym obciążeniu (na przykład odpowiadający startowi) okazuje się krytyczny pod względem możliwości oblodzenia i w pewnych warunkach ten typ instalacji nie może zapewnić całkowitego zabezpieczenia silnika przed oblodzeniem.

W silnikach odrzutowych podlegają oblodzeniu w kanale wlotowym: owiewka brzegowa, podpory korpusu, łopatki pracujące pierwszego stopnia sprężarki, łopatki kierownic wlotowe lub pierwszego stopnia i inne. Powierzchnie kanału wlotowego nie mające występow w strumieniu lub nie zmieniające kierunku przepływu strumienia zazwyczaj nie podlegają oblodzeniu. Wszelkie powierzchnie wystające w przepływający strumień oraz rowki poprzeczne, wypukłości i wgłębienia są ośrodkami osadzania się lodu. Największe niebezpieczeństwo pod względem oblodzenia wykazują czołowe krawędzie owiewek wlotowych, słupków i łopatek; powierzchnie te winny być w sposób niezawodny w pierwszej kolejności zabezpieczone przed oblodzeniem.

Należy zaznaczyć, że powstawanie lodu na powierzchniach podlegających oblodzeniu jest procesem stopniowo wzrastającym, a nie krótkim, lecz po osiągnięciu niebezpiecznych wymiarów warstw lodu może nastąpić wypadek — lód może oderwać się i wpaść do silnika, przy czym zjawisko to występuje nagle.

Na niebezpieczeństwo to narażone są specjalnie silniki odrzutowe ze sprężarkami osiowymi. Powstawanie warstw



łodu na łopatkach sprężarki i na innych częściach wlotowego kanału silnika powoduje zmniejszenie ilości przepływającego przez sprężarkę powietrza, obniżenie sprawności silnika i wahania pracy silnika. Prócz tego powstanie lodu na pracujących łopatkach lub na obracającej się owiewce powoduje powstawanie niewyważenia. Na przykład przy asymetrycznym obciążeniu łopatek może wystąpić następujące niewyważenie: w przypadku pojawienia się warstwy lodu o ciężarze 1 G na średnim promieniu  $R = 35$  cm, przy prędkości obrotowej  $n = 5000$  obr/min wystąpi dość znaczna siła niewyważona.

Siłę odśrodkową wyznacza się z równania:

$$F = m\omega^2 R$$

gdzie masa

$$m = \frac{10^{-3}}{9,81} \text{ kG} \cdot \text{sek}^2/\text{m}$$

promień

$$R = 35 \cdot 10^{-2} = 0,35 \text{ m}$$

prędkość kątowna

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5000}{60} = 523,5 \text{ rad./sek}$$

Stąd

$$F = 10 \text{ kG.}$$

Przykład ten wskazuje, że należy użyć wszelkich środków dla uniknięcia powstawania lodu albo konieczne będzie wprowadzić szereg ograniczeń w eksploatacji silników.

Niektóre silniki odrzutowe mają obracającą się owiewkę umieszczoną przed pierwszym stopniem sprężarki. Mimo że zjawisko występowania sił odśrodkowych na takiej owiewce jest znacznie mniejsze aniżeli na łopatkach sprężarki, to niebezpieczeństwo powstawania lodu na owiewce z wszelkimi wynikającymi stąd następstwami (niewyważenie, oderwanie odłamków lodu itp.) jest bardzo duże. Na nieruchomej owiewce i innych nieruchomych powierzchniach niebezpieczeństwo takie jest jeszcze większe. Na przykład w czasie badań silnika odrzutowego Junkers — Jumo 004 w tunelu aerodynamicznym w Centrum Badań Lotniczych w Kanadzie oberwał się ze stożka wlotowego odłamek lodu o ciężarze 1,5...3 kG, powodując poważne uszkodzenie sprężarki. Należy zaznaczyć, że na obracających się powierzchniach kanału wlotowego, po osiągnięciu pewnej zupełnie określonej dla każdego silnika liczby obrotów wirnika sprężarki, oblodzenie przestaje występować dzięki zjawisku sił odśrodkowych (gdy wielkość sił odśrodkowych przewyższa siły przyczepności lodu do powierzchni) oraz podgrzaniu od samego silnika. Na łopatkach prostujących pierwszego stopnia sprężarki, po osiągnięciu stanu samoczynnego ogrzania się, zjawisko oblodzenia też przestaje występować (dzięki sprężeniu strumienia powietrza na pierwszym stopniu sprężarki przy wyraźnie określonej dla każdego silnika liczbie obrotów wirnika sprężarki).

Zazwyczaj uważa się, że warunki meteorologiczne sprzyjające powstawaniu oblodzenia polegają na zaistnieniu przechłodzonych kropel wody, zawieszonych w powietrzu; za najbardziej niebezpieczny należy uważać przypadek oblodzenia w przechłodzonym deszczu. Zakres temperatur, w którym najczęściej występują przypadki oblodzenia, leży w granicach  $0^\circ \dots -12^\circ \text{C}$ , chociaż obserwuje się przypadki oblodzenia i przy niższych temperaturach (1, 3, 4, 6, 9). Przechłodzona woda utrzymuje się w chmurach w postaci zawiesiny plynno-kropelowej przy temperaturach do  $-12^\circ \text{C}$  i znacznie rzadziej przy jeszcze niższych temperaturach (2, 5, 8).

Należy również zwrócić uwagę i na następującą sprawę: w kanale wlotowym silnika często występuje rozszerzenie powietrza, dlatego zjawisko oblodzenia powierzchni wlotowego kanału silnika może występować przy temperaturze otaczającego powietrza do  $+3^\circ \dots +5^\circ \text{C}$  (na skutek obniżenia temperatury powietrza przy jego rozszerzaniu się bezpośrednio na wlocie do silnika).

Warunki oblodzenia charakteryzują się ilością wody, zawartą w stanie kropelowej zawiesiny w jednostce objętości powietrza, zazwyczaj podaną w  $\text{G}/\text{m}^3$ . Wielkość ta nazywa się „nawodnieniem” (nie należy mylić „nawodnienia” z wilgotnością, która charakteryzuje się zawartością pary wodnej w atmosferze). Wraz z obniżeniem temperatury średnia wielkość „nawodnienia” zmniejsza się. Zasadniczym czynnikiem powodującym oblodzenie powierzchni w kanałach wlotowych silników odrzutowych jest zamrażanie przechłodzonych kropelek chmur, znajdujących się w strumieniu w kanale wlotowym i uderzających o obładzające się powierzchnie; zjawisko sublimacji nie występuje w tym przypadku (sublimacja — bezpośrednie przejście fazy gazowej wody w fazę stałą — lód, to znaczy bezpośrednie wydzielanie lodu z wilgotnego powietrza).

Zazwyczaj odróżnia się następujące rodzaje chmur: wodne, lodowe lub krystaliczne oraz mieszane. Według ostatnich obserwacji chmury lodowe istnieją w atmosferze o wiele częściej aniżeli dotychczas uważano; krystaliczne chmury warstwowe są wymiarami swymi o wiele większe od chmur wodnych, przy czym dla chmur krystalicznych typowy jest poziom ich rozmieszczenia.

Niebezpieczne pod względem oblodzenia są nie tylko chmury z zawartością przechłodzonej zawiesiny kropelek, ale i chmury z kryształków lodu, specjalnie zaś niebezpieczny jest lot przez chmury typu mieszane — zawierające przechłodzone kropelki wody i kryształki lodu (1, 3, 9). Czas istnienia chmur typu mieszane równy jest około jednej godziny; zazwyczaj w chmurze takiej przez cały czas zachodzi powstawanie kryształków lodu, do całkowitej przemiany chmury w krystaliczną. Dlatego instalacje przeciwooblodzeniowe winny być eksploatowane i opracowywane z uwzględnieniem chmur krystalicznych, spotykanych w realnych warunkach eksploatacji.

Chmura przy temperaturze na przykład około  $-12^\circ \text{C}$  składa się już w połowie do dwu trzecich z kryształków lodu (2, 8, 9), przy czym z obniżeniem temperatury ilość chmur z kryształkami lodu znacznie wzrasta i przy temperaturze  $-25^\circ \text{C}$  i niższej chmura składa się z zasady całkowicie z kryształków lodu (2, 6, 9). W chmurach górnej warstwy atmosfery oblodzenie sotyka się stosunkowo rzadko. Lecz ma to miejsce i w dolnej części chmur pierzasto-warstwowych; były przypadki silnego oblodzenia szybkich samolotów tak w pierzasto-warstwowych chmurach, jak i w bezchmurnym powietrzu na wysokości około 10...13,5 km, przy temperaturze  $-50^\circ \dots -65^\circ \text{C}$ .

We wszystkich tych przypadkach w chmurach nie było wody w jej fazie ciekłej; istniała tylko faza stała lodu — kryształki lodu. Według danych z literatury „nawodnienie” (w postaci kryształków lodu \*) takich chmur może dochodzić do  $6 \text{ G}/\text{m}^3$ , wymiar kryształków lodu do 3 mm, chociaż zasadnicza masa kryształków lodu w ilości 90...95% nie przekracza wielkości 0,15 mm. Kryształki takie spotyka się zazwyczaj na wysokości 6...9 km i wyżej, na przykład w chmurach pierzastych i pierzasto-warstwowych. Chmury tego rodzaju mogą rozpościerać się na setki kilometrów.

W zwykłych warunkach i przy zimnych powierzchniach kanału wlotowego silnika lot przez chmury z kryształkami lodu nie powoduje żadnych trudności, ponieważ kryształki lodu będą ślizgać się po powierzchni i będą znoszone napływającym strumieniem powietrza. Jeśli jednak powierzchnie te będą nagrzane do temperatury powyżej zera, to kryształki lodu przylgną do tych powierzchni, częściowo roztopią się, zwilżą te powierzchnie i następnie zamrażną na nich, jeśli ilość ciepła jest niewystarczająca dla całkowitego roztopienia kryształków lodu, by te w postaci kropelek zostały zniesione napływającym strumieniem powietrza. Częściowe lub całkowite roztopienie kryształków lodu zależne jest od stopnia ogrzania powierzchni i od wielkości temperatury otaczającego powietrza.

Nagrzanie może być wynikiem oddziaływania ciśnienia prędkości (nagrzanie kinetyczne), pracy instalacji przeciwooblodzeniowej oraz od zetknięcia się z częściami mającymi wystarczająco wysoką temperaturę w czasie pracy silnika.

Do zwalczania oblodzenia stosuje się zasadniczo dwa sposoby: usunięcie we właściwym czasie już powstałego niegroźnego lodu albo zapobieganie oblodzeniu.

Przy pierwszym sposobie stosuje się instalacje przeciwooblodzeniowe przeciwdziałające, przy drugim instalacje przeciwooblodzeniowe zapobiegające.

Dla silników odrzutowych stosuje się przeciwooblodzeniowe instalacje zapobiegające cieplne, które jak dotychczas dają najbardziej radykalne sposoby ochrony przed oblodzeniem. Wiadomo, że najczęściej używane instalacje cieplne są dwu rodzajów: powietrzne albo elektryczne. Zazwyczaj instalacje te są obliczane dla warunków pracy samej instalacji z mokrą powierzchnią dla krytycznej fazy pracy silnika pod względem oblodzenia, co robi się w celu ekonomicznego zużycia energii cieplnej; dla niekrytycznej fazy pracy silnika warunki pracy samej instalacji zmieniają się na stan pracy

\*) Można by analogicznie z „nawodnieniem” wprowadzić w tym przypadku „nalodzenie”.

z powierzchnią suchą (dla instalacji nie regulowanych). W stanie pracy z mokrą powierzchnią, powierzchnia utrzymuje się mokra, a nadmiar wilgoci znoszony jest napływającym strumieniem; w stanie pracy instalacji z suchą powierzchnią cała ilość wilgoci zostaje wyparowana, a powierzchnia utrzymuje się sucha.

W czasie lotu przez chmury krystaliczne doprowadzana ilość ciepła nawet u najdoskonalszej instalacji przeciwooblodzeniowej jest znacznie mniejsza od wymaganej w tym przypadku.

Dlatego w czasie lotu w chmurach krystalicznych, w zakresie prędkości nie zapewniających wystarczającego doprowadzenia ciepła od nagrzania kinetycznego, dla ochrony powierzchni wlotowego kanału silnika przed oblodzeniem należy na potrzebny okres wyłączyć ciepłą instalację przeciwooblodzeniową.

Ze zwiększeniem prędkości lotu (do prędkości ze skutecznym nagrzaniem kinetycznym) zwiększa się i intensywność oblodzenia (jeśli ono występuje). Dlatego też dla silników szybkich samolotów, jeśli ustalona została możliwość oblodzenia i jego stopień niebezpieczeństwa, konieczne jest zestawienie danych prędkości lotu i temperatury powietrza na trasie przelotu.

Nagrzanie powierzchni (na przedniej krawędzi profilu) przy dużych prędkościach lotu w chmurach z nawodnieniem wyznacza się zazwyczaj z zależności:

$$\Delta t \approx (0,6 \dots 0,8) \frac{v}{2010} \text{ } ^\circ\text{C}$$

gdzie  $v$  m/s — prędkość lotu.

Zwiększenie temperatury od nagrzania kinetycznego jest mniejsze w chmurach z nawodnieniem z powodu zużycia części powietrza na ogrzanie kropelek i na ich całkowite lub częściowe odparowanie.

Ze zwiększeniem wysokości lotu nagrzanie kinetyczne występuje w nieco mniejszym stopniu, przy pozostałych warunkach jednakowych.

Stopień niebezpieczeństwa oblodzenia zależy, prócz jego nasilenia, jeszcze i od czasu przebywania samolotu w warunkach meteorologicznych sprzyjających oblodzeniu.

Nasilenie oblodzenia jest proporcjonalne (dla poddźwiękowych prędkości lotu) do nawodnienia chmury, prędkości lotu (w przypadku nieistnienia oddziaływania efektu cieplnego przy nagrzaniu kinetycznym) i innych czynników oraz zależy od temperatury strumienia powietrza w kanale silnika i od ilości tej części wody, która z całej ilości wody osiadającej na powierzchni zamienia się w lód w tym samym czasie.

Dlatego też przy ocenie niebezpiecznych pod względem oblodzenia warunków meteorologicznych konieczne należy uwzględnić prędkości osiągnięte przez samolot, własności przeciążenia silnika i charakter wykonywanego lotu.

Specjalnie ważna jest ta sprawa dla silnika szybkiego samolotu, dla którego czas, od naciśnięcia przycisku „rozruch” do osiągnięcia przez samolot prędkości, przy której występuje skuteczne w stosunku do oblodzenia ogrzanie kinetyczne (warunki samoczynnego zabezpieczenia), wynosi parę minut (3, 5, 8, 10).

W tym czasie w danych warunkach nie może zaistnieć niebezpieczne powstawanie lodu (o grubości do 5...10 mm), ponieważ po osiągnięciu odpowiedniej prędkości znika ono całkowicie.

Niemożliwa jest obserwacja tworzenia się lodu na powierzchniach w kanale wlotowym silnika i nasilenia oblodzenia w locie (jeśli nie jest zabudowany specjalny peryskop), dlatego też należy dokładnie obserwować pracę silnika.

Zasadnicze oznaki oblodzenia są następujące. Tworzenie się nawarstwień lodu na żebrach i wlotowych łopatkach kierowniczych (jeśli one istnieją), na łopatkach wirnika i łopatkach prostowniczych pierwszego stopnia sprężarki i innych częściach wlotowego kanału silnika powoduje zmniejszenie ilości przepływającego powietrza, zmianę warunków opływu z powodu zmiany obrysu łopatek, zmniejszenie współczynnika sprawności i niewyważenie wirnika sprężarki. Nawet nieznaczna warstwa lodu na łopatkach sprężarki szybko pogarsza aerodynamikę ich profili.

Tego rodzaju łąwanie na wlocie powoduje zmniejszenie obrotów wirnika i kolejno zmusza do utrzymania wymaganej liczby obrotów przez zwiększenie zużycia paliwa; temperatura spalonych gazów na wlocie w turbinę i w dyszy wlotowej zaczyna przy tym wzrastać, a przy znacznym oblodzeniu szybko podnosi się do niedopuszczalnej wielkości.

Jeśli na silniku znajduje się automat ograniczający temperaturę, to silnik zostanie automatycznie zatrzymany.

Prócz zmniejszenia ilości pobieranego powietrza oblodzenie może spowodować również wahania pracy sprężarki.

Następstwem oblodzenia jest także zmniejszenie ciągu, a stąd i prędkości lotu; niejednokrotnie w takich warunkach strata prędkości powoduje stratę wysokości. Zazwyczaj nieznaczne zmniejszenie prędkości lotu wskazuje na umiarkowane oblodzenie; średnia intensywność oblodzenia w tym przypadku nie przekracza zazwyczaj narastania grubości lodu 1 mm na minutę.

Średnic najbardziej intensywne oblodzenie występuje w pewnej wspólnej grupie chmur dolnej strefy — warstwowych i warstwowo-kłębiastych (1,3 mm/min i więcej); lecz grubość strefy możliwego oblodzenia w takich chmurach jest nieduża, co daje możliwość w razie konieczności wyjścia ze strefy oblodzenia i uniknięcia niebezpiecznego oblodzenia.

Średnio minimalne nasilenie oblodzenia może występować w chmurach strefy średniej wysokości — wysokokłębiastych i wysokowarstwowych, posiadających względnie nieduże nawodnienie.

Nasilenie oblodzenia w chmurach warstwowo-deszczowych (chmury dolnej strefy) i wysokowarstwowych (chmury strefy średniej wysokości) tworzących jedną wspólną grupę jest nieznaczne (około 0,5 mm/min), ale duża grubość tej strefy oblodzenia może spowodować długotrwałe przebywanie samolotu w tych warunkach, co może doprowadzić do niebezpiecznego oblodzenia.

Chmury grupy warstwowo-kłębiaste i warstwowo-deszczowe (dolna strefa) co do wielkości nasilenia oblodzenia bliskie są grupie chmur warstwowych i warstwowo-kłębiastych (w nieco mniejszym stopniu), lecz wymiary strefy oblodzenia w tej grupie chmur są znacznie większe.

W chmurach kłębiasto-deszczowych przy odpowiedniej ich temperaturze można spodziewać się bardziej nasilonego oblodzenia, aniżeli we wszystkich omawianych przypadkach.

Maksymalne nasilenie oblodzenia w poszczególnych przypadkach może dochodzić do 5 mm/min. [lit. 7].

Do chwili osiągnięcia więc niebezpiecznej wielkości oblodzenia pozostaje pewna ilość minut na powzięcie wymaganej decyzji i jej wykonanie.

Dla silników odrzutowych nie mających bezpośrednio na wlocie nieruchomych powierzchni (owiewka obracająca się, urządzenia wlotowego kierującego brak) praca powyżej obrotów górnej granicy oblodzenia (minimalne obroty wirnika sprężarki, przy których już nie występuje oblodzenie) jest zupełnie bezpieczna w dowolnych warunkach meteorologicznych.

W uzupełnieniu podanych wiadomości należy dodać, że w czasie lotu w warunkach oblodzenia, jeśli wymagania eksploatacji silników pozwalają na to, należy zastosować możliwość zmiany prędkości lotu.

Na wykresie 1 podane są krzywe dla określenia prognozy oblodzenia dla lotu w chmurach z przechłodzonymi kroplami wody. Z wykresu tego można ustalić prawdopodobieństwo oblodzenia przez wyznaczenie punktu przecięcia się wielkości prędkości lotu i temperatury otaczającego powietrza. Z tego również wykresu wynika, że przy temperaturze  $-12^\circ\text{C}$  w czasie lotu z prędkością powyżej 800 km/h w chmurach z przechłodzonymi kroplami wody oblodzenie jest mało prawdopodobne.

Natomiast w czasie lotu w chmurach krystalicznych oblodzenie może wystąpić i przy znacznie większych prędkościach (do  $Ma = 1,2 \dots 1,4$ ). Ilość ciepła potrzebna do utrzymania powierzchni wolnej od lodu w czasie lotu przez chmury krystaliczne znacznie przewyższa ilość ciepła potrzebną dla normalnej pracy instalacji przeciwooblodzeniowej w warunkach lotu w chmurach kropelowej zawiesiny. Należy również uwzględnić istnienie odprowadzania ciepła do wnętrza opływanych części w kanale wlotowym silnika albo brak doprowadzania ciepła z wnętrza tych części do ich powierzchni. Wskazane jest znać ilość tego odprowadzenia lub doprowadzenia (na przykład, jak zmienia się temperatura powierzchni części przy doprowadzeniu ciepła lub odprowadzeniu ciepła w przypadku obniżenia się temperatury otaczającego powietrza przy danym stanie pracy silnika).

Na wykresie 2 podane są krzywe porównawcze ilości potrzebnej energii cieplnej dla zapobiegnięcia oblodzeniu w warunkach przechłodzonych kropelek lub kryształków lodu. Wykres ten sporządzony jest w wyniku badań w cylintrycznym strumieniu powietrza o średnicy 50 mm [lit. 9]. Dane te można bez większego błędu stosować i dla przednich

krawędzi oprofilowanych części znajdujących się w kanale wlotowym silnika.

W przypadku przechłodzonych kropli potrzebną ilość ciepła wyznacza się zasadniczo z temperatury otaczającego powietrza; dla kryształków lodu ilość tę wyznacza się z koncentracji kryształków w powietrzu, ponieważ w tym przypadku ilość ciepła związana jest z ciepłem utajonym topnienia lodu. Ta ilość ciepła topnienia przewyższa także ciepło nagrzania kinetycznego nawet przy dużych prędkościach lotu.

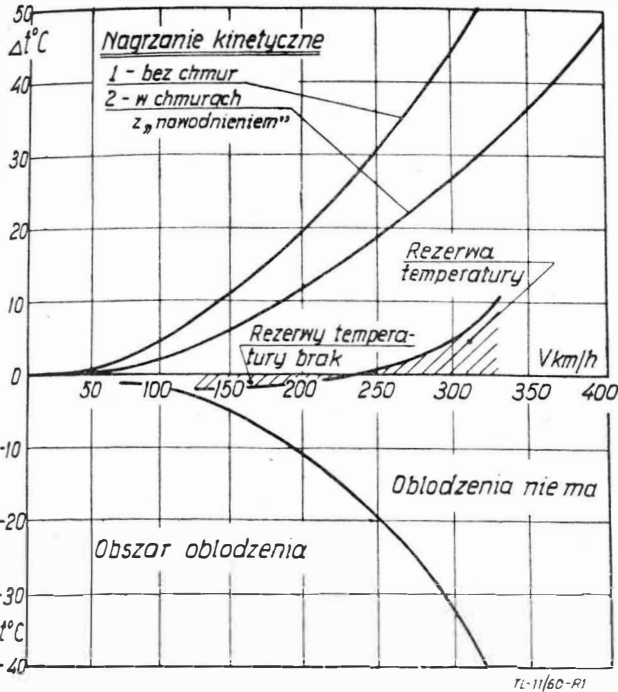
ponieważ doprowadzenie ciepła z instalacji umożliwi zwiększenie prędkości lotu o mniejszą wielkość w porównaniu do zwiększenia tej prędkości przy wyłączonej instalacji cieplnej. W takim przypadku cieplną instalację przeciwooblodzeniową można nie wyłączać; jest to specjalnie ważne w czasie lotu w chmurach typu pierzastego.

W przypadku zapobiegania oblodzeniu, jeśli dla zmniejszenia lub uniknięcia nagrzania kinetycznego pilot zdecydował zmniejszyć prędkość z powodu niemożliwości jej zwiększenia lub z powodu innych okoliczności, to cieplną instalację przeciwooblodzeniową należy wtedy wyłączyć, by wykluczyć niepotrzebne w tym przypadku doprowadzenie ciepła do powierzchni, ponieważ może to stać się przyczyną oblodzenia — gdyż ciepła wystarczy tylko na podtapianie części kryształków lodu, które następnie podtopione przymarzną do ogrzewanej powierzchni.

Po zwiększeniu prędkości z włączeniem instalacji przeciwooblodzeniowej winno nastąpić wyłączenie instalacji i zmniejszenie prędkości do ustalonej przed zwiększeniem.

W podobnych przypadkach, to znaczy w czasie lotu w chmurach krystalicznych należy uwzględnić także następujące. Na powierzchniach w kanale wlotowym silnika pojawiło się już oblodzenie, na co będzie wskazywać zmniejszenie ciągu wskutek zmniejszenia wlotu powietrza; powoduje to konieczność zwiększenia zużycia paliwa dla utrzymania wymaganej liczby obrotów wirnika, co kolejno powoduje zwiększenie temperatury gazów na wlocie do turbiny i w dyszy wylotowej. Jeśli temperatura ta pod względem wielkości zbliżyła się do granicy niedopuszczalnej, to w tym przypadku zwiększenie prędkości lotu może okazać się niemożliwe, co wymaga od pilota natychmiastowego wyjścia z niebezpiecznej strefy.

Należy zwrócić uwagę załóg latających na następujące: skutek cieplny od nagrzania kinetycznego w chmurach wodnych (i tym bardziej lodowych) jest mniejszy aniżeli w czasie lotu bez chmur (patrz wykresy 1 i 2), w następstwie czego przy wejściu samolotu w chmury z czołowych powierzchni w kanale wlotowym silnika będzie odbierana znaczna ilość ciepła. Jeśli te powierzchnie w czasie lotu poza chmurami wodnymi miały temperaturę nieznacznie wyższą od 0°C, to przy wejściu w chmurę powierzchnie te ochłodzią się i pokryją lodem. W przypadku chmury lodowej, jeśli powierzchnie te miały temperaturę znacznie powyżej 0°C w momencie wejścia w takie chmury, powierzchnie początko-



Rys. 1. Określenie prognozy oblodzenia dla lotu w chmurach z przechłodzonymi kroplami wody

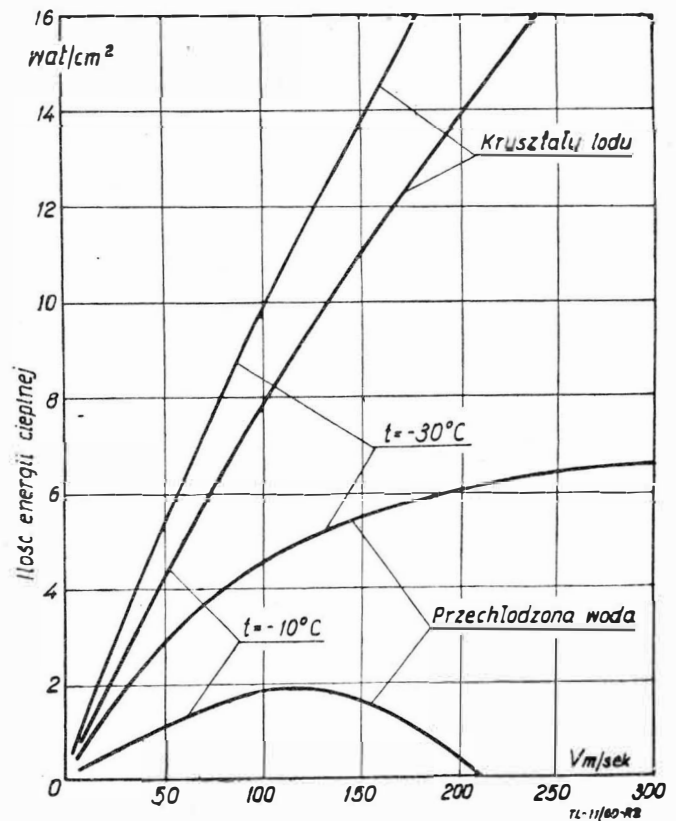
Nagrzanie kinetyczne w przypadku przechłodzonych kropelek i istnienia instalacji przeciwooblodzeniowej cieplnej można wykorzystać dla obniżenia wydatku energii cieplnej samej instalacji. Należy zwrócić uwagę i na następujące zjawisko. Powstawanie lodu z przechłodzonych kropelek powoduje wydzielenie ciepła utajonego; w połączeniu z nagrzaniem kinetycznym zjawisko to będzie przyczyniać się do osłabienia oblodzenia.

W przypadku chmur krystalicznych nawet najbardziej skuteczna instalacja przeciwooblodzeniowa nie będzie w stanie wytworzyć osłony cieplnej przed oblodzeniem, i odwrotnie, w danych warunkach ogrzewanie powierzchni jest niebezpieczne, dlatego też instalację przeciwooblodzeniową silnika należy wyłączyć.

Uwzględniając nagrzanie kinetyczne należy pamiętać, że temperatura wzdłuż obrysu powierzchni zmniejsza się wraz z oddalaniem się od przedniej krawędzi powierzchni, to znaczy, że w określonych warunkach temperatura przedniej krawędzi może być wyższa od 0°C, podczas gdy dalej na powierzchni temperatura może być ujemna; izoterma zerowa będzie się znajdować w pewnej odległości od przedniej krawędzi. W strefie tej izotermy będzie występować oblodzenie, które jest bardzo niebezpieczne dla silnika ze względu na swój kształt i wielkość.

Dlatego też wykorzystując możliwość zwiększenia prędkości (lub w koniecznym przypadku jej zmniejszenia) o 25...45 m/sek, można zwiększyć (lub obniżyć) skutek cieplny od nagrzania kinetycznego i uniknąć warunków sprzyjających takiemu oblodzeniu.

Jeśli pilot powźmie decyzję, że w danych warunkach meteorologicznych dla uniknięcia lub zlikwidowania oblodzenia należy zwiększyć prędkość lotu i jest możliwość wykonania tego, to należy pamiętać, że wraz ze zwiększeniem prędkości lotu będzie zwiększać się i nagrzanie kinetyczne prędkości; włączona wtedy instalacja przeciwooblodzeniowa swoją cieplną energią będzie powodować w tym przypadku zwiększenie skutku cieplnego. Prędkość lotu należy w danym przypadku zwiększyć z uwzględnieniem możliwego wydatku cieplnego samej instalacji przeciwooblodzeniowej,



Rys. 2. Ilość energii cieplnej potrzebnej do ochrony przed oblodzeniem cylindra  $\phi$  50 mm. Wysokość 4500 m. Nawodnienie  $\alpha = 1$  G/m<sup>3</sup>. Wymiar kropli i kryształków lodu średni 20  $\mu$



wo będą umożliwiały topienie się kryształów, lecz z powodu niewystarczającej ilości ciepła powierzchnie pokryją się lodem nie tylko za izotermą zerową, lecz i przed nią. Dlatego też, jeśli na trasie lotu znajdują się chmury wodne lub lodowe, to należy w nie wlatywać na optymalnej prędkości pod względem uniknięcia oblodzenia.

Przy wejściu w chmurę wodną, jeśli to konieczne, prędkość lotu należy tak zwiększyć, by skutek cieplny od nagrzania kinetycznego zwiększył się do potrzebnej wielkości (lepiej z pewnym zapasem, patrz wykres 1); instalacji przeciwoblodzeniowej cieplnej nie należy wyłączać.

Przy wejściu w chmurę krystaliczną można zwiększyć prędkość lotu, jeśli będzie zapewniony potrzebny skutek cieplny od nagrzania kinetycznego — instalacji przeciwoblodzeniowej nie wyłączać; w razie, gdy zapewnienie potrzebnego nagrzania kinetycznego jest niemożliwe lub gdy niemożliwe jest zwiększenie prędkości z innych powodów, można zmniejszyć prędkość lotu, jeśli jest to wymagane, instalację przeciwoblodzeniową należy jednak wyłączyć. Nie jest to możliwe na wszystkich typach samolotów, jeśli jednak nie ma nadmiaru ciepła (patrz wykres 1) lub jeśli dla danych warunków ilość ciepła jest niewystarczająca, instalację przeciwoblodzeniową należy wyłączyć.

Możliwość takiej zmiany prędkości może się okazać skuteczną metodą walki z oblodzeniem przy dużych prędkościach.

O wiele większe niebezpieczeństwo przedstawiają chmury pierzaste, ponieważ obecna w nich woda powoduje zwilżenie nie ogrzanej powierzchni i jej oblodzenie. Możliwość spotkania się z chmurami typu mieszanego jest jednak bardzo mała.

W wyniku tego, co było powiedziane, nasuwa się konieczność posiadania przyrządu wskazującego obecność w chmurach przechłodzonej wody lub kryształków lodu — swego rodzaju sygnalizatora.

Sygnalizator istnienia w chmurach przechłodzonej wody lub kryształków lodu nie został jeszcze wynaleziony, dlatego też o istnieniu chmur krystalicznych można sądzić na podstawie komunikatu meteorologicznego dla trasy lotu. W locie należy zwracać uwagę na temperaturę zewnętrzną, charakter spotykanych chmur, obserwować zjawiska optyczne (halo, fałszywe słońca i księżycy, słupy świetlne właściwe chmurą lodowym), zwracać uwagę na stan nie ogrzewanych powierzchni samolotu dostępnych obserwacji pilota. Uwzględnić też należy i porę roku.

Na przykład, jeśli lot odbywa się zimą na wysokości powyżej 6000 m przy temperaturze poniżej  $-12^{\circ}$ ...  $-15^{\circ}$  C, to z zasady spotkane chmury będą krystaliczne.

Należy również zwracać uwagę na widzialność w chmurach krystalicznych, która znacznie przewyższa widzialność w chmurach wodnych z jednakową ciężarowo zawartością wody i kryształków lodu. W czasie lotu w chmurach krystalicznych lub w otaczającej je przestrzeni łatwo daje się zauważyć błyskanie kryształków w promieniach słońca.

Przy posługiwaniu się przyrządami lotniczymi z papierem filtracyjnym pokrytym farbą, charakterystyczny jest dla chmur krystalicznych brak barwienia papieru w chmurze.

Prócz tego przy obserwacji z ziemi można sądzić o istnieniu chmur krystalicznych na podstawie wyglądu śnieżynek, które w tym przypadku nie mają budowy ziarnistej, ich powierzchnia jest gładka i błyszcząca (śnieżynki pokryte ziarnami mają odcień matowy, przy powiększeniu widać w nich białe kulki — zamrożone kropelki). Nie należy też zapominać o danych radiolokacyjnych dotyczących chmur.

Z przedstawionych zagadnień wynika też, że jeśli w chmurach krystalicznych wyłączenie cieplnej instalacji przeciwoblodzeniowej może zabezpieczyć silnik przed oblodzeniem, to w chmurach mieszanym jedynym sposobem ochrony przed oblodzeniem jest doprowadzenie ciepła w ilości wystarczającej do roztopienia kryształków lodu; ta potrzebna ilość ciepła będzie co do swej wielkości między wielkościami odpowiadającymi chmurą przechłodzonymi kropelkami i chmurą z kryształkami lodu; wielkość ta będzie zależać od ciężarowego stosunku zawartości wody i kryształków lodu\*). Lecz i w tym przypadku należy uwzględnić możliwość łącznego wykorzystania skutku cieplnego instalacji przeciwoblodzeniowej i nagrzania kinetycznego oraz wpływu zmiany prędkości lotu.

Należy zwrócić uwagę na specjalne niebezpieczeństwo, jakie przedstawiają burze i huragany, zwłaszcza w zakresie

temperatur bliskich zeru. W tych przypadkach temperatura mas powietrza może szybko obniżyć się. Dlatego niebezpieczeństwo nasilonego oblodzenia jest w tych warunkach bardzo duże. I w tym przypadku należy przewidywać, że przy oblodzeniu zimą wygodniej jest zazwyczaj przesunąć się do góry, latem zaś — do dołu, ponieważ decydującym czynnikiem jest temperatura. Im temperatura jest bardziej powyżej  $0^{\circ}$  C, tym słuszniej jest przesunąć się z zagrożonej strefy do góry.

W czasie lotu należy uważnie obserwować chmury. Zazwyczaj chmury burzowe różnią się obecnością nad ich wierzchem chmur pierzastych i pierzasto-warstwowych. Wiadome jest, że w czasie nocy na istnienie burzy wskazują obłaski błyskawic oddalonych chmur.

Przy prędkościach naddźwiękowych możliwość oblodzenia przednich krawędzi powierzchni na wlocie do silnika jest wykluczona, jeśli nie ma aktywnego odprowadzania ciepła do wnętrza powierzchni (konstrukcji); prócz tego skutek przymusowego wyparowania w tych warunkach z powierzchni opofilowania, nawet przy obniżeniu temperatury wzdłuż powierzchni wraz z istnieniem zerowej izotermi, z nadmiarem równoważą napływanie wilgoci w postaci przechłodzonych kropel lub kryształków lodu, chociaż taki przebieg zjawiska możliwy jest na prędkościach powyżej  $Ma = 1,2 \dots 1,4$  przy bardzo niskich temperaturach otaczającego powietrza ( $-30^{\circ}$  C i niżej).

Z całości przedstawionych zagadnień można wyprowadzić jeszcze jeden wniosek: silniki przeznaczone dla samolotów okołodźwiękowych i naddźwiękowych, pracujące przez krótki czas do przejścia samolotu na duże prędkości, nie muszą być koniecznie wyposażone w cieplne instalacje przeciwoblodzeniowe. Odwrotnie, brak takich instalacji znacznie upraszcza konstrukcję silnika, zmniejsza jego ciężar, ułatwia eksploatację. Dla eksploatacji grupy silnikowej w warunkach lotniskowych, dla startu i lądowania, prościej jest wprowadzić pewne ograniczenia.

Dla prawidłowej i aktualnej oceny meteorologicznych warunków przed lotem i specjalnie w czasie lotu okazuje się niezbędną ciągłą obserwacją chmur; należy przed rozpoczęciem lotu zwrócić specjalną uwagę na wielkość i wysokość zachmurzenia, tak dolnej strefy chmur, jak i górnej. Przed lotem ważne jest znać dla trasy lotu i jej rejonu: ilość chmur, ich położenie na wysokości, kierunek przepływu powietrza, grubość warstwy chmur, rozkład temperatur powietrza w chmurach i prawdopodobieństwo oblodzenia, rozległość strefy oblodzenia we wszystkich kierunkach, różnorodność osadzających się lodu i nasilenie oblodzenia, rodzaj i nasilenie opadów, warunki widzialności w nich i w chmurach, obecność stref burzowych; należy również posiadać jakościową charakterystykę chmur (wodne, lodowe, mieszane) oraz wiadomości dotyczące frontów atmosferycznych, by oblodzenie nie było zaskoczeniem dla pilota; należy nie tylko dobrze poznać warunki meteorologiczne na trasie lotu i w jego rejonie, lecz i dobrze orientować się w tych warunkach w czasie lotu, prowadząc bez przerwy obserwację i korygując je za pomocą radia.

Prognoza oblodzenia dla lotu w chmurach polega więc nie tylko na ustaleniu prawdopodobieństwa oblodzenia; winna ona zawierać również ocenę możliwego nasilenia oblodzenia i charakterystykę przewidzianej wielkości strefy oblodzenia. Te trzy czynniki winny być uwzględniane przy ich obowiązkowym łącznym rozpatrzeniu, ponieważ w różnych warunkach naturalnych decydujący pod względem wykonania lotu może się okazać każdy z nich. Przy ustalaniu prognozy oblodzenia przed lotem należy uwzględnić wszystkie dane o warunkach oblodzenia na trasie lotu, by chociaż w przybliżeniu ustalić stan lotu w chmurach.

Doświadczenie z eksploatacji wykazuje, że załogi latające mające dobre przygotowanie pod względem znajomości sprzętu oraz dobre przygotowanie meteorologiczne uwzględniające wnikliwie przed lotem warunki meteorologiczne i znające dobrze własności eksploatacyjne samolotu i silnika w warunkach rzeczywistych zawsze będą tak postępować, by przy wyborze trasy lotu lub w przypadku konieczności nie narażać silnika odrzutowego i samego samolotu na szkodliwe działanie oblodzenia.

Ogólnie powiedziawszy, należy zawsze pamiętać, że najlepszą „metodą” ochrony będzie możliwie szybkie wyjście z niebezpiecznej strefy. Dlatego też zawsze należy uwzględnić podane tu rozważania i prawidłowo ocenić celowość lotu w warunkach oblodzenia lub znaleźć bardziej korzystną trasę.

\*) Uwaga: Właściwie od stosunku „nawodnienia” i „nalodzenia”

## LITERATURA

1. Tieslenko A. I. — Borba s obledienieniem gazoturbinnych dwigatielei. Wiestnik Wozdusznego Flota nr 10, 1959.
2. Chrgujan A. Ch. — Fizika atmosfery, GIFML, M., 1958.
3. Mazun J. P. — Fiziczeskije osnovy obledienienija samolotow. Gidromieteoizdat, M., 1957.
4. Poczelnik I. G. — Mietieorologiczeskije uslowija polotow na bolszej wysotach. Gidromieteoizdat, Ł. 1957.
5. Kozarin W. — Ocenka uslowij obledienienija samolotow w slo-

- istych i sloisto-kucziewych oblakach. Gražd. Awiacija, nr 11, 1957.
6. Timofiejew D. — Mietieorologiczeskije uslowija polotow na bolszych wysotach. Gražd. Awiacija, nr 7, 8, 1956.
7. Poczelnik I. G., Borowikow A. M. — Riezultaty obrabotki danych mikrostrukturalnych nabludienij dla oblakow s obledienieniem i biez obledienienija. Trudy CIP nr 80, 1959.
8. Delhaye J. — Le givrage des turbo-reacteurs. Bulletin Assoc. Ingrs issus Ecole applic. artill. et génie, nr 1, 1957, Bruxelles.
9. Bailard O. R. and Guan B. — Ice Crystals — a New Icing Hazard. Canadian Aer. Journ., nr 1, 1958.



## na półkach księgarskich

**Issledowanie nagruzki stupieni gazowej turbiny.** B. A. Czerkassow. Oborongiz, 1959 r., stron 69.

Jest to kolejny (107) zeszyt prac Moskiewskiego Instytutu Lotniczego, w którym rozpatrzony jest wpływ współczynników obciążenia na parametry strumienia stopnia turbiny i podane możliwe wielkości współczynnika sprawności silnie obciążonego stopnia turbiny. Wykazano, że dla każdej wielkości współczynnika obciążenia istnieje optymalna wielkość reakcyjności. Podano zasady obliczenia wysoko obciążonych stopni oraz analizę charakterystyk wysoko obciążonych turbin. W drugiej części pracy podano przykłady badania palisad prostowniczych stopnia turbiny gazowej, przedstawiono wpływ współczynnika obciążenia i stopnia reakcyjności na kąt wylotowy strumienia z wieńca turbiny, typy palisad prostowniczych, wybór parametrów palisad prostowniczych i ich wpływ na parametry strumienia, oraz badania doświadczalne płaskich i pierścieniowych palisad prostowniczych. Opisane są też stanowiska do badania palisad płaskich i pierścieniowych, oraz podane charakterystyki doświadczalne badanych palisad. Książka przeznaczona jest dla pracowników instytutów i inżynierów biur konstrukcyjnych.

L. S.

**Raboczij procieśs i rascziot kamier sgoranja gazoturbinnych dwigatielej.** A. I. Michajłow, G. M. Gorbunow, W. W. Borisow, Ł. A. Kwasnikow i I. I. Markow, Oborongiz, 1959 r., stron 286.

Jest to kolejny (106) zeszyt prac Moskiewskiego Instytutu Lotniczego, w którym przedstawione są wyniki doświadczalne badania gazodynamicznej budowy strumienia powietrza w komorach spalania z zawroiwaniem strumienia i bez zawroiwania. Rozpatrzone są też opory hydrauliczne komór spalania i straty w komorach, metody pomiaru ciśnienia statycznego i pełnego ciśnienia przy przepływie powietrza przez otwory do cylindra, pomiary współczynników wydatku przy przepływie przez otwory, zmiany ciśnienia statycznego i dynamicznego przy doprowadzaniu ciepła. Opisane są metody obliczenia komór spalania silników odrzutowych z łopatkowym zawroiwaniem, obliczenia konstrukcyjne i obliczenia pół prędkości w komorze spalania, obliczenia pół miejscowej koncentracji paliwa w komorze spalania oraz metodyka badań i opisy aparatury stosowanej przy badaniach procesów spalania. Książka przeznaczona jest dla pracowników instytutów i konstruktorów biur.

L. S.

**Izgbnyje kolebanja dietalej i uzłow awiacionnych gazoturbinnych dwigatielej.** A. F. Gurow, Oborongiz, 1959 r., stron 359.

Jest to sto piętnasty zeszyt prac Moskiewskiego Instytutu Lotniczego, w którym rozpatrzono zagadnienia drgań korpusów i krytyczne prędkości wałów silników lotniczych, drgania swobodne gięte elementów i zespołów o jednej podporze i o dwu podporach oraz układów swobodnych, jak i drgania swobodne wałów i belek — konsoli. W drugiej części pracy opisane są zagadnienia wymuszonych drgań giętych elementów i zespołów, podane są układy równań całkowych drgań wymuszonych i dynamiczna elastyczność obracającej się belki, rozpatrzone są drgania wymuszone wałów z różnymi układami podparć oraz dodatkowych obciążeń skupionymi masami, oraz wspólne drgania zespołów i układów sprężystych. Podana jest również metodyka wyznaczania częstości swobodnych i wymuszonych giętych drgań łopatek turbin spaliniowych, łopat śmigieł oraz wałów, wyjaśnione zostały metody wyznaczania dynamicznej sztywności i elastyczności różnych układów. Książka przeznaczona jest dla inżynierów konstruktorów i specjalistów z zakresu obliczeń wytrzymałościowych i drgań silników lotniczych oraz dla wykładowców i studentów wyższych szkół technicznych.

L. S.

**Issledowanja w oblasti teoreticzeskoj i prikladnoj aerogidrodinamiki.** red. N. S. Arżanikow, Oborongiz, 1959 r., stron 92.

W skład sto jedenastego zeszytu prac Moskiewskiego Instytutu Lotniczego wchodzi następujące prace: E. A. Biriukowa — tłumienie od hamowania odgięcia strumienia za skrzydłem o skończonej rozpiętości, G. S. Sałtekowej — obliczenie aerodynamicznych charakterystyk skrzydła w strzale w ograniczonym strumieniu, A. K. Nikitina i W. S. Korczagina — płaskie nieliniowe zadanie o ruchu smarowiny w łożysku przy równomiernym obracającym się stałym obciążeniu, W. I. Szajdakowa — badanie aerodynamiczne układu śmigła w pierścieniu w przypadku pracy w zawisie, N. W. Lewkojewoj — zagadnienie wyznaczenia strat ciśnienia dynamicznego w okolicy miejscowych oporów, A. D. Riezietnikowej — zależność lepkości cieczy od ciśnienia. Książka przeznaczona jest dla pracowników instytutów technicznych, inżynierów i studentów wyższych lat studiów technicznych.

L. S.

**Awiacionnoje priborostrojenje i awtomatika.** red. B. A. Riabow, Oborongiz, 1959 r., stron 150.

Jest to kolejny (109) zeszyt prac Moskiewskiego Instytutu Lotniczego z następującymi pracami z zakresu budowy przyrządów i automatyki, zagadnienia ruchu względnego, pomiar kątowych prędkości za pomocą trzystopniowych żyroskopów, układy dwuosłowych przyrządów pomiaru prędkości kątowych na zasadzie trzyosiowego żyroskopu, dynamiczne charakterystyki przepływomierza paliwa z wirnikiem do szybkiego pomiaru przepływu, zastosowanie teorii podobieństwa i fizykalnego modelowania do badania przepływomierzy cieczy szybkiego pomiaru przepływu, obliczanie kinematycznej kompensacji temperatur, metody pomiaru prędkości strumienia powietrza, dokładna regulacja prędkości obrotowej silników prądu stałego, pewne zagadnienie dynamiki samolotu myśliwskiego i pewne zagadnienie nieliniowych zjawisk teorii drgań. Zawarte w zbiorze prace powstały w wyniku prac teoretycznych, częściowo zaś badań doświadczalnych przeprowadzonych w zakładzie lotniczych przyrządów i automatyki. Książka przeznaczona jest dla pracowników instytutów naukowych, inżynierów i techników biur konstrukcyjnych, przyrządów lotniczych i automatyki oraz dla studentów danej specjalności wyższych szkół technicznych.

L. S.

**Rukowodstwo po projektirowanju elementow i sistiem awtomatiki.** zespół autorów pod redakcją B. N. Pietrowa, Oborongiz, 1959 r., stron 248.

Jest to praca zbiorowa zespołu dziewięciu autorów wykładowców Moskiewskiego Instytutu Lotniczego. Obecne, drugie wydanie tej książki w stosunku do pierwszego zostało uzupełnione rozdziałami o układach regulacji automatycznej. Rozpatrzone zostały szczegółowo teoretyczne podstawy budowy nadajników przyspieszeń i parametrów drgań z wskazaniem konstrukcyjnych elementów różnych typów nadajników oraz charakterystyka statyczna i zakres temperatur potencjometrycznych nadajników. W następnym rozdziale opisane są polaryzowane przełączniki, wybór schematów konstrukcyjnych, kolejność obliczeń obwodów magnesów stałych, elektromagnesów i uzwojeń, oraz charakterystyki robocze przełączników. Kolejno przedstawione są zasady działania elektronowych przełączników prądu zmiennego, metodyka obliczeń wzmacniaczy kaskadowych i przykłady doboru parametrów układów przełączników, rozpatrzone zagadnienia elektromagnetycznych tutej z wypełniaczem ferromagnetycznym proszkiem, zagadnienia projektowania, obliczania i konstruowania transformatorów, obliczania układów automatyki, oraz obliczania układów pilotów automatycznych. Książka może być wykorzystana przez studentów wydziałów elektromechanicznych wyższych szkół technicznych oraz pewne rozdziały mogą być przydatne dla inżynierów biur konstrukcyjnych.

Zamówienia i przedpłaty na prenumeratę przyjmowane są w terminie do dnia 15 miesiąca poprzedzającego okres prenumeraty przez urzędy pocztowe, listonoszy oraz oddziały i delegatury „RUCH”. Można również zamawiać prenumeratę, dokonując wpłaty na konto PKO nr 8-6-13768, Przedsiębiorstwo Upowszechnienia Prasy i Książki „RUCH” we Wrocławiu, ul. Oławska 10. Na odwrocie blankietu należy podać tytuł zamawianego czasopisma, okres prenumeraty oraz ilość zamawianych egzemplarzy.

### Cena w prenumeracie

półrocznej — 36 zł  
rocznej — 72 zł

Cena w prenumeracie za granicę jest o 40% wyższa od ceny podanej wyżej. Przedpłaty na tę prenumeratę przyjmuje na okresy półroczne i roczne Przedsiębiorstwo Kolportażu Wydawnictw Zagranicznych „RUCH” w Warszawie, ul. Wilcza 46, za pośrednictwem PKO, konto nr 1-6-10024.

# PRZEGLĄD DOKUMENTACYJNY LOTNICTWA

OPRACOWANY PRZEZ OŚRODEK DOKUMENTACJI I WYDAWNICTW INSTYTUTU LOTNICTWA

DODATEK DO DWUMIESIĘCZNIKA „TECHNIKA LOTNICZA”

ROCZNIK X

WARSZAWA, MAJ – CZERWIEC 1960 r.

ZESZYT 2

Gwiazdkami obok liczb porządkowych oznaczone są publikacje znajdujące się w Bibliotece Instytutu Lotnictwa.

## HYDROAEROMECHANIKA

156\* 533.691.13 ILot  
Truckenbrodt E.: Zur Anwendung der Ähnlichkeitsregeln der kompressiblen Strömung in der räumlichen Tragflügeltheorie. O zastosowaniu reguł podobieństwa do przepływów ściśliwych w teorii trójwymiarowego skrzydła. Z. f. Flugwissenschaften, 1957, r. 5, nr 12, s. 341–346, rys. 9, poz. bibl. 6.

Przy rozważeniu dwu- lub trójwymiarowego opływu skrzydła z prędkością poddźwiękową można uwzględnić wpływ ściśliwości przy pomocy reguły podobieństwa Prandtla-Glauerta. Metoda ta polega na zastąpieniu skrzydła rzeczywistego przez zastępcze oraz ośrodką ściśliwego przez nieściśliwy i pozwala obliczyć rozkład prędkości i ciśnień. Reguła Prandtla-Glauerta została rozszerzona przez Ackereta na opływy naddźwiękowe, przy czym obrazem opływu rzeczywistego jest przepływ dokoła skrzydła zastępczego z prędkością  $Ma = \sqrt{2}$ . Reguła Prandtla-Glauerta-Ackereta pozwala również obliczyć rozkład ciśnień dla skrzydła o profilu nieskończonego cienkim przy prędkości  $Ma = 1$ . Zagadnienie wpływu skończonej grubości profilu rozwiązał von Kármán.

J. Sandauer

157\* 533.6.013.11:533.665 ILot  
Frilling L., Clark J. W.: The aerodynamic force coefficients of yawed slender configurations at high Mach numbers. Współczynniki sił aerodynamicznych skośnie ustawionych smukłych kształtów przy dużych liczbach  $Ma$ . J. Aeronaut. Scien., 1957, t. 24, nr 12, A4, s. 913–915, rys. 5, poz. bibl. 2.

Współczynniki aerodynamiczne w takim przypadku znalazł autor, rozkładając przepływ na osiowy i poprzeczny, uzyskując zgodność z innymi metodami.

Z. Brodzki

## MECHANIKA LOTU

158\* 629.13.072/75:613.693 ILot  
Westbrook Ch. B., Ruer D. T.: Handling qualities and pilot dynamics. Właściwości pilotażowe płatowca i dynamiczne charakterystyki pilota. Aero/Space Engng., 1959, t. 18, nr 5, s. 26–32, rys. 6, poz. bibl. 11.

Omówiono rozwój przepisów dotyczących charakterystyk pilotażowych samolotu. Przedstawiono wyniki badań opartych zarówno na zebranych opiniach pilotów, jak i na nowej metodzie, polegającej na zmodelowaniu czynnika ludzkiego, wchodzącego jako element składowy do zamkniętego układu regulacji lotu. W wyniku stwierdzono zadowalającą zgodność obu metod.

J. Morawski

## ZAGADNIENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE W KONSTR. LOTN.

159\* 621-226.3:531.781.2 ILot  
Drew A. D.: Developments in methods of measuring stresses in compressor and turbine blades on test bed and in flight. Postęp w metodach pomiaru naprężeń łopatek sprężarki i turbiny na stojaku i w locie. Prac. Inst. Mech. Engrs, 1958, t. 172, nr 8, s. 320–337, rys. 51, poz. bibl. 5.

Autor podaje strukturę organizacyjną działu badań dynamicznych naprężeń w wirujących łopatkach silników turbogazowych. Omawia metody pracy, sposób rejestracji pomiarów, tworzenie dokumentacji, oraz wymagania jakim mają odpowiadać pracownicy tego działu. Pomiaru naprężeń w łopatkach wirników przeprowadza się przy pomocy tensometrów oporowych, do 150 °C — o podstawie papierowej, do 450 °C — ze specjalnej tkaniny odpornej na działanie temperatur, do 800 °C — ceramiczne. Jednym z najważniejszych elementów układu mierzącego są zbieracze prądu. Obecnie są w użyciu zbieracze ślizgowe rtęciowe, szcztokowe grafitowo-srebrne, oraz szcztokowe z plecionki (druceki molibdenowe). Pomiaru przeprowadza się automatycznie tak na stojaku jak i w locie, rejestrując wyniki automatycznie w postaci zapisów.

J. Lipka

160\* 620.171.5:539.4.014.11 ILot  
Prigorowski N. J.: Opriedelenje napraženij i pieriemieszczzenij w dietalach na modelach iz plastmass. Określenie naprężeń i przemieszczeń na modelach z mas plastycznych. Wiestnik Maszinostr., 1959, r. 39, nr 1, s. 56–69, rys. 17, tab. 4, poz. bibl. 20.

W pracy tej omówiono metodę tensometryczną i elastoptyczną pomiaru naprężeń i odkształceń wskazując przy tym, że są one uzupełnieniem a zarazem sprawdzeniem metod teoretycznych. Obie te metody pozwalają w sposób stosunkowo prosty wyznaczyć nierównomierności w przepływie naprężeń.

Rozwój metody elastoptycznej należy wiązać z rozwojem mas plastycznych czułych optycznie. Są robione wysiłki, by wyrabiać masy plastyczne o jak największych wymiarach wolne od efektu szczepowego i naprężeń naskórkowych. W następstwie rozwoju tej metody należy liczyć się z możliwością zastosowania jej w obszarach naprężeń sprężysto-plastycznych. Metoda tensometryczna może być stosowana na częściach maszyn o naturalnej wielkości bądź modelach, których materiał powinien posiadać małą wartość modułu  $E$ ; co z kolei pozwala wykonywać modele dające duże odkształcenia przy względnie małych obciążeniach.

Z. Łapiński

## AERODYNY

161\* 629.135.8 ILot  
Nonweiler T. R. F. The man-powered aircraft. Samolot o napędzie ludzkim. J. Royal Aeronaut. Soc., październik 1958, t. 62, nr 574, s. 72–734, rys. 20, tab. 5, poz. bibl. 14.

Możliwości dostarczenia mocy przez człowieka są niewielkie (0,5–1,5 KM). W pracy podano projekt doświadczalnego „miejsinolotu” i zagadnienia, których opracowanie wydatnie powiększy jego osiągi.

Z. Brodzki

162\* 629.135.8 ILot  
Kendall E. R.: Is man-powered rotating-wing flight a future possibility? Czy jest możliwy w przyszłości lot wiroplata napędzanego przez człowieka? J. Helicopter Assoc. Great Brit., 1959, t. 11, nr 2, s. 100–129, rys. 17, tab. 1.

Artykuł omawia zagadnienie możliwości lotu i konstrukcji śmigłowca-mięsiniolotu. Mimo licznych trudności, szczególnie rozwiązanie sterowania, lot takim śmigłowcem będzie możliwy przy zachowaniu odpowiedniej lekkości łopatek o dobrym profilu.

Z. Brodzki

## CZĘŚCI AERODYN

163\* 533.691.16 ILot  
Schlichting H., Pechau W.: Auftriebserhöhung von Tragflügeln durch kontinuierlich verteilte Absaugung. Zwiększenie wyporu uskrydlenia za pomocą odsysania rozłożonego w sposób ciągły. Zeitsch. Flugw., 1959, r. 7, nr 5, s. 113–119, rys. 11, poz. bibl. 11.

Skutecznym środkiem zwiększenia  $C_z$  jest odsysanie warstwy przyściennej przez porowate pokrycie. Dla profili „szybkich” oderwanie zachodzi w pobliżu brzoju natarcia i tam też należy odsysać. Autorzy na drodze teoretycznej obliczają jaki jest niezbędny minimalny wydatek powietrza sterującego warstwą przyściennej (powietrza odsysanego) dla uzyskania największego współczynnika  $C_z$  wyporu oraz jak jest najkorzystniej umieścić pole porowatej części powierzchni skrzydła. Okazuje się też, że lepiej odsysać silniej na długości równej 20 do 30% głębokości profilu, niż słabiej na całej głębokości (cięciwie). Wydatek powietrza przy zastosowaniu powierzchni porowatej jest około 10 razy mniejszy niż dla pojedynczej szczeliny. Ponadto przykład obliczeniowy dla profilu NACA 747A315. Obliczenia teoretyczne opierają się na równaniach Schlichtinga uwzględniających odsysanie zastosowanych do nieściśliwej burzliwej warstwy przyściennej. Ważnym składnikiem obliczeń jest zastosowanie graficznej zależności dwóch parametrów  $H$  warstwy przyściennej, które są stosunkami odpowiednich charakterystycznych grubości warstwy przyściennej jak „grubość straty impulsu”, „grubość wyporna” oraz „grubość straty energii”.

J. Nikol.

164\* 629.13.014.676 ILot  
Schwertzberg M.: Blown flap system for STOL performance. Weight considerations. Kłapy nadmuchiwane dla celów SSL z punktu widzenia analizy ciężarowej smolotu. Aero/Space Engng., 1959, t. 18, nr 3, s. 48–52, 63, rys. 10, tabl. 1.

W zastosowaniu do samolotu SSL \*) znaczne zwiększenie współczynnika  $C_z$  uzyskuje się dzięki nadmuchiwaniu powietrza na kłapę (sterowanie warstwą przyściennej). Niezbędne do tego celu dodatkowe urządzenie posiada jednak pewien ciężar. Za pomocą analizy ciężarowej samolotu, opartej na wzorach doświadczalnych autor udowadnia, że nadmuch opłaca się stosować przy prędkościach przeciągnięcia (prędkość nieco mniejsza od prędkości lądowania) mniejszych niż 76 km/h. Ciekawym wnioskiem jest również to, że korzyści płynące z nadmuchu wrażliwość wraz ze wzrostem ciężaru całkowitego samolotu oraz ze zmniejszeniem zasięgu, czyli nadmuch jest korzystny dla dużych samolotów transportowych o małym zasięgu. Rozważania odnoszą się do pewnego typowego samolotu transportowego. Oczywiście do każdego projektu samolotu należy podejść indywidualnie.

J. Nikol.

165\* 533.662.6:629.135.4.038 ILot  
Pei Chi Chou: Pitch-lag instability of helicopter rotors. Niestateczność wirników śmigłowcowych jako wynik wpływu wahań łopat wokół przegubu pionowego na skok. J. Amer. Helicopter Soc. 1958, t. 3, nr 3, s. 30–39, rys. 9.

Teoretyczna analiza zjawiska niestatecznych oscylacji wirnika nośnego z przegubowymi łopatkami, jakie zostało zaobserwowane podczas prób na wieży. Wykazane jest, że oscylacje takie mogą występować jedynie wtedy, gdy wahaniem łopat nośnych wokół przegubu pionowego w kierunku powiększenia kąta „opóźnienia” towarzyszy zmniejszanie skoku. Odpowiednio staranne opracowanie kinematyki zawieszenia przegubowego łopaty może uwolnić wirnik w ogóle od niebezpieczeństwa niesterowanych oscylacji. Artykuł zawiera również liczbowy przykład obliczenia parametrów niestatecznych oscylacji mogących wystąpić na konkretnym wirniku.

R. Witkowski

\*) SSL — Skrócony start i lądowanie.



- 156\* 629.13.012.525 ILot  
 Sołtyk T.: **Zbiorniki integralne.** Technika Lotnicza, 1959, r. 14, nr 3, s. 83-86, rys. 12, poz. bibl. 5.  
 Omówiono wymagania stawiane zbiornikom integralnym oraz kilka rozwiązań stosowanych w nowoczesnych konstrukcjach. (a)
- POCISKI LATAJĄCE**
- 167\* 629.136.3 ILot  
 Wilkins R. F.: **Rocket Research in Canada.** **Badania rakietowe w Kanadzie.** Canad. Aeronaut. J., 1959, t. 5, nr 4, s. 138-142, rys. 1, tabl. 1.  
 Kanadyjski program badań w dziedzinie techniki rakietowej został nakreślony w r. 1956 i ma na celu w pierwszej kolejności opracowanie pocisków rakietowych dla obrony przeciwlotniczej. Ze względu na duże trudności, na jakie napotykały wojska lądowe marynarka w składowaniu i obsłudze ciekłych paliw i utleniaczy, program prac nad techniką rakietową opiera się wyłącznie na przędzie prochowym. Badania nad paliwami stałymi obejmują napędzie wszystkim technologię ziaren prochowych odlewanych w komorze rakietowej, tj. przyklejonych do jej ścianek. Zakład produkujący paliwo posiada bardzo nowoczesne wyposażenie do badań statycznych silników rakietowych różnej wielkości.  
 J. Sandauer
- PRZYRZĄDY POKŁADOWE**
- 168\* 629.13.05 ILot  
 Kazarin S. T.: **Asynchronnyj tachometr kak datczik ugłowych uskorienij.** Tachometr asynchroniczny jako czujnik przyspieszeń kątowych. Awtom. i Tielemiech., 1959, t. 20, nr 5, s. 676-681, rys. 3, poz. bibl. 7.  
 Rozpatrzono możliwość stosowania dwufazowej prądnicy asynchronicznej do pomiaru przyspieszeń kątowych wirnika przy zasilaniu uzwojenia wzbudzenia prądem stałym. Wprowadzono wzory analityczne i przedstawiono wyniki eksperymentalne.  
 J. Morawski
- 169\* 629.13.014.59 ILot  
 Salukwadze M. E.: **Wlijanje niekotorych tipiczych niełiniijnostiej na nastojku awtopilota.** **Wpływ pewnych typowych nieliniowości na wybór parametrów pilota automatycznego.** Awtom. Tielem., 1959, t. 20, nr 5, s. 553-563, rys. 7, poz. bibl. 3.  
 Stosując metodę bilansu energetycznego określono wpływ nieliniowości serwowmechanizmu sterowanego na stabilność w ruchu przechyleniowym oraz wpływ quasinieliniowości sumatora i nieliniowości charakterystyki prędkościowej serwowmechanizmu sterowanego przy analizie ruchu podłużnego.  
 J. Morawski
- 170\* 629.13.014.59 ILot  
 Naticyn W. D., Riapołow W. A.: **Primienienie intiegralnoj kwadraticznoj ocenki dla opriedielenja optimalnych paramietrow awtopilota so skorostnoj obratnoj swiazju.** **Zastosowanie całkowitego kwadratowego wskaźnika charakterystyki skokowej do określenia optymalnych parametrów pilota automatycznego z podanym sprzężeniem zwrotnym.** Awtom. i Tielemiech., 1959, t. 20, nr 4, s. 415-421, rys. 8, poz. bibl. 5.  
 Rozpatrzono stabilizację samolotu w ruchu podłużnym przy pomocy astatycznego pilota automatycznego. Określono warunki optymalnego wyboru parametrów pilota automatycznego w oparciu o kwadratowe kryterium całkowite. Uwzględniono bezwładność automatu.  
 J. Morawski
- WYPOSAŻENIE AERODYN**
- 171\* 629.13.012.53/58:629.13.06.628.82 ILot  
 Normalair Ltd.: **Cabin air cooling systems.** **Układy chłodzenia powietrza w kabine samolotu.** J. Soc. Licens. Aircr. Engrs., 1959, t. 8, nr 4, s. 3-8, rys. 7.  
 Omówiono zasadę działania lotniczych układów oziębiających o obiegu powietrznym i parowym oraz ich zastosowanie do poszczególnych odmian samolotów.  
 W. Błocki
- SILNIKI LOTNICZE**
- 172\* 621.438 ILot  
 Nuell W. T.: **General design considerations for smaller gas turbines.** **Ogólne uwagi o projektowaniu małych turbin gazowych.** Trans. ASME, 1958, t. 80, nr 4, s. 941-958, rys. 21, poz. bibl. 69.  
 W artykule omówiono własności turbin gazowych małej mocy oraz podano ich charakterystyki. Turbiny te posiadają najczęściej zastosowanie jako napędy pomocnicze w marynarce i lotnictwie oraz jako silniki pojazdów naziemnych. Podano kilka schematów często stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, z których najbardziej udany wg autora jest układ dwuwałowy z jednostopniową sprężarką promieniową i jednostopniowymi turbinami promieniowymi lub osiowymi. Zwrócono szczególnie uwagę na prostą konstrukcję i technologię wirnika turbiny promieniowej i jej zalety użytkowe. Omówiono zagadnienia związane z rozwojem turbin gazowych jako całości i ich elementów: sprężarek turbin i komór spalania i wymienników ciepła oraz podano przedmiot zasadniczych badań przeprowadzonych z układami turbinowymi.  
 A. Kowalewicz
- 173\* 621.45:629.136.3 ILot  
 Boden R. H.: **Ion rocket engine systems.** **Układy silników rakiet jonowej.** Aero/Space Engng., 1959, t. 18, nr 4, s. 67-71, 75, rys. 5, poz. bibl. 3.  
 W artykule omówiono główne części napędu jonowego: źródło energii, zespół wytwarzania mocy i komorę jonizacyjną. Zagadnieniem sprawiającym wiele trudności jest zmniejszenie ciężaru źródła mocy. Obieg odbywa się według cyklu Rankina. Jako środek napędowy stosuje się cez i rubid.  
 Z. Brodzki
- 174\* 536.46:621.43.019.2 ILot  
 Klaczko Ł. A.: **Ekspierimentalnoje issledowanje gorenja kapel to-pliwa.** **Doświadczalne badanie spalania kropli paliwa.** Gorenje: rys. 9, poz. bibl. 5.  
 Celem pracy było doświadczalne sprawdzenie dyfuzyjnej teorii spalania kropli paliwa. Badania obejmowały cztery rodzaje paliw: naftę, benzynę, izoktan i spirytus etylowy. Autor omawia sposób przeprowadzenia badań oraz analizuje wyniki. Badania wykazały zadowalającą zgodność doświadczalnych i teoretycznych wartości temperatury kropki. Oznacza to, że dyfuzyjna teoria spalania paliwa wystarczająco dokładnie określić temperatury kropki paliwa.  
 J. Kolarzyk
- 175\* 533.697.3:533.46 ILot  
 Uberoi M. S.: **Flow field of a flame in a channel.** **Rozkład prędkości w przewodzie w przypadku przepływu ze spalaniem.** Phys. of Fluids, 1959, t. 2, nr 1, s. 72-78.  
 Przeprowadzono analizę możliwości stacjonarnego spalania w przepływie laminarnym i w przewodzie o przekroju prostokątnym, przy założeniu, że rozkład prędkości gazu niespalonego w dostatecznej odległości od czoła płomienia jest stały. Przy wykorzystaniu równań wynikających z warunków dynamicznych przepływu stwierdzono, że jedynie możliwym kształtem czoła stacjonarnego płomienia jest krzywa wypukła w stosunku do gazu spalonego, przy czym ścianki przewodu muszą posiadać zakrzywienia. Za pomocą doświadczeń sprawdzono analityczną metodą określenia pola przepływu i porównano wyniki.  
 A. Kowalewicz
- 176\* 533.697:536.46:621.45 ILot  
 Kowalewicz A.: **Przepływy ze spalaniem detonacyjnym.** Techn. Lotn., 1958, r. 13, nr 4, A4, s. 94-100, rys. 13, poz. bibl. 4.  
 W artykule omówiono ogólnie na podstawie zagranicznej literatury spalanie detonacyjne oraz podano wpływ charakterystycznych czynników przyczyniających się do powstawania detonacji. Podano również zarys teorii przepływu ze spalaniem w fali detonacyjnej, ze szczególnym uwzględnieniem detonacji w przepływie ustajonym. Omówiono koncepcję odrzutowego silnika pulsacyjnego o spalaniu detonacyjnym, podano podstawowe teoretyczne zależności i wyniki badań nad realizacją silnika. (a)
- 177\* 533.015.7:662.75 ILot  
 Hyatt A.: **Some effects of high-energy fuels on aircraft performance.** **Wpływ paliwa o wysokiej energii na osiągi samolotu.** Aero/Space Engineering, 1958, t. 17, nr 11, s. 45-50, rys. 7, tabl. 2.  
 Paliwa o wyższej energii spalania mają znaczny wpływ na osiągi handlowych i wojskowych samolotów. Takie paliwo przy pewnym poprawieniu doskonałości aerodynamicznej zwiększa możliwości stosowania naddźwiękowego transportu handlowego. Przy samolotach wojskowych zwiększa przeszło dwukrotnie zasięg i czas lotu.  
 Z. Brodzki
- 178\* 621.455:621.039 ILot  
 Winterberg F.: **Situation présente du problème des fusées propulsées au moyen de l'énergie nucléaire.** **Możliwości zastosowania energii nuklearnej do napędu pocisków rakietowych.** Fusées et Recherche Aéronautique, 1957, t. 2, nr 1, s. 9-22, rys. 11.  
 Artykuł wskazuje na możliwości napędu pocisków rakietowych przy pomocy reakcji termojądrowych (używając reaktora gazowego) lub przy pomocy energii elektrycznej wytwarzanej bezpośrednio podczas reakcji jądrowych. Chociaż obecny stan techniki nie pozwala na budowę reaktora gazowego lub reaktora wytwarzającego energię elektryczną, eliminując pośrednictwo energii cieplnej, posiadane wiadomości teoretyczne w tej dziedzinie stwarzają realne perspektywy urzeczywistnienia wspomnianych pomysłów.  
 M. Rabenda
- SPRĘŻARKI SILNIKÓW LOTNICZYCH**
- 179\* 621.515 ILot  
 Strunkin W. A.: **Ob odnoj schiemie wysokonaporowo centrobieżnowo kompressora.** **O pewnym schemacie wysokonaporowej sprężarki odśrodkowej.** Awiac. Tiechn., Izv. Wyssh. Uczebn. Zawied., 1959, nr 1, s. 105-110, rys. 4, poz. bibl. 1.  
 Różnica między schematem sprężarki odśrodkowej podanym przez autora i schematem powszechnie stosowanych sprężarek odśrodkowych polega na tym, że w opisanym schemacie zwrot strumienia z kierunkiem promieniowego do osiowego następuje w wirniku, za którym umieszczony jest naddźwiękowy dyfuzor. Schemat taki pozwala na znaczne zwiększenie wydatku powietrza (1,5 do 2 razy) oraz osiągnięcie sprężu rzędu 6-7. Autor analizuje również korzyści wynikające z zastosowania takiej sprężarki w silniku turbino-odrzurowym. Ciąg silnika z opisaną sprężarką wzrasta 1,5-2 razy a zużycie paliwa zmniejsza się o 15-20%.  
 J. Kolarzyk
- 180\* 621.674 ILot  
 Mirolubow I. W.: **Rasczot charakteristik osiowych priednasosow.** **Obliczenie charakterystyk osiowych pomp wstępnych.** Awiac. Tiechn. Izv. Wyssh. Uczebn. Zawied., 1959, nr 1, s. 81-88, rys. 7, poz. bibl. 4.  
 Autor podaje metodę obliczania charakterystyki osiowej (ślimakowej) pompy wstępnej. Metoda oparta jest na teoretycznej charakterystyce, obliczonej z wzoru na teoretyczny napór takiej pompy. W celu obliczenia rzeczywistej charakterystyki, wykorzystuje się uzyskane na podstawie badań wartości współczynników strat siły naporu, bezwymiarowych współczynników oporu i liczb Re - dla różnych typów takich pomp. Z uwagi na to, że większość charakterystyk pomp osiowych przedstawia linię prostą, wystarczy obliczyć tylko dwa punkty charakterystyki. Otrzymane w badaniach wartości współczynników strat i współczynników oporu są zbliżone do takich współczynników dla rur i kanałów. Oznacza to, że założony proces przepływu jest właściwy i metoda może być wykorzystana do celów praktycznych.  
 J. Kolarzyk

## CZĘŚCI SILNIKÓW ODRZUTOWYCH

181\* 621-226.3:533.697 ILOt

Salamatın N. Je.: Profilowanie łopatek turbin, obiekajomych dozwołowym potokom. Profilowanie łopatek turbinowych opływających poddźwiękowym strumieniem. *Awiac. Tiechn., Izv. Wyssz. Uczebn. Zawied.*, 1959, nr 1, s. 95-104, rys. 5, tabl. 3, poz. bibl. 9.

Celem pracy było opracowanie uniwersalnej metody profilowania łopatek turbinowych. Opisana metoda odznacza się prostotą, a jednocześnie zapewnia utrzymanie palisad zgłębionych profili, których charakterystyki nie ustępują charakterystykom palisad profili stosowanych w biurach konstrukcyjnych. Profil otrzymujemy przez zginanie po łuku paraboli linii szkieletowej jednego z czterech wybranych, ujednoczonych symetrycznych profili.

J. Kolarzyk

182\* 621.45:621-135 ILOt

Czistjakow A. A.: K woprosu o metodikie naznaczenja dopuskow na nieurawnowieszennost' rotorow TRD. Ustalenie warunkow wyważania wirników turbodołrzutowych silników lotniczych. *Mosk. Awiac. Tiechn. Inst., Trudy Instituta*, 1959, nr 36, s. 34-53, rys. 13, poz. bibl. 10.

Wirujące części turbodołrzutowych silników lotniczych wywołują drgania konstrukcji silnika i płatowca. Drgania te są szkodliwe, gdyż powodują przedwczesne zużycie części silnika, jak również obciążają zmęczeniowo elementy konstrukcyjne silnika i płatowca.

W pracy silnika rozróżnia się drgania stałe, pochodzące od niewyważonych części wirujących i drgania przypadkowe, pulsujące, pochodzące od czynników zakłócających bieg silnika, takich jak nierównomierność smarowania łożysk, popadanie kondensatu mię-

Niniejszy Przegląd Dokumentacyjny zawiera jedynie część analiz dokumentacyjnych publikacji z zakresu lotnictwa. Pełna dokumentacja ukazuje się w postaci kart dokumentacyjnych wydawanych przez Centralny Instytut Dokumentacji Naukowo-Technicznej (Warszawa, Al. Niepodległości 188). CIDNT przyjmuje prenumeratę

dzy łopatkę wirnika, nierównomierność procesów spalania itp. Całkowite wyeliminowanie tak jednych jak i drugich drgań jest praktycznie niemożliwe. Stało się zatem koniecznością ustalenie takich warunków wyważania wirników turbodołrzutowych silników lotniczych, które zapewnią wymaganą trwałość tzn. czasookres pracy silnika do pierwszego remontu, przy możliwie najmniejszym wydatku kosztów jego produkcji. Chodzi więc o tzw. warunki minimalne, zapewniające minimum koniecznego wyważenia, co przy dużych obrotach współczesnych silników jest już bardzo trudnym zadaniem produkcyjnym.

M. Kwiatkowski

## OSPRZĘT I WYPOSAŻENIE SILNIKÓW ODRZUTOWYCH

183\* 621.45

Zienukow A. G.: Gazodynamiczeskoje riegulirowanie reaktiwnosopla TRD. Gazodynamiczna regulacja dyszy wylotowej silnika turbodołrzutowego. *Awiac. Tiechn., Izv. Wyssz. Uczebn. Zawied.* 1959, nr 1, s. 55-64, rys. 10, poz. bibl. 1.

Praca miała na celu zbadanie własności gazodynamicznej regulacji dyszy oraz ustalenie najkorzystniejszych form konstrukcyjnych i warunków pracy dyszy. Program prac obejmował: a) zbadanie wpływu na skuteczność regulacji: kąta nachylenia szczeliny dopływającej aktywne powietrze, szerokości szczeliny, oraz sposobu organizacji frontu aktywnego powietrza, b) zbadanie wpływu szerokości dyszy na skuteczność strumienia aktywnego powietrza.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają stwierdzić, że gazodynamiczna regulacja dyszy silnika odrzutowego, w określonych warunkach może być korzystna. Najbardziej skutecznym sposobem takiej regulacji jest oprowadzanie aktywnego powietrza poprzez dwa rzędy otworów rozmieszczonych pod kątem 90° do kierunku głównego strumienia.

J. Kolarzyk

kart dokumentacyjnych, która może obejmować zarówno całą dokumentację naukowo-techniczną, jak i oddzielne jej działy poszczególne zagadnienia i tematy techniczne. CIDNT wykonuje (za zwrotem kosztów) fotokopie i mikrofilmy publikacji objętych zarówno Przeglądem Dokumentacyjnym jak i kartami dokumentacyjnymi.

# Rynki Zagraniczne

Pismo poświęcone sprawom gospodarki światowej i handlu zagranicznego

Ukazuje się we WTORKI, CZWARTKI I SOBOTY

zamieszcza stałe rubryki: „Kraje, Towary, Rynek pieniężny, Ceny i Gieldy”

Wydaje Polska Izba Handlu Zagranicznego

Zamówienia na prenumeratę przyjmuje administracja: Warszawa, ul. Trębacka 4, pokój nr 3

Koszt prenumeraty półrocznej wynosi 72 zł • Konto PKO I OM-1-71-110069

NA ŻĄDANIE ADMINISTRACJA WYSYŁA NUMER OKAZOWY

WCT/698/B/60

c.d. ze str. 2 okładki

wykonywać nieco większe niż w metalach, zostawiając tyłko około 75% na pełną głębokość gwintu.

Noże profilowe mogą być normalne lub krążkowe przy średnicy nie przekraczającej 75% średnicy obrabianego materiału. Obróbkę należy prowadzić przy bardzo małym posuwie nie przekraczającym 0,012-0,025 mm. Zaszlifowanie ostrza podobnie jak dla mosiądzu, z nieco większym kątem  $\alpha$ .

Noże grzebieniowe winny mieć kąt przyłożenia  $\alpha = 33^\circ$  i ujemny kąt natarcia  $\gamma \leq 10^\circ$ . Przy toczeniu ostrze ustawia się na środek przedmiotu.

W przypadkach szczególnych obrabia się również gwinty na frezarce pionowej, przy czym zastosowanie specjalnych Frezów pozwalających na nacięcie całego gwintu przy jednym obrocie przedmiotu, poważnie konkuruje z prasowaniem gwintów.

Gwintowanie tworzyw warstwowych odbywa się zazwyczaj na sucho, można jednak dla głębszych otworów stosować chłodziwo składające się z 60% oleju gazowego i 40% nafty.

W odniesieniu do poszczególnych gatunków tworzyw sztucznych można dodać co następuje:

Przy obróbce fibry wulkanizowanej należy stosować jako chłodziwo olej parafinowy. Przy gwintowaniu twardych żywic PCV obok oleju można zastosować chłodzenie wodą; ten typ obróbki nie jest tu jednak w ogóle wskazany ze względu na dużą wrażliwość na działanie karbu.

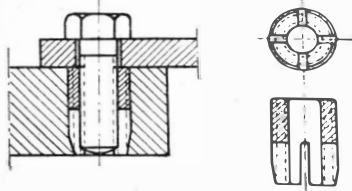
Tworzywa polistyrolowe pozwalają, z uwagi na wysoką wytrzymałość, nawet na nacinanie gwintów drobnozwojowych. Konieczne jest przy tym stosowanie intensywnego chłodzenia wodą lub sprężonym powietrzem.

Tworzywa polimetakrylowe dają gwinty bardzo czyste i pozwalają na stosowanie skoków od 0,5 mm w górę.

Jako ogólną uwagę należy przyjąć, że połączenia gwintowe w tworzywach sztucznych nie nadają się do częstego rozłączania z uwagi na łatwą możliwość uszkodzenia i nieznaczna wytrzymałość na ścinanie.

Jeśli wymagane jest połączenie przewidziane do częstego rozłączania i dość znacznie obciążone, należy stosować wkładki mosiężne, stalowe lub nawet ze stali hartowanej z gwintem szlifowanym. Jak widać na rys. 12 wykonane są one w ten sposób, że nacinają same gwint w otworze, a po wkręceniu normalnej śruby rozprężają się w otworze, dając wyjątkowo silne połączenie.

Rys. 12. Przy połączeniach gwintowych tworzyw sztucznych bardzo korzystne jest stosowanie specjalnych wkładek gwintowych.



## 8 Struganie

Normalne strugarki do metali nie nadają się do obróbki tworzyw sztucznych tym sposobem z uwagi na niemożność uzyskania odpowiednich szybkości skrawania. Struganie, względnie dłutowanie należy przeprowadzać przy największych możliwych dla tych maszyn szybkościach skrawania, stosując - zwłaszcza dla tworzyw warstwowych z wypełniaczem papierowym i tekstylnym - niezabarzo ostre i o gładko obrabionych krawędziach tnących. W większości przypadków konieczne jest stosowanie noży z nakładkami ze spieków twardych.

Niektóre tworzywa sztuczne np. drewno utwardzone, fibra oraz tworzywa z żywic polichlorowinyloowych (PCV) da się strugać na ciężkich strugarkach do drewna stosując wrzeciona wyposażone w 4 do 6 noży z ostrzami ze spieków twardych. Obróbka odbywa się przy wysokich obrotach i małych posuwach.

Stosuje się również nacinanie kół zębatych metodą obwiedniową. Nie jest wówczas konieczne prowadzenie najpierw strugania zgrubnego, a następnie wykańczającego. Obróbka odbywać się winna przy szybkości 120 skoków/min, przy małym posuwie. Nacinane koło po-

winno spoczywać na drewnianym lub żeliwnym podkładzie dla zapobiegnięcia nadłupywaniu się krawędzi zęba, przy wychodzeniu noża z obrabianego materiału. Chłodzenie nie jest konieczne, w szczególnych jedynie przypadkach można stosować wodę.

W zamieszczonej niżej tabeli 9 zebrane są warunki obróbki tworzyw sztucznych metodą strugania.

Tabela 9 Parametry obróbki tworzyw sztucznych metodą strugania

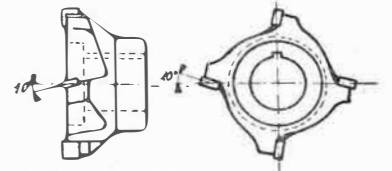
Materiał	Nóż ze stali szybko tnącej						Nóż z nakładką ze spieków twardych						Uwagi		
	Skrawanie zgrubne			Skrawanie wykańczające			Szybkość skrawania m/min		Posuw mm/skok		Szybkość skrawania m/min			Posuw mm/skok	
	$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$	$\gamma^\circ$	$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$	$\gamma^\circ$		$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$
Tworzywa jednorodnie	Zywicę polimetakrylową (plexiglas)	3-6	5-12	0-10	4-8	0-10	0-10	15-25	0,2-0,5	3-6	0-10	0-10	60-75	0,2-0,8	Kąt $\beta$ możliwie duży dla lepszego odprowadzenia ciepła
	Zywicę polichlorowinylową (winidur)	8-10	15-20	20	10-12	10-20	20	15-25	0,2-0,5	8-10	10-20	20	50-70	0,2-0,8	Głębokość warstwy przy struganiu zgrubnym ograniczona energią ostrza; obrabianie go przedmiot
Tworzywa warstwowe	Papier utwardzony (gumoid)	8-12	10-16	6	6-13	10-12	-	-	-	5-8	15-20	-	-	-	Wymagane bardzo ostre ostrza tnące. Kąt $\lambda = 36^\circ$
	Drewno utwardzone (lignofol)	-	-	-	-	-	-	15-20	0,6-0,8	-	-	-	25-40	0,2-1,0	-
Tworzywa z wypełn. azbestowym i szklanym	Tkanina utwardzona (textolit)	10-12	14-28	6	8-10	16-22	-	-	-	6-10	22-30	-	-	-	-
	Tworzywa z wypełn. azbestowym i szklanym	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15-25	0,25-0,4	Narzędzie łatwo się tępi.

## 9 Frezowanie

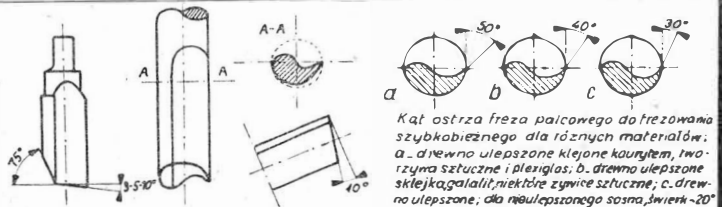
Frezowanie jest jedną z najczęściej stosowanych metod obróbki wiórowej tworzyw sztucznych termoutwardzalnych. Do obróbki stosować można frezarki uproszczone.

Przy obróbce tworzyw z wypełniaczem z włókna szklanego lub azbestu można stosować narzędzia ze stali szybko tnącej tylko dla małych serii, dla większych natomiast - z nakładkami ze spieków twardych. Najkorzystniej pracują frezy o zębach spiralnych; stosuje się też często głowice frezarskie (rys. 13)

Rys. 13. Głowica frezarska z ostrzami ze spieków zaszlifowanymi na ujemny kąt przyłożenia  $10^\circ$



Jeśli zachodzi konieczność stosowania frezów palcowych, należy zwrócić uwagę, aby ilość ostrzy tnących była większa, niż dla obróbki drewna. Pożądane jest stosowanie czterech ostrzy tnących. Możliwa i zalecana jest praca specjalnymi jednoostrzowymi frezami palcowymi (rys. 14) na szybkoobrotowych frezarkach z górnym wrzecionem.



Rys. 14. Jednoostrzowy frez palcowy dla szybkoobrotowych frezarek z górnym wrzecionem.

Przy obróbce tworzyw warstwowych należy przyjmować kierunek obróbki zgodny (równoległy) z kierunkiem przebiegu warstw wypełniacza. Korzystne jest również, aby kierunek obrotów narzędzia dawał wypadkową sił skrawania wzdłuż kierunku materiału. Jeśli w specjalnych przypadkach zachodzi potrzeba skrawania w kierunku prostopadłym do układu warstw wypełniacza, co ma

c.d. na str. 4 okładki

**Czytelnicy! Członkowie Sekcji Lotniczej SIMP!**

Bierzcie udział w układaniu tematyki naszego czasopisma.

Nadsyłajcie zgłoszenia na tematy, które Was interesują.



miejsce na przykład przy nacinaniu koł zębatach, to należy przeciwdziałać tendencjom rozrywania tworzywa przez zastosowanie nakładek z twardego drewna i silne zaciśnięcie przedmiotu. Stosuje się też frezowanie koł zębatach z półfabrykatu o większej średnicy uzyskując ostateczną, przez toczenie.

Na frezarkach normalnych zaleca się, w zależności od materiału narzędzia, stosowanie parametrów obróbki zebranych w tabeli 10.

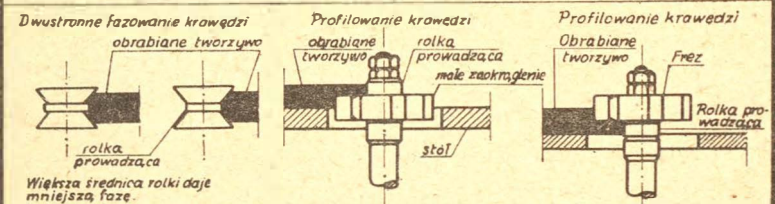
**Tabela 10** Parametry obróbki tworzyw sztucznych z wypełniaczem metodą frezowania

Materiał narzędzia	Szybkość skrawania m/min.	Posuw mm/obr.	Kąty narzędzia	
			$\alpha^\circ$	$\gamma^\circ$
Stal szybkościowa	40-50	0,5-0,8	20-30 <small>niekiedy stosuje się do ujemnie do 40°</small>	20-25
Węglik spiekane	200-300			

Przy obróbce tworzyw z wypełniaczem z tkaniny bawełnianej dopuszcza się maksymalne osiągalne obroty wrzeciona i posuwy nie większe od 500mm/min.

Tworzywa z żywic polichlorowinylnych i polimetaakrylowych, zarówno jednorodne, jak i z wypełniaczem papierowym lub bawełnianym, można obrabiać również na frezarkach do drewna. Frezowanie kanałów prostokątnych lub obróbka według wzornika przebiega najlepiej przy stosowaniu frezów o 6 do 10 ostrzach, przy szybkości skrawania około 2000 m/min. Frezy o średnicach 20 do 125 mm pracować powinny z szybkością od 600 do 1500 m/min. Ostrza kształtuje się najczęściej normalnie stosując kąty: przyłożenia  $\alpha=10-15^\circ$  oraz natarcia  $\gamma=0-10^\circ$ . Przy obróbce rowków korzystniejsze jest takie ukształtowanie narzędzia, aby czoło freza miało zęby o krawędziach leżących na powierzchni lekko wklęsłego stożka. Zapobiega to zadzierniu i grzaniu się obrabianego materiału.

Przykłady kształtowania krawędzi przedmiotów z tworzyw sztucznych pokazane są na rys. 15.



Rys. 15. Przykłady kształtowania krawędzi przedmiotów z tworzyw sztucznych przy użyciu normalnych frezarek do drewna.

Z uwagi na uniwersalność, taniąść narzędzi i wydajność skrawania, szczególne znaczenie w obróbce tworzyw sztucznych metodą frezowania ma stosowanie frezarek szybkoobrotowych z górnym wrzecionem. Obrabiarki te dysponują obrotami rzędu 12000 do 18000 obr/min. Wykorzystując więc dolny zakres uzyskujemy szybkość skrawania rzędu 800-1000 m/min.

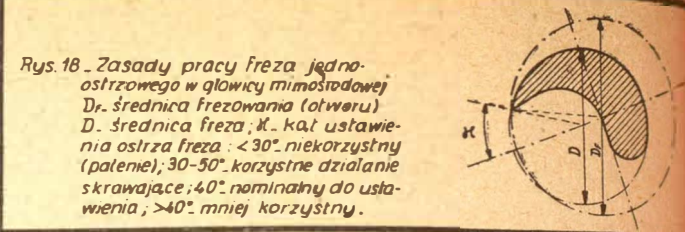
Używa się frezów jednopalcowych małej średnicy wykonanych całkowicie ze spieków twardych (do średnicy 7,5-9 mm), wzięte z nakładkami ze spieków przy średnicach większych (9,5-22 mm), pracujących w mimośrodowej głowicy (rysunek 16). Zaletą ich jest łatwość ostrzenia i nastawienia właściwego kąta skrawania, a także łatwość nastawiania po ostrzeniu na poprzednią średnicę frezowania, co dla obróbki metodą kopiowania jest warunkiem podstawowym. Przy narzędziach innego typu jest to niemożliwe do spełnienia.

W tabeli 11 zebrane są warunki nastawiania frezów palcowych jednoostrzowych, mocowanych w głowicach mimośrodowych. Uzupełnieniem jest rys. 18.

Należy dodać, że stosuje się również obróbkę na frezarkach szybkoobrotowych frezami dwuostrzowymi (rys. 17).



Rys. 17. Przykład freza palcowego dwuostrzowego



**Tabela 11** Dane liczbowe do ustawiania narzędzia (frez jednoostrzowy) frezarek szybkoobrotowych z górnym wrzecionem

Średnica frezowana Df mm	Średnica narzędzia D mm	Wielkość głowicy Nr	Kąt nastawienia $\alpha^\circ$	Df mm	D mm	Nr	$\alpha^\circ$	Df mm	D mm	Nr	$\alpha^\circ$
3,5	3	1/2	45	12,5	10	3	37	21,5	17	6	52
4	3	1 1/2	45	13	10,5	3	40	22	17	7	52
4,5	3,5	1 1/2	45	13,5	11	3	38	22,5	17	7	43
5	4	1 1/2	45	14	11	4	48	23	18	7	51
5,5	4,5	1 1/2	45	14,5	11	4	33	23,5	18	7	43
6	5	1 1/2	45	15	12	4	47	24	18	8	43
6,5	5	2	48	15,5	12	4	34	24,5	18	8	42
7	5,5	2	48	16	13	4	47	25	19	8	43
7,5	6	2	47	16,5	13	4	33	25,5	19	8	42
8	6,5	2	47	17	13	5	43	26	19	9	47
8,5	7	2	46	17,5	14	5	53	26,5	19	9	40
9	7	2 1/2	42	18	14	5	43	27	20	9	46
9,5	8	2	46	18,5	15	5	52	27,5	20	10	50
10	8	2 1/2	42	19	15	5	42	28	20	10	45
10,5	8	3	39	19,5	15	6	48	28,5	20	10	46
11	8,5	3	40	20	15	6	40	29	20	10	30
11,5	9	3	38	20,5	16	6	48	29,5	22	10	43
12	9,5	3	40	21	16	6	39	30	22	10	45

Obróbkę na frezarkach szybkoobrotowych prowadzi się z reguły na sucho, jednak bardzo korzystne jest zastosowanie chłodzenia narzędzia przez strumień sprężonego powietrza. Ponadto konieczne jest stosowanie wyciągów dla usuwania dużej ilości skrawanych wiórów ze względu na szkodliwość pyłów powstałych przy obróbce tworzyw sztucznych.

Szczegółowe warunki obróbki frezowaniem tworzyw sztucznych dobiera się w zależności od rodzaju materiału, biorąc również pod uwagę kształt przedmiotu i wymaganą gładkość obrabianej powierzchni. Odpowiednie wskazówki w tym względzie zebrane są w tabeli 12.

**Tabela 12** Warunki obróbki tworzyw sztucznych metodą frezowania

Materiał obrabiany	Narzędzie Rodzaj	Kąty narzędzia		Szybkość skrawania m/min	Posuw mm/obr.	Uwagi
		$\alpha^\circ$	$\gamma^\circ$			
Drewno utwardzone	ostrza ze stali SS ostrza ze spieków, frezy tarczowe i walcowe o dużej podziałce zębów	18-25	20-30	100-150	0,6-1	chłodzenie spręż. powietrzem
				200-300		
Fibry wulkanizowane	frezy modułowe ostrza ze stali SS ostrza ze spieków			40-50 100-150	1,0	przy obróbce koł zębatach
Zywiec melaminowe	ostrza ze spieków	20-30	10-13	$\leq 800$		
Zywiec fenolowe						Należy zwracać uwagę na możliwość tych materiałów na zwielenie karbu. Wrazie możliwości zastosować szlifowanie.
Zywiec na bazie polichlorowinylny	narzędzia ze stali szybkościowej z dużą podziałką zębów narzędzia z ostrzami ze spieków do obróbki spoin	25-30	25	1000	0,3	Dla tych materiałów frezowanie jest obróbką najbardziej zwaną. Głębokość wióra ograniczona jest jedynie sztywnością narzędzia. Ostrzami stosuje się też ostrza z 10-12 mm F.O uzyskując bardzo gładką powierzchnię po obróbce, która jest w tym przypadku rzadziej niż w przypadku nie skrawania.
Zywiec etoksylinowe	ostrza ze spieków		17			Przy obróbce tworzyw z wypełniaczem kwarcowym stosuje się natarcia $\gamma=0^\circ$ .
Zywiec poliamidowe	ostrza ze spieków	25-30	25	$\leq 1000$	0,3	Materiał z uwagi na ciągliwość wymaga bardzo ostrzych krawędzi tnących.

c.d. w numerze 4/60

Za granicą czasopisma techniczne oraz wszystkie inne czasopisma polskie zamawiać można w Przedsiębiorstwie Eksportu i Importu „RUCH”, Warszawa, ul. Wilcza 46, skrót telegraficzny „Exprimruch” - Warszawa, konto bankowe: Narodowy Bank Polski, Warszawa, ul. Warecka 10, nr 2-6-71.