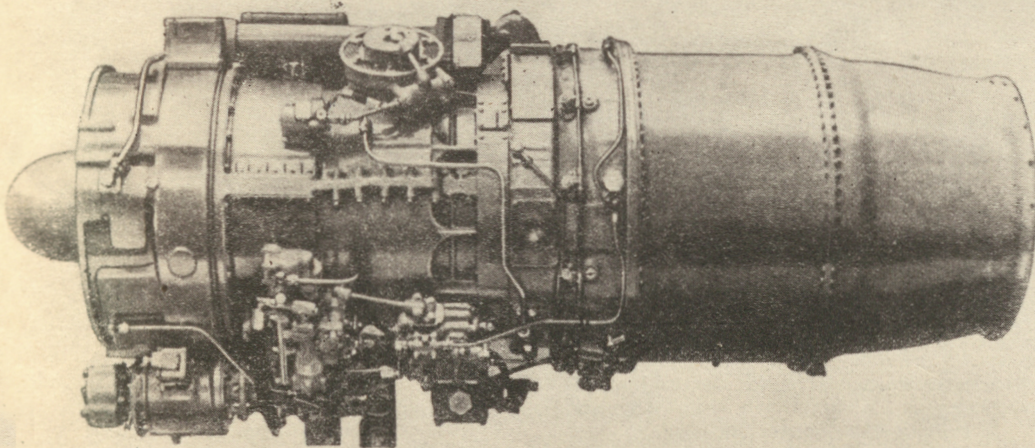


TECHNIKA LOTNICZA



7

/3

1963

WYDAWNICTWA
CZASOPISM
TECHNICZNYCH NOT

POMOCE KONSTRUKTORSKIE „TECHNIKI LOTNICZEJ“

Materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych

Zebrała i opracowała mgr inż. E. Lewalska

Opory interferencyjne

Wstęp

Interferencją nazywa się w aerodynamice wzajemne oddziaływanie na siebie dwu lub więcej ciał, znajdujących się pod wpływem wiatru. Badania różnych brył oraz ich zespołów w tunelach aerodynamicznych wykazały, że istnieje różnica między oporem zespołu brył a sumą ich oporów, gdy znajdują się one w dostatecznej od siebie odległości i nie wpływają na siebie wzajemnie. Różnicę tę nazwano oporem interferencyjnym.

Badania doświadczalne wykazały, że wartość oporów interferencyjnych zależy od:

- 1) geometrii brył badanych,
- 2) położenia jednej bryły względem drugiej,
- 3) oprofilowania przejścia jednej bryły w drugą.

Z rys. 1.1 opublikowanego przez Kármána, można zauważyć, że opór interferencyjny zmienia znak w zależności od położenia jednej bryły względem drugiej.

Szczególnie ważnym problemem jest właściwa geometria samolotów szybkich, gdyż przy niewłaściwych połączeniach dwu brył, mogą powstawać opory interferencyjne falowe, wynikające z pojawienia się fal uderzeniowych w miejscu połączenia. Skutki niewłaściwego oprofilowania połączeń dwu brył w samolotach szybkich są następujące:

- 1) znaczny wzrost oporu,
- 2) wzrost krytycznej liczby Macha.
- 3) intensywniejszy wzrost oporu po przekroczeniu Ma kryt.

Interferencja skrzydło-kadłub

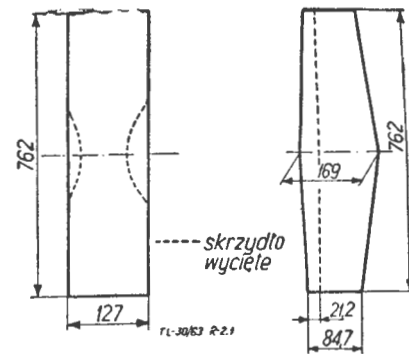
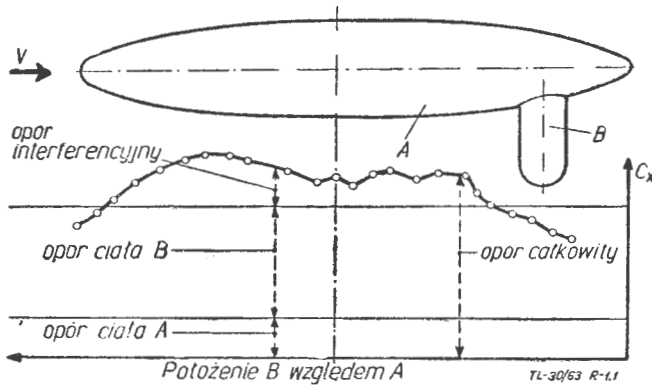
Największy wpływ na wartość oporu interferencyjnego samolotu ma oddziaływanie wzajemne skrzydło-kadłub. Z tego powodu największą ilość badań tunelowych poświęcono interferencji skrzydło-kadłub. Bardzo szczegółowe badania tego zjawiska były przeprowadzone w laboratorium NACA.

Do badań wzięto kilka rodzajów płatów:

- 1) płaty prostokątne o profilach: NACA 0012, NACA 4412, i NACA 23012. Tak dobrane profile pozwalają ustalić wpływ wygięcia linii środkowej profilu, na wartość i rodzaj interferencji;
- 2) płat trapezowy o profilu przechodzącym od NACA 0018 u nasady płata do NACA 0009 na końcach.

Wymiary płatów są podane na rys. 2.1. Powierzchnia wszystkich płatów jest taka sama i wynosi $0,097 \text{ m}^2$.

Wszystkie podane niżej współczynniki są odniesione do powierzchni płata



TREŚĆ ZESZYTU

Zadania Konferencji Naukowo-Technicznej SIMP	
W. R. GUNDLACH, R. PRZYBYLSKI — Zagadnienie prac badawczych w dziedzinie silników turbinowych	165
E. TULISZKA — Naprężenia termiczne w chłodzonych strumieniem powietrza tarczach wirnikowych turbin gazowych	166
M. KARLIŃSKI, E. SOBOCIŃSKI — Stopy aluminium stosowane na elementy sprężarek silników turbinowych	176
J. CHODOROWSKI — Stopy żarowytrzymałe na podstawie niklu	183
W. KLUZ — Zagadnienia technologiczne odlewania łopatek i wirników turbin z materiałów żaroodpornych	188
Na półkach księgarskich	195
Pomoce Konstruktorskie Techniki Lotniczej: mgr inż. E. LEWALSKA — Opory interferencyjne . . . II okł.	

CONTENTS

Editorial	page 165
W. R. GUNDLACH, R. PRZYBYLSKI — Research trends in gas turbine engines	166
E. TULISZKA — Thermal stresses in the air-cooled rotor discs of gas turbines	168
M. KARLIŃSKI, E. SOBOCIŃSKI — Alloys used for compressors of gas turbine engines	176
J. CHODOROWSKI — Heat-resisting nickel-base alloys	183
W. KLUZ — Manufacturing problems of blade and disc castings of heat-resisting materials for gas turbines	188
On Bookseller's Shelves	195
Designer's Data Sheets — E. LEWALSKA: Interference drag on cover	

СОДЕРЖАНИЕ

Передовица	165
В. Р. ГУНДЛЯХ, Р. ПРЫБЫЛЬСКИ — Исследовательские работы в области газотурбинных двигателей	166
Е. ТУЛИШКА — Термическое напряжение в охлаждаемых потоком воздуха дисках роторных газовых турбин	168
М. КАРЛИНСКИ, Е. СОБОЦИНСКИ — Сплавы применимые на элементы компрессоров турбинных двигателей	176
Й. ХОДОРОВСКИ — Жароупорные сплавы на основании никеля	183
В. КЛЮЗ — Технологические проблемы литья лопастей и роторов турбин из жароупорных материалов	188
На книжных полках	195
Конструкторские пособия Авиационной Техники маг. вж. Е. ЛЕВАЛЬ-СКА — Интерференционные сопротивления	II обл.

TECHNIKA LOTNICZA — miesięcznik Sekcji Lotniczej Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich
Wydawnictwa Czasopism Technicznych NOT. Redaguje Kolegium: mgr inż. Stefan Sulikowski — redaktor naczelny, Jarosław Berzyńska — sekretarz redakcji, mgr inż. Antoni Gołędzinowski, mgr inż. Walerian Kordziński, mgr inż. Stanisław Lassota, mgr inż. Waclaw Zaremba — redaktorzy działowi

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

Adres Administracji: Administracja Czasopism Technicznych NOT, Warszawa, ul. Czackiego 3/5, tel. 6-74-61.

Cena pojedynczego zeszytu 12.— zł

Prenumerata roczna 144.— zł

Półroczna 72.— zł

PKO Warszawa, konto 1-9-121697 WCT. Zakład kolportażu, Warszawa, ul. Mazowiecka 12.



TECHNIKA LOTNICZA

MIESIĘCZNIK SEKCJI LOTNICZEJ STOWARZYSZENIA
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW MECHANIKÓW POLSKICH

ROK XVIII

LIPIEC 1963 R.

ZESZYT 7

Inż. ZBIGNIEW NADRATOWSKI
Dyrektor Techniczny WSK — Rzeszów

Zadania konferencji naukowo-technicznej SIMP „Technologia wytwarzania przepływowych maszyn wirnikowych“ Rzeszów, wrzesień 1963 r.

W celu zapoznania uczestników konferencji „Technologia wytwarzania przepływowych maszyn wirnikowych” z niektórymi referatami jeszcze przed ich wygłoszeniem — „Technika Lotnicza” zamieszcza te referaty na łamach niniejszego zeszytu.

Redakcja

Doświadczenia, zebrane w czasie szeregu lat intensywnego rozwoju napędów turbinowych, wykazały szereg ich zalet, dzięki którym mogą z powodzeniem rywalizować z silnikami tłokowymi, a nawet wypierać je. Uwidocznili się to zwłaszcza w zakresie agregatów większej mocy, zespołów pomocniczych oraz specjalnych, tam gdzie decydującym czynnikiem wyboru napędu były takie cechy napędów turbinowych, jak duża moc z jednostki ciężaru, małe gabaryty itp.

Szczególnie intensywny rozwój i coraz szersze zastosowanie w nowych dziedzinach techniki wykazuje spalinowy silnik turbinowy, pozbawiony całego balastu instalacji kotłowych turbin parowych i umożliwiający dalszy postęp w nowoczesnych konstrukcjach.

Obecnie, techniczno-ekonomiczna analiza napędów turbinowych — mimo jeszcze wielu problemów nadal nie rozwiązanych, które ograniczają ich stosowanie — pozwala z całą pewnością stwierdzić, że udział napędów turbinowych będzie stale wzrastać.

Jednym z podstawowych warunków ograniczających szerokie stosowanie napędów turbinowych — szczególnie spalinowych silników turbinowych — jest wysoki koszt ich wytwarzania. Temu problemowi poświęcono konferencję naukowo-techniczną pt. „Technologia wytwarzania przepływowych maszyn wirnikowych”, która odbędzie się we wrześniu br. w Rzeszowie.

Zdając sobie sprawę z obszerności tematu, dysponując zaledwie trzydniowym czasem pracy samej konferencji i nie chcąc rozpraszać uwagi uczestników, organizatorzy zmuszeni byli temat konferencji ograniczyć do zagadnień związanych głównie z wytwarzaniem najdroższego zespołu maszyn wirnikowych, to jest pędni, której udział w kosztach jest bardzo wysoki, sięgający — w zależności od typu i stosowanych procesów technologicznych — od 10 do 50% kosztu całego urządzenia.

Ponieważ produkcją maszyn wirnikowych zajmują się w mniejszym lub większym stopniu każde z państw socjalistycznych, wymiana doświadczeń w tym zakresie

i ewentualnie podziału pracy pod kątem specjalizacji pozwoli na zmniejszenie zakresu prac tak bardzo kosztownych i pracochłonnych.

Dotychczasowe informacje na ten temat, zdobywane wyrywkowo przy różnych okazjach, były fragmentaryczne, nie pozwalały na prawidłową ocenę procesów technologicznych pod względem możliwości i celowości ich zastosowania. Przykładowo — znane są kierunki obniżenia pracochłonności i zużycia materiału drogą precyzyjnego kucia łopatek turbiny i sprężarki. Sprawa wydawałaby się na pozór prosta, a jednak wymagała — w naszych warunkach — dla opanowania około dwuletniego okresu czasu w zespole kilkunastu pracowników. Podobnie pracochłonne i kosztowne są inne procesy, jak na przykład odlewanie precyzyjne wirników integralnych i obróbka elektroerozyjna łopatek.

Na pewno każda z tych metod ma swoje zalety i wady, ograniczenia i wymagania, wybranie jednak najważniejszej wiąże się z głęboką znajomością tych procesów i prawidłową ich analizą ekonomiczną.

Celem zorganizowanej konferencji „Technologia wytwarzania przepływowych maszyn wirnikowych” jest wzajemne zapoznanie się z procesami technologicznymi stosowanymi w zakładach produkcyjnych i placówkach naukowych, wymiana dotychczasowych doświadczeń i ustalenie programu dalszej współpracy.

Dotychczasowe wyniki tego rodzaju współpracy gospodarczej wspólnoty państw socjalistycznych są wyrazem prawidłowości rozwoju światowego systemu socjalizmu, dającej pewną podstawę do osiągnięcia przez konferencję zamierzonego celu.

Zdajemy sobie doskonale sprawę, że wymiana doświadczeń jest możliwa jedynie w warunkach szczerzej współpracy, gdzie dążeniem każdego z uczestników będzie danie maksymalnego wkładu, zmierzającego do zapewnienia rozwoju i osiągnięcia wysokiego poziomu nie tylko we własnym państwie, ale przede wszystkim w całej wspólnocie socjalistycznej.

Zagadnienie prac badawczych w dziedzinie silników turbinowych

Dziedzina silników turbinowych jest dobrym przykładem powiązania działalności placówek przemysłowych i naukowo-badawczych różnych typów oraz wpływu badań naukowych na efekty uzyskiwane w wytwórniach. Prace badawcze mają tutaj szczególne znaczenie, gdyż silniki turbinowe, pomimo prostej zasady pracy i przemiany energii, wymagają rozwiązania wielu problemów teoretycznych, konstrukcyjnych i technologicznych. W początkowym okresie rozwój tych silników warunkowały głównie badania przepływowe. W pracach nad rozwojem układu o obiegu półotwartym (Sulzer) i zamkniętym (Escher Wyss) istotną rolę odegrały poważne teoretyczne opracowania z zakresu regulacji. Przez cały okres rozwoju, a także obecnie, postęp w budowie silników turbinowych warunkują także badawcze prace metaloznawcze, które pomimo stałego osiągania coraz lepszych wyników są jeszcze dość daleko od celu ostatecznego.

Występowanie znacznej liczby poważnych problemów przy budowie silników turbinowych doprowadziło do ścisłej specjalizacji niektórych placówek badawczych i zakładów przemysłowych (np. Lucas, Dowty), do kooperacji pomiędzy wytwórniami, a także do wspólnych badań, prowadzonych przez różne placówki. Znamienne jest, że ta współpraca ma już obecnie charakter międzynarodowy i to nie tylko w zakresie podstawowych i stosowanych badań naukowych, ale nawet przy rozwiązywaniu konstrukcji poszczególnych silników. Jednym z przykładów jest budowa okrętowego zespołu o mocy 18 000—22 000 KM na zamówienie rządu NRF we współpracy angielsko-szwajcarsko-niemieckiej przez wytwórnię Bristol Siddeley Engines Ltd i Brown Boveri, Mannheim.

Wśród dróg rozwoju konstrukcji silników turbinowych w różnych wytwórniach wyróżniają się dwa zasadnicze sposoby. Pierwszy polega na możliwie szybkim dojściu do konstrukcji prototypu w oparciu o teoretyczną analizę pracy podzespołów i zespołu lub o wzorcu. Drugi sposób, bardziej nowoczesny, odznacza się dłuższym okresem wstępnym, który przeznaczony jest na szczegółowe opracowanie każdego podzespołu przez badania i wprowadzenie wynikających z nich zmian konstrukcji. Montaż zespołu następuje dopiero po uzyskaniu wymaganych cech podzespołów.

Jest oczywiste, że pewniejszy i na ogół — poza wyjątkowymi przypadkami szczęścia lub dobrej licencji — także szybszy jest ten ostatni sposób, gdyż stwarza możliwości wprowadzenia do silnika elementów stanowiących rzeczywisty postęp techniczny, przez co prowadzi do uzyskania poprawnej konstrukcji i daje solidne, wszechstronne podstawy do prac nad dalszymi udoskonaleniami i nad następnymi silnikami. Przegląd wykonanych na świecie silników turbinowych wyraźnie to potwierdza, a wytwórnie, jak na przykład Airresearch, Chrysler, Ford, Rover¹⁾ mają poważne osiągnięcia w dziedzinie silników o wyjątkowych, trudnych do realizacji cechach. Inne wytwórnie, jak Breda, Centrax, Fiat — przyjęły sposób stwarzający pozory szybkiego dojścia do wyniku końcowego, który nie okazał się pomyslny. Pierwszy z podanych sposobów może być w zasadzie stosowany tylko w przypadku budowy silników w oparciu o licencję.

Sytuacja w Polsce

Pierwsze lotnicze silniki turbinowe wykonywane były w Polsce ściśle według licencji i sytuacja taka nie zmuszała przemysłu do prowadzenia prac badawczych.

¹⁾ Celowo podano wytwórnie zajmujące się nowymi, trudniejszymi do realizacji — w porównaniu z typowymi lotniczymi — zastosowaniami silników turbinowych.

Jednak Instytut Lotnictwa, poza doraźną pomocą dla zakładów, uwzględnił w swoich planach i realizował przygotowania do podjęcia prac badawczych związanych z nowymi konstrukcjami. Zakłady przemysłowe także zaczęły stopniowo przejawiać zainteresowanie opracowywaniem konstrukcji i niektórymi badaniami. Sytuację w zakresie prac badawczych w przemyśle lotniczym można uważać obecnie — zakładając ograniczone plany rozwojowe — za pomyślną.

W odniesieniu do innych zastosowań silników turbinowych podjęto także — i to stosunkowo nawet bardzo wcześnie — prace badawcze. Instytut Techniki Ciepłej w Łodzi zajął się już w latach 1949/50 zespołami energetycznymi i przemysłowymi, a Katedra Ciepłych Maszyn Przemysłowych Politechniki Łódzkiej — silnikami trakcyjnymi i przenośnymi małej mocy oraz wcześniej turbinowymi zespołami ładującymi tłokowe silniki spalinowe.

Instytut Techniki Ciepłej zbudował zespół doświadczalny o mocy 1000 kW, uruchomiony w 1957 r. oraz 9 stoisk badawczych elementów silnika. Osiągnięcie to nie zostało wykorzystane, gdyż na skutek braku skonkretyzowanych planów rozwojowych naszego przemysłu maszynowego oraz braku zainteresowania ze strony potencjalnych użytkowników przerwane zostały prace badawcze, a zespół fachowców, którzy zdobyli cenne doświadczenie w bardzo trudnych warunkach pracy — rozproszony. Silnik ITC stoi obecnie zupełnie nie wykorzystywany, a stoiska badawcze zostały zdemontowane.

Katedra Ciepłych Maszyn Przepływowych PŁ prowadziła prace teoretyczne i konstrukcyjne dotyczące silników turbinowych jedno- i dwuwałowych małej i średniej mocy o konkretnym przeznaczeniu. Jednocześnie zostało zbudowane laboratorium, w którym prowadzone są prace badawcze nad elementami zespołów oraz podstawowe prace badawcze związane z rozwojem i ulepszeniem tych zespołów. W Katedrze CMP znajduje się zespół pracowników, zajmujących się pracami teoretycznymi, konstrukcyjnymi i badawczymi w dziedzinie silników turbinowych. W roku bieżącym zostanie zakończona w WSK budowa najnowszej z realizowanych konstrukcji Katedry CMP: pożarniczego turbinowego zespołu pompowego.

W ostatnich latach do prac badawczych nad problemami silników turbinowych włączył się także Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku oraz w nieco węższym, wycinkowym zakresie także Instytut Techniki Ciepłej Min. Szkolnictwa Wyższego w Warszawie i kilka innych katedr różnych politechnik.

Najważniejsze problemy badawcze

Przedstawione zostaną główne problemy badawcze w dziedzinie silników turbinowych, które powinny być rozwiązane. Dla zapewnienia właściwego rozwoju i stałego postępu w budowie silników wymagana jest ciągła, dalekosiężna praca badawcza nad większością podanych problemów.

Zagadnienia przepływowe — wieńce sprężające osiowe i promieniowe, wieńce rozprężające osiowe i promieniowe, króćce wlotowe i wylotowe (filtry, tłumiki), kanały.

Chłodzenie części silnika — chłodzenie kierownic, wirników i kadłubów; odkształcenia.

Uszczelnienia — zjawiska występujące w różnych specjalnych konstrukcjach uszczelnień labiryntowych i innych.

Komory spalania — zjawiska przepływu i spalania dla różnych typów komór spalania, wtryskiwaczy i paliw, ze szczególnym uwzględnieniem przebiegów nieustalonych w czasie i niby-ustalonych.

Układy zasilania paliwa — zagadnienie regulacji, wpływ zmiany paliwa.

Paliwa i smary — badanie właściwości, sposoby przygotowywania i ulepszenia.

Wymiana ciepła — wymienniki rekuperacyjne i regeneracyjne.

Materiały konstrukcyjne — materiały żarowytrzymałe, wysokowytrzymałe stopy lekkie na bazie aluminium, tytanu a także magnezu.

Łożyska wysokoobrotowe toczone i ślizgowe — luzy, stabilizacja, trwałość, zamocowanie, temperatury, smarowanie i chłodzenie.

Przekładnie wysokoobrotowe — konstrukcja, gabaryty, ciężar, smarowanie, trwałość, cichobieżność.

Dynamika elementów i zespołów — drgania własne i wymuszone, wyważanie, obroty krytyczne, wpływ sztywności podpór i filmu olejowego, wirniki wielokrotnie podparte i przewieszane, przesunięcia i odkształcenia, naprężenia.

Zakresy badań

Prace badawcze nad problemami nowoczesnej techniki i fizyki wymagają wielotorowej pracy zespołowej. Praca twórcza w coraz mniejszym stopniu zależy od inwencji jednostki, a w coraz większym od odpowiedniej organizacji zespołowej pracy kompleksowej ludzi o różnorodnych uzdolnieniach i specjalizacjach.

Prace naukowo-badawcze i ich właściwy rozwój stają się czynnikiem decydującym częstokroć nie tylko o dobrobycie, ale o egzystencji państw i narodów. Działalność na polu nauki i techniki, zapewnienie właściwej równowagi między kosztowną pracą badawczą a jej przewartościowywaniem przez rozwijający się przemysł, intensywne celowe popieranie pracy badawczej tam, gdzie daje ona efekty doraźne, a równocześnie buduje trwale podwaliny dalszego rozwoju nauki, jest jednym z naczelných zadań nowoczesnego organizmu państwowego.

W raporcie opracowanym przez UNESCO na polecenie Zgromadzenia Ogólnego ONZ wprowadzono w dziedzinie nauk ścisłych podział badań na trzy grupy: podstawowe wolne i skierowane, stosowane, techniczne. Określenie charakteru badań pozwala na dokonanie podziału zadań między odpowiednie placówki badawcze. Zadania wynikają z podanej wyżej problematyki w sposób zgodny z zasadniczymi liniami rozwoju prac naukowo-badawczych kraju, uzasadniony z punktu widzenia ekonomicznego i zapewniający szybkie trwałe osiągnięcia.

Badania podstawowe wolne — prowadzone indywidualnie przez uczonęgo w dowolnie obranej dziedzinie według własnego programu i własnymi metodami; wyniki perspektywiczne. Ten rodzaj badań w zasadzie nie ma już prawie znaczenia w dziedzinie silników turbinowych, dziedzinie dość wyraźnie zarysowanej i swęgo czasu rozwijanej właśnie w oparciu o tego typu pracę twórczą.

Badania podstawowe skierowane — prowadzone zespołowo; koncentrują się świadomie wokół określonego problemu; swobodny wybór metody i programu badań; wyniki ogólne z praktycznym zastosowaniem w dalszej przyszłości. Według raportu prowadzenie tych badań jest możliwe ze względów ekonomicznych tylko w wielkich zakładach przemysłowych, zatrudniających ponad 10 tysięcy osób; można dać charakterystyczne przykłady: General Electric, Westinghouse. Mniejsze zakłady muszą współpracować z wyższymi uczelniami lub instytucjami specjalistycznymi, mającymi kontakt na ogół z większą liczbą zakładów przemysłowych.

Badania te mogą dotyczyć wszystkich wymienionych wyżej problemów w silnikach turbinowych, lecz nie wiążą się z określoną konstrukcją. Dają one ogólne, dalekosiężne rozwiązania z możliwością wykorzystania w przyszłych konstrukcjach, jednak wybiegające daleko przed potrzeby wysuwane przez konstruktorów i wytwórcę. Badania podstawowe skierowane powinny być prowadzone w Polsce przez placówki uczelniane oraz instytuty PAN.

Badania stosowane — prowadzone zespołowo; cel i program określone przez zleceniodawcę; krótki termin praktycznego zastosowania. Rozwiązanie zagadnień z podanej problematyki w nawiązaniu do przewidywanej konstrukcji w celu dostarczenia materiałów projektantom.

Badania stosowane powinny być prowadzone w kraju przede wszystkim przez instytuty przemysłowe, które są specjalnie w tym celu tworzone, a także przez placówki uczelniane.

Badania techniczne — prowadzone zespołowo; dziedzina i program pracy określone przez zleceniodawcę; zastosowanie wyników badań podstawowych i stosowanych do produkcji przemysłowej; krótkie terminy wprowadzania wyników do produkcji.

Badania elementów silnika, badania prototypu oraz prace nad udoskonaleniem prototypu.

Prace nad badaniem elementów winny być prowadzone przez laboratorium wytwórni (w okresie początkowym ewentualnie przy współpracy placówki nauk.-badawczej); badanie prototypu — przez placówkę nauk.-badawczą i laboratorium wytwórni przy współudziale konstruktorów; prace nad doskonaleniem prototypu — przez placówkę konstrukcyjną, naukowo-badawczą i laboratorium wytwórni. Odbiór prototypu powinien być dokonany przez specjalnie powołaną, odpowiednią komisję.

Dodatkowo należy uwzględnić próby odbiorcze silników przy produkcji seryjnej i próby długotrwałe, przeprowadzane przez kontrolę techniczną wytwórni. Próby te przy odpowiednim opracowaniu funkcjonalnym i konstrukcyjnym stoisk, opracowaniu ich oprzyrządowania, rejestrowania i co najważniejsze zapewnieniu pełnego przewartościowywania wyników według opracowanych schematów mogą stać się bardzo ważnym czynnikiem nie tylko udoskonalania produktu, ale także źródłem twórczego postępu w przemyśle.

Prace badawcze w katedrze CMP PŁ

Autorzy pragną na tym miejscu przekazać kilka informacji o pracach badawczych prowadzonych aktualnie w Katedrze CMP PŁ.

Katedra CMP zajęła się silnikami turbinowymi stosunkowo wcześniej, przeznaczając początkowy okres na gromadzenie odpowiednich materiałów z literatury światowej oraz na opracowanie szeregu projektów koncepcyjnych różnych silników małej i średniej mocy. Następnie, wspólnie z zainteresowanymi instytucjami, opracowano wieloletni plan prac w dziedzinie silników turbinowych, w szczególności silników małej mocy. Podstawą tego planu było przygotowanie stoisk badawczych, oraz aparatury i przyrządów pomiarowych. W planowaniu prac badawczych wzięto pod uwagę zasadnicze problemy istniejące w silnikach turbinowych, a mianowicie: przepływy, spalanie, wymiana ciepła i zjawiska dynamiczne.

Dla pokrycia tego zakresu potrzeb zostały zbudowane następujące stoiska:

- stoisko do badania jednokierunkowych, rurowych komór spalania;
- stoisko do badania komór spalania o przepływie zwrotnym;
- stoisko do wszechstronnego badania wtryskiwaczy paliwa;
- stoisko do badania osiowych stopni sprężających;
- stoiska do badania promieniowych stopni sprężających;
- stoisko do badania osiowych stopni rozprężających;
- stoisko do badania promieniowych stopni rozprężających (w budowie);
- stoisko do badania wymienników ciepła typu regeneracyjnego (w budowie).

Na stoiskach prowadzone są zarówno badania podstawowe, jak i stosowane, a także badania techniczne, to znaczy badania konkretnych urządzeń wyprodukowanych lub przeznaczonych do produkcji. Wyniki są na ogół publikowane.

Godnym podkreślenia „ubocznym produktem” prac eksperymentalnych, prowadzonych na dość wszechstronnych, ale często także niestety prymitywnych stoiskach, może być zebranie doświadczeń pozwalających na wła-

ściwe i celowe zaprojektowanie stoisk nadających się do eksploatacji na odpowiednich stacjach doświadczalnych w wytwórni.

Wiele uwagi poświęcono w KCMP odpowiedniemu zaopatrzeniu zespołów badawczych w aparaturę i przyrządy pomiarowe. W tym celu zorganizowano dwie pracownie aparatury: elektronicznej i fizycznej. Pracownie miały dostarczać, to jest kupować lub projektować i wykonywać aparaturę oraz przyrządy, których zapotrzebowanie wynikało z planów badań. Dalsze zadania pracowni to konserwacja urządzeń, udział w badaniach i opracowaniu wyników itp.

Pracownia aparatury elektronicznej, zaopatrzona w zagraniczną aparaturę podstawową, wykonała m.in. następujące aparaty specjalne:

- Vibroscope WEP do pomiaru częstości i rodzaju drgań własnych i wymuszonych elementów maszyn i konstrukcji;
- Vibrometre WIM do pomiaru wielkości drgań i wyważania wirników w łożyskach własnych;
- Vibrometre TRV do pomiaru drgań i przesunięć metodą bezdotykową, do pomiaru sił i momentów skręcających oraz pomiaru drgań, naprężeń i ciśnień za pomocą tensometrów oporowych;
- Vistrobe SB do pomiaru obrotów oraz obserwacji przedmiotów w ruchu.

Pracownia prowadzi także własne prace badawcze z zakresu dynamiki maszyn.

Pracownia aparatury fizycznej wykonała między innymi przyrządy pomiarowe:

- sondy statyczne, dynamiczne, całkowite i kierunkowe do pomiarów ciśnień i kierunków w przepływach;
- różne rodzaje mikromanometrów, m.in. baterijny pochylony do pomiarów niewielkich ciśnień;
- tunelik do wzorcowania sond.

W badaniach znajdują się: sonda dynamiczna do pomiarów w wysokich temperaturach (do 1000 °C), termometr przepływowy, sondy zespołowe do pomiaru różnych parametrów w przepływie gorącego czynnika oraz manometr szeregowo-baterijny dla dużego zakresu ciśnień.

Pracownia prowadzi także obszerne badania podstawowe nad zjawiskami towarzyszącymi przeprowadzaniu pomiarów w przepływie i mającymi wpływ tak na wskazania sond, jak i na pracę urządzeń, w których pomiar jest dokonywany.

Wyniki niektórych prac obu pracowni były tematem publikacji w Biuletynie CMP i referatów na różnych konferencjach specjalistycznych.

W oparciu o dotychczasowe rozważania można stwierdzić, że w Polsce jedynie w dziedzinie głównych napełnień lotniczych sytuacja jest zbliżona w pewnym stopniu do zadowalającej, gdyż potencjał badawczy i wykonawczy pozwala w chwili obecnej na realizację szeregu konstrukcji różnych typów. Instytut Lotnictwa wraz z przyzakładowymi laboratoriami badawczymi przy współudziale uczelnianych placówek badawczych może rozwiązać większość istniejących problemów. Potrzebne jest jednak bardziej aktywne włączenie się do współpracy innych resortów dla rozwiązania takich problemów, jak na przykład materiały żarowytrzymałe, łożyska wysokoobrotowe, oprzyrządowanie.

Odmienne przedstawia się sytuacja w dziedzinie silników turbinowych o innych zastosowaniach. Pomimo znacznego w wielu krajach rozwoju produkcji silników turbinowych o zastosowaniach nie budzących zastrzeżeń oraz zainteresowania ze strony wielu krajowych użytkowników, sprawa ta nie znajduje u nas właściwego zrozumienia. Odnosi się wrażenie, że do czynników, od których uzależnione są dyspozycje, nie dotarły odpowiednie informacje przedstawiające rozwój techniki w opisywanej dziedzinie i wskutek tego przy ocenie wszystkich typów silników turbinowych używana jest miara sprzed kilku lat. Wydaje się konieczna zmiana tego stanowiska w najkrótszym czasie, taka, aby równoległe z dążeniem przemysłu do utrzymania się na odpowiednim poziomie, na przykład w dziedzinie turbin parowych czy tłokowych silników spalinowych, nie dopuścić do niekorzystnego opóźnienia przy wkraczaniu na drogę rozwoju silników turbinowych różnych typów. W Polsce istnieją zarówno placówki naukowo-badawcze, jak i zakłady przemysłowe, które są w stanie podjąć zadanie rozwoju tych silników.

Należy dokonać szczegółowej analizy obecnych i przyszłych potrzeb krajowych w zakresie silników turbinowych i opracować przede wszystkim plan prac badawczych podstawowych skierowanych, wybiegających w przyszłość i obejmujących zagadnienia, o których brak jest jeszcze publikacji w prasie światowej, ale od których zależy przyszły rozwój silników. W odniesieniu do konstrukcji, które dla pewnych zastosowań posiadają wystarczający stopień rozwoju, należy rozpocząć prace badawcze stosowane i techniczne, aby uzyskać konstrukcje o najwyższych, możliwych do osiągnięcia właściwościach.

Doc. dr inż. E. TULISZKA
Katedra Teorii Maszyn Ciepłych
Politechnika Poznańska

539.4.014.1:621—253

Naprężenia termiczne w chłodzonych strumieniem powietrza tarczach wirnikowych turbin gazowych

1. Wstęp

W nowoczesnych konstrukcjach silników turbinowych, w celu podwyższenia wskaźników jego sprawności i koncentracji mocy, stosuje się coraz wyższe temperatury czynnika roboczego oraz prędkości obwodowe tarcz wirnikowych. Granicą w tych dążeniach jest wytrzymałość tarcz wirnikowych, obciążonych siłami bezwładności mas wirujących oraz naprężeniami termicznymi. Wyraźne obniżenie wytrzymałości materiałów konstrukcyjnych w podwyższonych temperaturach powoduje, że tarcze wirnikowe turbin, pracujące w wysokich zakresach temperatur, są z reguły chłodzone strumieniem powietrza (rys. 1).

W ten sposób następuje wymiana ciepła między tarczą a strumieniem chłodnego powietrza, które wpływa na kształtowanie się temperatur w tarczy, a te z kolei na naprężenia termiczne. Celem niniejszego opracowania jest podanie metody obliczenia rozkładu temperatur

w wirnikowej tarczy turbinowej oraz analizy powstałych naprężeń termicznych.

2. Równania określające rozkłady temperatur i naprężeń

Równania rozkładu temperatur powietrza chłodzącego i tarcz wirnikowych ustala się przy następujących założeniach:

a) tarcza wirnikowa omywana jest z obu stron jednokowymi strumieniami powietrza o temperaturze początkowej T_{s-o} i sumarycznym wydatku m [kg/sek].

Powietrze chłodzące doprowadza się na promieniu r_0 (rys. 1);

b) rozkład temperatur zarówno w strumieniu czynnika chłodzącego T_s , jak i tarczy T_w ma charakter osiowo symetryczny, nadto wartość stałą w kierunku osi maszyny;

c) w strumieniu chłodzącym ciepło w kierunku promieniowym rozchodzi się jedynie na drodze konwekcji;
 d) przez wieniec łopatkowy płyną gorące gazy, które nagrzewając tarczę wirnikową, wywołując na jej zewnętrzny cylindryczny obrzeżu gradient temperatur

$$\left(\frac{dT_W}{dr}\right)_{r=1} = G_z^*$$

Ograniczając zagadnienie do ustalonego rozkładu temperatur, równania bilansów energii elementarnego pierścienia, wyciętego powierzchniami cylindrycznymi o promieniach r i $(r + dr)$ (rys. 1), są następujące:

a) dla strumienia przepływającego powietrza:

$$m di = mc_p dT_s = dQ + dN \quad [1]$$

b) dla tarczy koła wirnikowego:

$$dQ = -4\pi r (T_s - T_W) a \cdot dr \quad [2]$$

$$2(T_s - T_W) a + \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left[r \cdot h \frac{dT_W}{dr} \right] \lambda_W = 0 \quad [3]$$

i — entalpia właściwa czynnika chłodzącego,

c_p — ciepło właściwe czynnika chłodzącego przy stałym ciśnieniu,

dQ — ilość ciepła doprowadzonego w ciągu jednostki czasu (1 sek) do czynnika chłodzącego w rozpatrywanym pierścieniu elementarnym,

dN — moc brożenia elementu tarczy,

T_s, T_W — temperatury bezwzględne, odpowiednio — strumienia powietrza i tarczy,

a — współczynnik wnikania ciepła do tarczy wirującej na promieniu,

λ_W — współczynnik przewodzenia ciepła materiału tarczy

h — szerokość tarczy na promieniu r .

W celu rozwiązania powyższych równań wprowadzono następujące zależności, określające współczynnik wnikania ciepła oraz moc brożenia:

$$Nu = 0,0394 \left(1 - \frac{\beta}{\omega}\right)^{0,8} \cdot Re^{0,8} \cdot P_r^{0,8} \quad [4]$$

$$Nu = \frac{a \cdot r}{\lambda_s}; Re = \frac{\omega r^2}{\nu} \text{ — liczba Nusselta i Reynoldsa cy-$$

lindrycznego przekroju tarczy o promieniu r :

λ_s — współczynnik przewodzenia ciepła czynnika chłodzącego,

ν — lepkość kinematyczna czynnika chłodzącego,

ω — prędkość kątowna wirowania tarczy,

β — prędkość kątowna wirowania środkowej części strumienia w komorze przytarczowej.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu = 1,8 \cdot 10^{-6} \frac{T^2}{P} \text{ [m}^2\text{/sek]} \\ \lambda_s = 0,435 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0,7} \text{ [kcal/m} \cdot \text{godz. stop]} \end{array} \right. \quad [5]$$

$$N = \rho \omega^3 \cdot R^5 \cdot \frac{C_M}{Re_W^{0,5}} \quad [6]$$

$$Re_W = \frac{\omega R^2}{\nu} \text{ — liczba Reynoldsa tarczy wirującej,}$$

R — promień zewnętrzny tarczy (rys. 1),

C_M — zredukowany współczynnik mocy brożenia.

Z zależności [5] i [6] w przybliżeniu można przyjąć, że:

$$\left\{ \begin{array}{l} N(r) = C_M \cdot \rho \cdot \omega^{2,8} \cdot r^{4,6} \cdot \nu^{0,2} \\ \frac{dN}{dr} = 4,6 C_M \cdot \rho \cdot \omega^{2,8} \cdot r^{3,6} \cdot \nu^{0,2} \end{array} \right. \quad [7]$$

Wykorzystując zależności [5], [6] i [7] w równaniach [1], [2] i [3] oraz wprowadzając wskaźniki bezwymiarowe:

$$\vartheta_W = \frac{T_W}{\Theta}; \vartheta_s = \frac{T_s}{\Theta}; r = \frac{\bar{r}}{R}; h = \frac{h}{H} \quad [8]$$

otrzyma się:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} a \frac{d\vartheta_s}{dr} + b r^{1,6} (\vartheta_s - \vartheta_W) = 4,6 \bar{r}^{3,6} \cdot C_M \\ \frac{d}{dr} \left[\bar{r} h \frac{d\vartheta_W}{dr} \right] + 2 c r^{1,6} (\vartheta_s - \vartheta_W) = 0 \end{array} \right. \quad [9]$$

Oznaczono:

Θ — temperatura odniesienia (np. 1 stop),

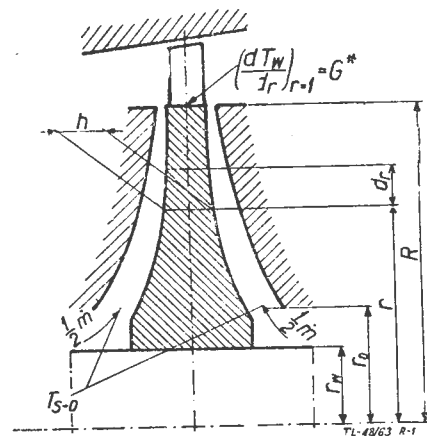
H — szerokość tarczy na promieniu zewnętrznym,

a, b, c — współczynniki wymiany ciepła, określone następującymi związkami:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = Re_W^{\frac{1}{5}} \frac{\dot{m} \Theta \cdot C_p}{\frac{1}{2} \rho \omega^2 R^5} \\ b = 0,247 \left(1 - \frac{\beta}{\omega}\right)^{0,8} \cdot P_r^{0,8} \cdot Re_W \cdot \frac{\lambda_s \cdot \Theta}{\frac{1}{2} \rho \omega^3 R^4} \\ c = 0,0394 \frac{\lambda_s}{\lambda_w} \left(1 - \frac{\beta}{\omega}\right)^{0,8} \cdot P_r^{0,8} \cdot Re_W^{0,8} \cdot \frac{R}{H}, \end{array} \right. \quad [10]$$

które po przyjęciu następujących wielkości:

$C_p = 0,24$ kcal/kg stop, $P_r = 0,72$, $\lambda_w = 35$ kcal/m h^o,
 $\beta = 1/2$ stosownie do [3] przyjmą następującą postać:



Rys. 1. Wirnikowa tarcza turbiny gazowej, chłodzona obustronnie strumieniem powietrza o wydatku m i temperaturze początkowej T_{s-0}

$$\left\{ \begin{array}{l} a = 832 \cdot 10^3 \frac{\Theta \cdot m T_{s-0}^{0,6}}{\omega^{2,8} \cdot R^{4,6} \cdot P^{0,8}} \\ b = 1,78 \cdot 10^3 \frac{\Theta}{T_{s-0}^{0,3} \cdot R^2 \omega^3} \\ c = 8,55 \cdot 10^{-3} \frac{\omega^{0,8} \cdot R^{2,6} \cdot P^{0,8}}{T_{s-0}^{0,9} H} \end{array} \right. \quad [10a]$$

Równania [9] określają przy powyższych założeniach rozkłady temperatur w tarczy oraz strumieniu gazu chłodzącego.

Naprężenia termiczne w tarczy wyznaczają następujące równania:

$$E \cdot \gamma \cdot \Theta \frac{d \vartheta_W}{d \bar{r}} = \frac{1 + \nu}{\bar{r}} (\sigma_r - \sigma_\varphi) + \nu \frac{d \sigma_r}{d \bar{r}} - \frac{d \sigma_\varphi}{d \bar{r}}$$

$$\frac{d}{d \bar{r}} (\sigma_r \cdot \bar{h} \cdot \bar{r}) - \bar{h} \sigma_\varphi = 0$$

Oznaczono:

E — moduł Younga materiału tarczy,
 ν — liczba Poissona materiału tarczy,
 γ — współczynnik wydłużeń cieplnych,
 σ_r, σ_φ — naprężenia promieniowe i obwodowe.

W dalszej części pracy w celu uproszczenia pisowni pominięto kreski nad „h” i „r” i wskaźniki promienia oraz szerokości tarczy oznaczono przez r i h.

3. Temperatury i wynikające z nich naprężenia termiczne tarczy wirnikowej

Rozkład temperatur w tarczy o profilu $h(r)$ oraz w strumieniu powietrza chłodzącego określają równania [9]. Rozwiązanie ich za pomocą funkcji elementarnych jest możliwe dla odpowiednio dobranych profili $h(r)$. Przykład takiego rozwiązania podaje praca [5]. Otrzymane w ten sposób wzory są tak bardzo złożone, że nie posiadają większego znaczenia praktycznego. Dlatego też w takich przypadkach metody przybliżonego rozwiązywania równań różniczkowych uważane są za bardziej operatywne.

Równanie [9] przekształca się, wprowadzając nowe zmienne [5]:

$$x = r^{2,6}; \vartheta_s - \vartheta_W = \frac{d}{dx} \left[e^{-\frac{b}{2,6 a} x} \cdot Y(x) \right] \quad [11]$$

w wyniku czego otrzyma się:

$$\frac{d^2 Y}{dx^2} - Y \left[\left(\frac{b}{2,6 a} \right)^2 + \frac{2 \cdot c}{2,6^2} \cdot \frac{1}{h \cdot x} \right] = \frac{4,6}{1,3} \cdot \frac{C_M}{a} x^{\frac{2}{2,6}} \cdot e^{-\frac{b}{2,6 a} x} \quad [12]$$

$$\left\{ \begin{aligned} \vartheta_s &= 2 \frac{C_M}{a} x^{\frac{4,6}{2,6}} - \frac{b}{1,3 a} \cdot e^{-\frac{b}{2,6 a} x} \cdot Y + K_1 \\ \vartheta_W &= 2 \frac{C_M}{a} x^{\frac{4,6}{2,6}} - e^{-\frac{b}{2,6 a} x} \left(\frac{dY}{dx} + \frac{b}{2,6 a} \cdot Y \right) + K_1 \end{aligned} \right. \quad [13]$$

$$\frac{d \vartheta_W}{dx} = -\frac{2c}{2,6^2} \cdot \frac{1}{h \cdot x} \cdot e^{-\frac{b}{2,6 a} x} \cdot Y \quad [14]$$

Stałą K_1 wyznacza się z warunku, że dla $r = r_0$ lub $x = x_0$ wskaźnik temperatury $\vartheta_s = \vartheta_{s-0}$ odpowiada temperaturze początkowej czynnika chłodzącego (rys. 1).

Gradient temperatury na obrzeżu zewnętrznym tarczy, określający intensywność nagrzewania tarczy od płynących przez kanał łopatkowy gazów, wyrazi się związkami:

$$G_z^* = \left[\frac{dT_W}{d(r \cdot R)} \right]_{r=1} = \frac{\Theta}{R} \left(\frac{d \vartheta_W}{d r} \right)_{r=1} = 2,6 \left(\frac{d \vartheta_W}{d x} \right)_{x=1}$$

Stąd, uwzględniając związek [14] otrzymamy:

$$G_z = \left(\frac{d \vartheta_W}{d r} \right)_{r=1} = -\frac{C}{1,3} \cdot e^{-\frac{b}{2,6 a}} \cdot Y(1) \quad [14a]$$

Równanie [14a] stanowi pierwszy warunek brzegowy rozwiązania równania [12]. Drugi warunek brzegowy należy wyznaczyć podobnie z ilości ciepła odprowadzanej na wewnętrznej cylindrycznej powierzchni tarczy o promieniu r_w ($x_w = r_w^{2,6}$) (rys. 1). Zazwyczaj ilość ta jest bardzo mała i dlatego drugi warunek brzegowy rozkładu temperatur tarczy można przyjąć:

$$G_W = \left(\frac{d \vartheta_W}{d r} \right)_{r=r_w} = 2,6 \cdot r_w^{1,6} \left(\frac{d \vartheta_W}{d x} \right)_{x=x_w} = -\frac{C}{1,3} \cdot \frac{1}{h \cdot r} \cdot e^{-\frac{b}{2,6 a} x} \cdot Y(x_w) = 0 \quad [15]$$

Stąd $Y(x_w) = 0$.

Dla tarczy pełnej $Y(0) = 0$, a poza tym przechodząc do granicy, gdy $r_w \rightarrow 0$ ($x_w \rightarrow 0$), warunek [15] wymaga dodatkowo spełnienia związku:

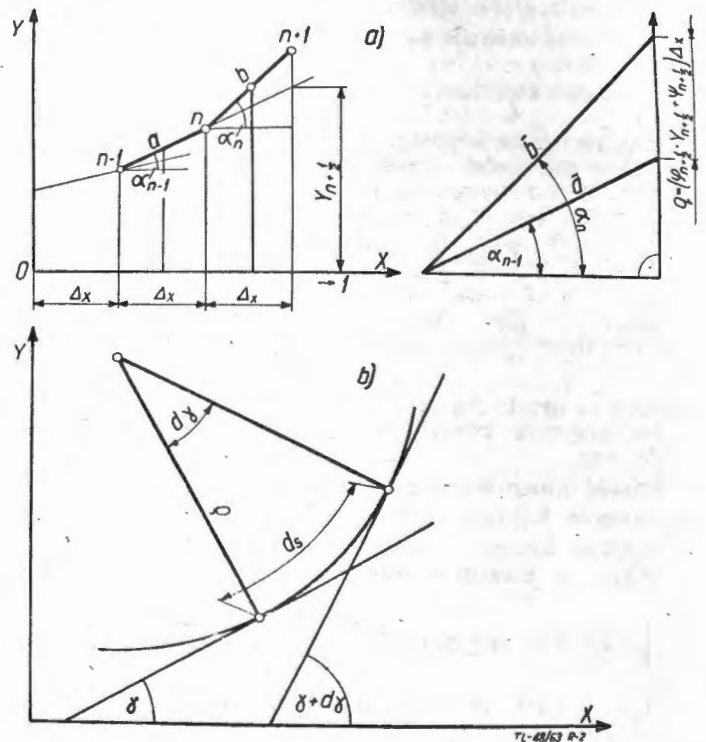
$$G_w = -\frac{c}{1,3 h} \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{dY}{dr} \right) = -\frac{c}{1,3 h} \lim_{r \rightarrow 0} \left(2,6 \cdot r^{1,6} \frac{dY}{dx} \right) \quad [15a]$$

czyli wymaga, żeby $\left(\frac{dY}{dx} \right)_{x=0}$ było ograniczone.

Równanie [12] o budowie $\frac{d^2 Y}{dx^2} - Y \cdot \varphi(x) = \psi(x)$ —

najwygodniej rozwiązuje się metodą wieloboku sznurowego (rys. 2a) lub metodą promieni krzywizny (rys. 2b).

Rys. 2a wystarczająco objaśnia metodę wieloboku sznurowego i pozwala na rozwiązanie równania [12] zarówno metodą wykreśloną lub też rachunkową.



Rys. 2. Metoda wieloboku sznurowego (2a) i promieni krzywizny (2b) rozwiązania równania różniczkowego. $Y'' = \varphi(x) Y + \psi(x)$

Metoda druga polega na wyznaczeniu promieni krzywizny poszukiwanej linii $Y(x)$ w sposób następujący (rys. 2b):

$$\frac{dY}{dx} = \operatorname{tg} \gamma; \frac{d^2 Y}{dx^2} = \frac{d}{dx} (\operatorname{tg} \gamma) = \frac{1}{\cos^3 \gamma} \cdot \frac{d\gamma}{dx} = \frac{1}{\cos^2 \gamma} \cdot \frac{d\gamma}{ds}$$

Promień krzywizny $\rho = \frac{ds}{d\gamma}$ —, zatem

$$\frac{d^2 Y}{dx^2} = \frac{1}{\cos^3 \gamma} \cdot \frac{1}{\rho} = \psi(x) + \varphi(x) \cdot Y(x) \quad [16]$$

Tak więc związek [16] jest podstawą do przybliżonego wyznaczenia rozwiązania równania [12]. W tym przypadku należy zakładać przyrosty nie Δx lecz Δs .

Ze względu na to, że funkcja $\varphi(x) = \left(\frac{b}{2,6a}\right)^2 + \frac{2c}{2,6^2} \cdot \frac{1}{h \cdot x}$

przy $x \rightarrow 0$ dążącym do zera dąży do nieskończoności, metody powyższe rozwiązania równania [12] w zakresie małych wartości x ($0 \rightarrow 0,1$) są nieprzydatne. W tym przypadku rozwiązań poszukuje się w postaci szeregu

$$Y = P_0 + P_1 x + P_2 x^2 + P_3 x^3$$

Wprowadza się ze względu na przyjęte wartości uproszczenia

$$\varphi(x) \approx \frac{2c}{2,6^2} \cdot \frac{1}{h \cdot x}; \quad \psi(x) \approx m \cdot x$$

W rezultacie otrzymano następujące rozwiązania równania [12] w zakresie małych wartości zmiennej x :

$$Y = -\vartheta_{W-o} \cdot x \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{2c}{2,6^2 \cdot h} \right) x + \frac{1}{12} \left(\frac{2c}{2,6^2 \cdot h} \right)^2 x^2 \right] + \frac{1}{6} m x^3 \quad [17]$$

ϑ_{W-o} oznacza stałą, którą się wyznacza z warunków brzegowych. Dla tarczy pełnej ze związków [13] i [15] wynika, że

$$\vartheta_s(0) = K_1; \quad \vartheta_W(0) = - \left(\frac{dY}{dx} \right)_{x=0} + K_1 = \vartheta_{W-o} + K_1$$

Jeśli się przyjmie $\vartheta_s(0) = 0$ — — — — to stała $K_1 = 0$, a stała równania [17] $\vartheta_{W-o} = \vartheta_W(0)$.

Dalsze rozważania dotyczą tarczy pełnej. Nie ogranicza to zakresu stosowania podanej metody, lecz upraszcza jej opis. W celu spełnienia warunków brzegowych, wyznacza się (metodą numeryczną) następujące funkcje: $Y_I(x)$ — będącą szczególnym rozwiązaniem pełnego równania [12], i spełniającą warunki brzegowe:

$$Y_I(0) = 0; \quad \left(\frac{dY}{dx} \right)_{x=0} = Y'(0) = \text{dowolna wartość, } Y_{II}(x) —$$

będącą szczególnym rozwiązaniem równania uproszczonego (jednorodnego) [12] i spełniającą takie same jak funkcja $Y_I(x)$ warunki brzegowe.

Rozwiązanie pełne równania [12] można wyrazić w postaci $Y = Y_I + \alpha Y_{II}$ [18]

Współczynnik α oblicza się z warunku brzegowego [14a] wyznaczającego $Y(1)$. Stąd:

$$\alpha = \frac{Y(1) - Y_I(1)}{Y_{II}(1)} \quad [19]$$

Podana wyżej metoda pozwala wyznaczyć rozkład temperatur w tarczy wirującej o dowolnym profilu, chłodzonej strumieniem powietrza, w zależności od panujących warunków pracy wirnika turbiny i wymiany ciepła, zachodzącej między tarczą a otaczającym czynnikiem. Wynikające stąd naprężenia termiczne oblicza się powszechnie stosowanymi metodami.

Trzeba zauważyć, że pole temperatur tarczy kształtuje się na skutek wymiany ciepła zachodzącej przez jej boczne powierzchnie oraz przez zewnętrzną powierzchnię cylindryczną. Interesująca więc będzie analiza wpływu wymienionych wyżej strumieni ciepłych na wartości naprężeń termicznych. Z tego względu otrzymany związek na ϑ_W [wzór 13] rozbija się tak, aby uwidocznić

wpływ gradientu $\left(\frac{d\vartheta_W}{dr} \right)_{r=0} = G_z$. W tym celu trzeba

rozpatrzeć dwa rozkłady temperatur w tarczy: ϑ_{WA} — o gradientie G_{zA} oraz ϑ_{WB} — o gradientie G_{zB} oraz przy tych samych pozostałych parametrach wymiany ciepła.

Stosownie do wzoru [13] i [18] trzeba napisać:

$$\begin{aligned} \vartheta_{WA} &= 2 \frac{C_M}{a} x^{\frac{4,6}{2,6}} - e^{-\frac{b}{2,6a}} \left[Y'_I + \alpha_A Y'_{II} + \frac{b}{2,6a} \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot (Y_I + \alpha_A Y_{II}) \right] + K_1 \\ \vartheta_{WB} &= 2 \frac{C_M}{a} x^{\frac{4,6}{2,6}} - e^{-\frac{b}{2,6a}} \left[Y'_I + \alpha_B Y'_{II} + \frac{b}{2,6a} \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot (Y_I + \alpha_B Y_{II}) \right] + K_1 \end{aligned} \quad [13a]$$

α_A i α_B są współczynnikami superpozycji równań [18] i [19], dzięki którym funkcje ϑ_{WA} i ϑ_{WB} przybrały wymagane gradienty G_{zA} i G_{zB} .

Odejmując powyższe równania od siebie, otrzyma się:

$$\vartheta_{WA} - \vartheta_{WB} = (\alpha_B - \alpha_A) e^{-\frac{b}{2,6a}} x \left[Y'_{II} + \frac{b}{2,6a} \cdot Y_{II} \right]$$

Wykorzystując związki [14a] i [19] dochodzi się do zależności:

$$\alpha_B - \alpha_A = \frac{\frac{1,3}{c} \cdot e^{\frac{b}{2,6a}} + [G_{zA} - G_{zB}]}{Y_{II}(1)}$$

która z poprzednią określa funkcje ϑ_{WA} w następujący sposób:

$$\vartheta_{WA} = \vartheta_{WB} + \frac{1,3}{c} [G_{zA} - G_{zB}] \frac{Y'_{II}(x) + \frac{b}{2,6a} Y_{II}(x)}{Y_{II}(1)} \cdot \frac{e^{-\frac{b}{2,6a} x}}{e^{-\frac{b}{2,6a}}}$$

Oznaczając:

$$F(x) = \frac{Y'_{II}(x) + \frac{b}{2,6a} Y_{II}(x)}{Y_{II}(1)} \cdot \frac{e^{-\frac{b}{2,6a} x}}{e^{-\frac{b}{2,6a}}} = f(r) \quad [21]$$

i przechodząc ponownie do zmiennej „ r ”, otrzyma się zależność na rozkład temperatury w tarczy ϑ_{WA} , wyrażoną za pomocą rozkładu ϑ_{WB} — różnicy gradientów ($G_{zA} - G_{zB}$) oraz funkcji $f(r)$

$$\vartheta_W = \vartheta_{WA} = \vartheta_{WB} + \frac{1,3}{c} [G_{zA} - G_{zB}] f(r) \quad [22]$$

Naprężenia termiczne określają następujące równania różniczkowe: naprężenia promieniowe σ_r :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \sigma_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\sigma_r}{dr} \left[r \frac{d(\ln h)}{dr} + 3 \right] + \frac{1}{r} \sigma_r \left[r \frac{d^2(\ln h)}{dr^2} + \right. \\ \left. + (2 + \nu) \frac{d(\ln h)}{dr} \right] = - \frac{1}{r} E \cdot \gamma \cdot \Theta \frac{d\vartheta_W}{dr} = - \frac{1}{r} E \gamma \Theta \frac{d\vartheta_{WB}}{dr} - \\ - \frac{1}{r} E \gamma \Theta \frac{1,3}{c} [G_{zA} - G_{zB}] \cdot \frac{df(r)}{dr} \end{aligned} \quad [23]$$

naprężenia obwodowe σ_φ :

$$\sigma_\varphi = \frac{1}{h} \cdot \frac{d}{dr} (\sigma_r \cdot r h) \quad [24]$$

Rozwiązanie równania [23] można przedstawić w następującej formie:

$$\sigma_r = C_1 \cdot \sigma_r^* + C_2 \cdot \sigma_r^{**} + \sigma_{rB} + \frac{1,3}{c} (G_{zA} - G_{zB}) \cdot \sigma_{rG} \quad [25]$$

Oznaczono:

$C_1\sigma_r^* + C_2\sigma_r^{**}$ — pełne rozwiązanie uproszczonego (jednorodnego) równania [23], C_1 i C_2 są stałymi całkowania.

σ_{rB} — szczególne rozwiązanie równania [23] w przypadku gdy $(G_{zA} - G_{zB}) = 0$

σ_{rG} — szczególne rozwiązanie równania [23] w przypadku gdy $\partial_{W-B} = \text{constans}$ oraz $\frac{1,3}{c} (G_{zA} - G_{zB}) = 1$.

Wartości funkcji σ_r^* , σ_r^{**} , σ_{rB} , σ_{rG} wyznacza się metodami opracowanymi i podanymi w literaturze, np. w pracy [10]. Przedstawienie wartości naprężeń w formie równania [25] pozwala w prosty sposób przeanalizować wpływ gradientu temperatury na obrzeżu zewnętrznym G_z na wartość naprężeń termicznych. Tego rodzaju ujęcie okazuje się celowe, gdyż — jak wynika z przeliczeń przykładowych — wartość G_z odgrywa zasadniczą rolę w kształtowaniu się pola temperatur i naprężeń termicznych tarczy turbinowej.

W celu zilustrowania przedstawionej metody, przeprowadzono przykładowe obliczenia dla tarczy pełnej o stałej grubości.

4. Przykłady obliczeniowe i analiza naprężeń chłodzonej tarczy wirnikowej o stałej grubości

Przedmiotem obliczeń jest tarcza pełna ($r_w = 0$) o stałej grubości i wymiarach: promień zewnętrzny tarczy $R = 250$ mm, grubość tarczy $h = H = 40$ mm. Dalsze wielkości, określające wymianę ciepła, są następujące:

a) gradient temperatury na zewnętrznej cylindrycznej powierzchni tarczy G_z — parametr zmienny,

b) natężenie strumienia powietrza chłodzącego \dot{m} — parametr zmienny o następujących wartościach: $\dot{m}_1 = 0,136$ kG/sek, $\dot{m}_2 = 0,272$ kG/sek; $\dot{m}_3 = 0,544$ kG/sek; $\dot{m}_4 = 1,088$ kG/sek,

c) temperatura początkowa i ciśnienie strumienia chłodzącego: $T_{s-o} = 190$ °C; ($\partial_{s-o} = 190$); $P = 3,5$ ata,

d) prędkość obrotowa tarczy $n = 11\,000$ obr/min,

e) strumień chłodzący skierowany jest wzdłuż osi tarczy, to znaczy $r_o = 0$ (rys. 1).

Przyjmując $\Theta = 1$ stop oblicza się ze wzorów [10a] współczynniki:

$$a = 832 \cdot 10^3 \frac{\Theta \cdot m \cdot T_{s-o}^{0,6}}{\omega^{2,8} \cdot R^{4,6} \cdot P^{0,8}} = 11,85 \cdot 10^{-3}; \quad b = \frac{1,78 \cdot 10^3 \cdot \Theta}{T_{s-o}^{0,3} \cdot R^2 \cdot \omega^2} = 3,42 \cdot 10^{-3}; \quad c = 8,55 \cdot 10^{-3} \frac{\omega^{0,8} \cdot R^{2,6} \cdot P^{0,8}}{T_{s-o}^{0,9} \cdot H} = 29,2$$

Funkcje $Y_I(x)$ i $Y_{II}(x)$ — — —, będące odpowiednimi rozwiązaniami równania różniczkowego [12] oraz ich pochodne $Y'_I(x)$, $Y'_{II}(x)$ wyznaczone metodą wieloboku sznurowego dla czterech wartości parametru m :

$m_1 = 0,136$ kG/sek, $m_2 = 0,272$ kG/sek, $m_3 = 0,544$ kG/sek, $m_4 = 1,088$ kG/sek i wartości brzegowych:

$$Y_I(0) = 0 \quad Y'_I(0) = -4$$

$$Y_{II}(0) = 0; \quad Y'_{II}(0) = 1$$

Wyniki obliczeń przedstawia rys. 3 i rys. 4.

Według wzorów [13] lub [13a] oraz [14a], [17], [18]

i [19] wyznacza się funkcję ∂_{W-B} zakładając, że $\left(\frac{d\partial_w}{dr}\right)_{r=1} = G_{zB} = 0$. Otrzymane rezultaty przedstawia rys. 5.

Wyznacza się kolejno funkcję $f(r)$ według wzoru [21]. Jej przebiegi przedstawia rys. 6. Znając funkcje $\partial_{WB}(r)$ i $f(r)$, można natychmiast, stosownie do wzoru [22], określić rozkłady temperatur w tarczy przy dowolnych wartościach parametru G_z .

Dla tarczy o stałej grubości $h = H = \text{cont.}$ równania

[23] i [24] określające naprężenia termiczne, przyjmą postać:

$$\frac{d^2 \sigma_r}{dr^2} + \frac{3}{r} \cdot \frac{d\sigma_r}{dr} = -\frac{1}{r} E \gamma \Theta \frac{d\partial_{WB}}{dr} - \frac{1}{r} E \gamma \Theta \frac{1,3}{c} \cdot (G_{zA} - G_{zB}) \frac{df(r)}{dr} \quad [23a]$$

$$\sigma_\varphi = \frac{d}{dr} (r \cdot \sigma_r) = \sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr} \quad [24a]$$

Poszczególne wartości σ_r , zawarte we wzorze [25], dla tarczy pełnej o stałej grubości są następujące [8]:

$$\sigma_r^* = 1; \quad \sigma_r^{**} = \frac{1}{r^2}$$

$$\sigma_{rB} = -\gamma \cdot E \Theta \frac{1}{r^2} \int_0^r \partial_{W-B} \cdot r \cdot dr = -\gamma \cdot E \cdot \Theta \cdot J_{WB} \quad [26]$$

$$\sigma_{rG} = -\gamma E \Theta \frac{1}{r^2} \int_0^r f(r) \cdot r \cdot dr = -\gamma \cdot E \cdot \Theta \cdot J_{WG}$$

Oznaczono:

$$I_{W-B} = \frac{1}{r^2} \int_0^r \partial_{WB} \cdot r \cdot dr \quad [27]$$

$$I_{W-G} = \frac{1}{r^2} \int_0^r f(r) \cdot r \cdot dr$$

Wielkości I_{WB} i I_{WG} określone wzorami [27] wyznaczono metodą numeryczną i przedstawiono na rys. 7 i 8.

Naprężenia obwodowe σ_φ , zgodnie ze wzorem [24a] dla rozpatrywanego przypadku wyrażą się zależnością:

$$\sigma_\varphi = C_1 - \frac{C_2}{r^2} (\sigma_{rB} + \gamma E \cdot \Theta \cdot \partial_{WB}) - (G_{zA} - G_{zB}) (\sigma_{rG} + \gamma E \Theta \cdot \frac{1,3}{c} f(n)) \quad [28]$$

Teraz, posługując się wzorami [25] i [28] można wyznaczyć rozkład naprężeń termicznych, σ_r i σ_φ tarczy chłodzonej strumieniem powietrza, dla poprzednio przyjętych wydatków \dot{m} , oraz gradientów G_z równych: 0, 400; 800; 1200. Warunki brzegowe stanów naprężeń, określające stałe C_1 i C_2 są $\sigma_r = 0 = \sigma_\varphi(0)$; $\sigma_r(1) = 0$. Stąd wynika natychmiast, że $C_2 = 0$.

Rysunki 9÷12 przedstawiają analizę postawionego zagadnienia, to znaczy przedstawiają wpływ wydatku powietrza chłodzącego \dot{m} oraz gradientów G_z na wartości naprężeń termicznych.

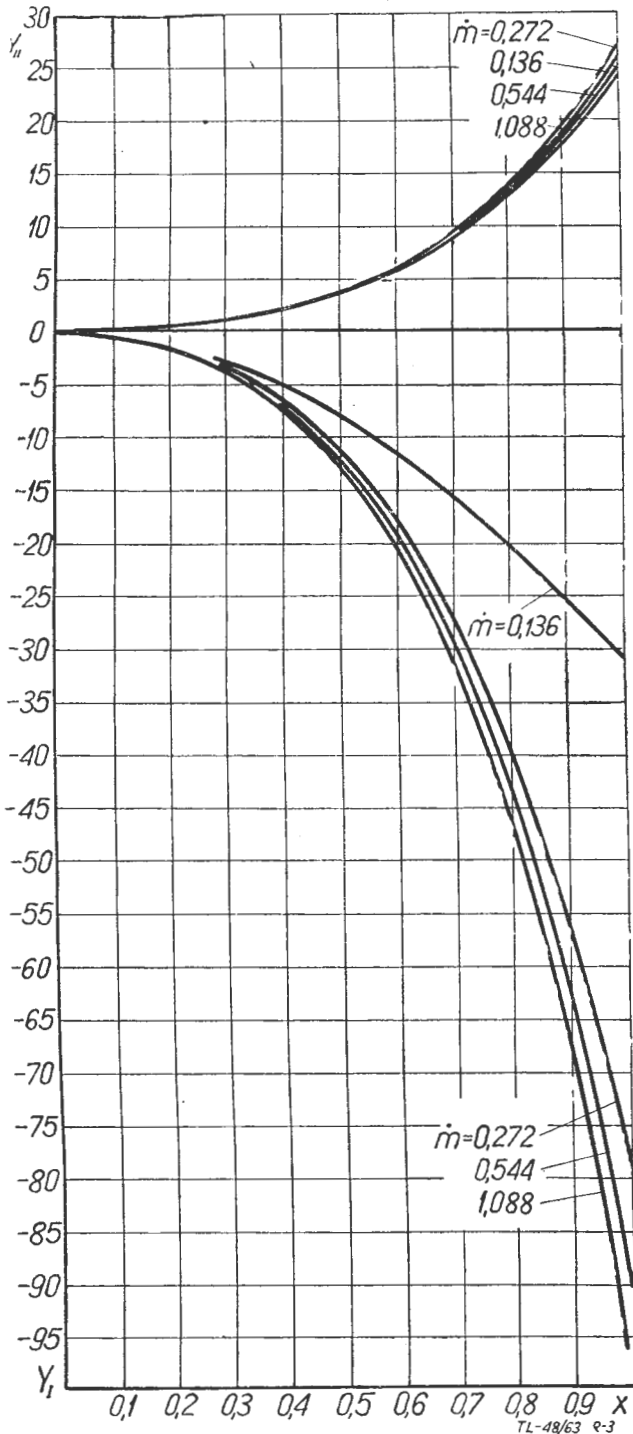
Wnioski zasadnicze, wynikające z przeprowadzonych rozważań są następujące:

1) przy ustalonym parametrze G_z , wzrost natężenia strumienia chłodzącego, płynącego wzdłuż bocznych powierzchni tarczy powoduje wyraźne obniżenie naprężeń w zakresie małych \dot{m} . Zwiększenie na przykład \dot{m} z 0,544 do 1,088 kG/sek obniża naprężenia stosunkowo mało. Otrzymane rezultaty pozwalają więc określić racjonalne z punktu widzenia naprężeń i temperatur tarczy ilości czynnika chłodzącego, kierowanego na boczne powierzchnie tarczy,

2) decydującą rolę w rozkładzie naprężeń odgrywa gradient temperatury na obrzeżu zewnętrznym G_z — to znaczy ilość ciepła, jaka przenika od gazów płynących przez układ łopatkowy do tarczy. Wnioski powyższe posiadają duże znaczenie, ponieważ wskazują drogę poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych tarcz turbiniowych nie narażonych na znaczne naprężenia termiczne. Można zatem wysunąć propozycje stosowania na obrzeżu zewnętrznym tarczy warstwy izolacyjnej (rys. 13), utrudniającej przenikanie ciepła od gorących gazów,

plynących w kanale łopatkowym w głąb tarczy, to znaczy zmniejszającej gradient G_z [5].

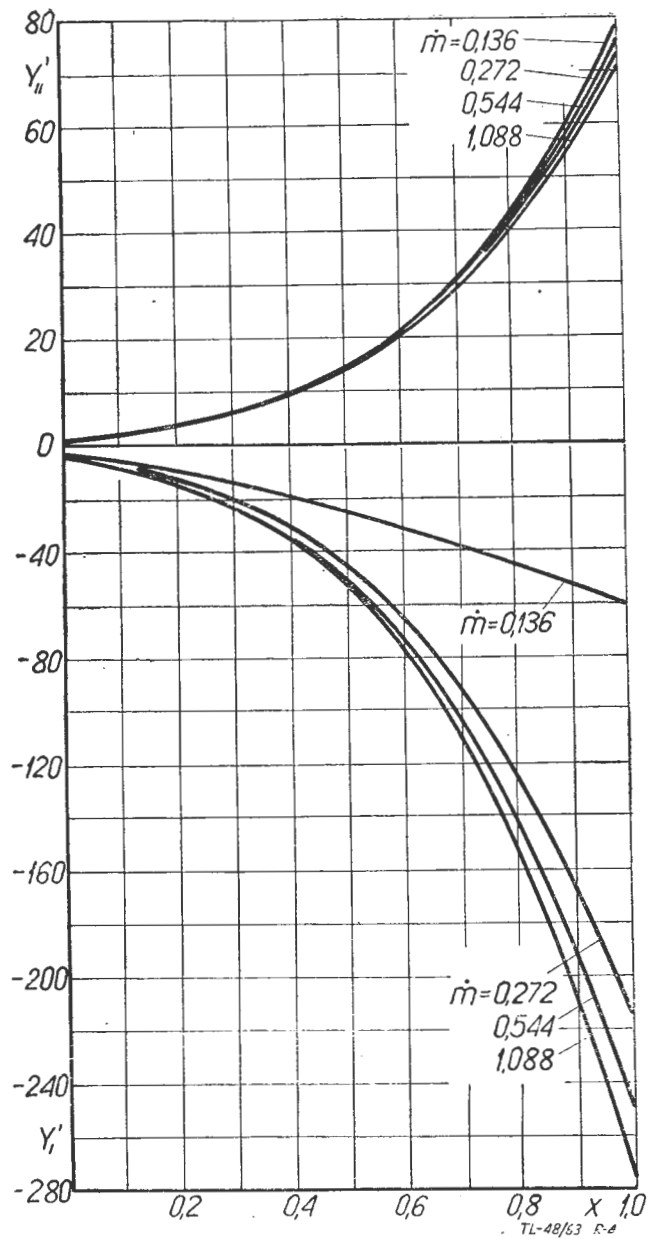
Inne rozwiązanie konstrukcyjne realizujące to samo zadanie, to znaczy zmniejszenie parametru G_z , polega



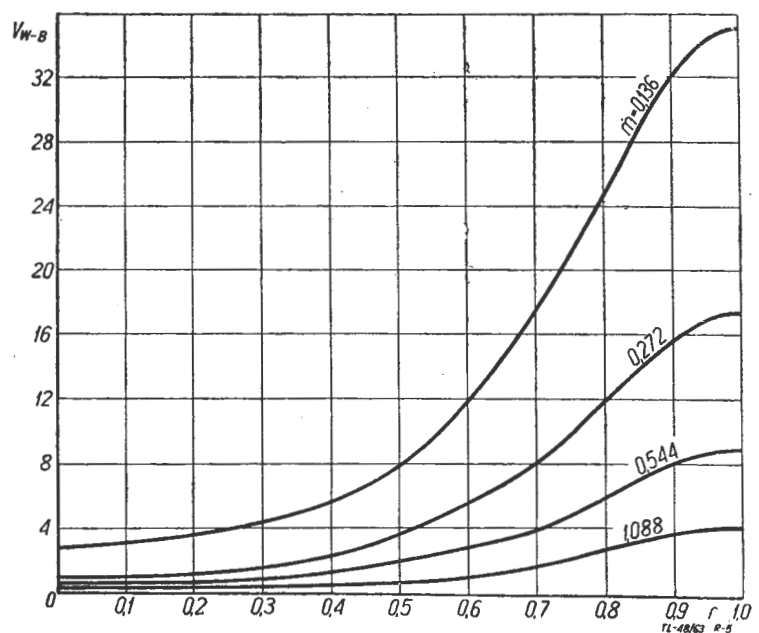
Rys. 3. Wartości funkcji: $Y_I(x)$ i $Y_{II}(x)$ dla różnych parametrów \dot{m} , wyznaczone metodą wieloboku sznurowego

na stosowaniu szczelin (rys. 13b) promieniowych, wykonanych w części zewnętrznej tarczy. W ten sposób ukształtowana zewnętrzna część tarczy stanowi duży opór dla przepływu ciepła. Ciepło płynące wzdłuż występów palczastych w kierunku dośrodkowym, dzięki znacznym powierzchniom wymiany ciepła, jest intensywnie odprowadzone do przepływającego czynnika chłodzącego. Tak więc do wewnętrznej części tarczy, ograniczonej zewnętrznie powierzchnią cylindryczną o promieniu R_z (rys. 13b), przenika nieduża ilość ciepła, w wyniku czego zmniejszone zostaną naprężenia termiczne.

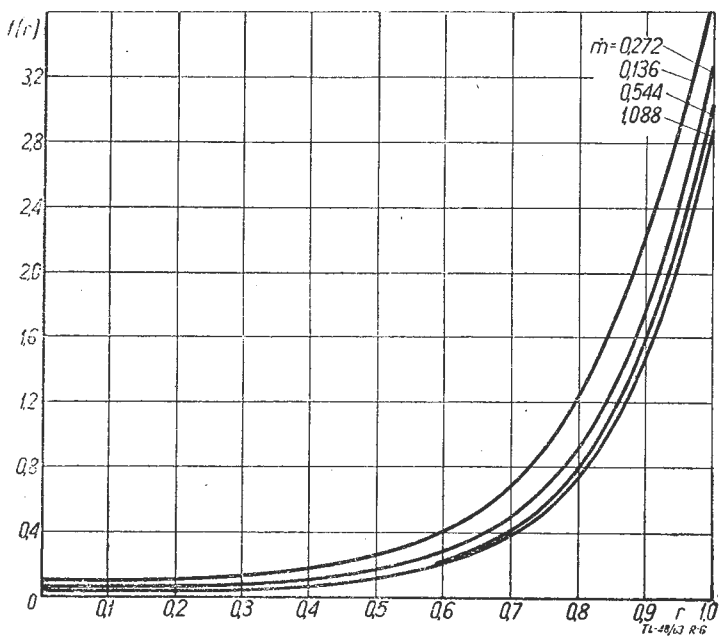
Pełen obraz obciążenia tarczy otrzymuje się dodając do wyznaczonych naprężeń termicznych naprężenia po-



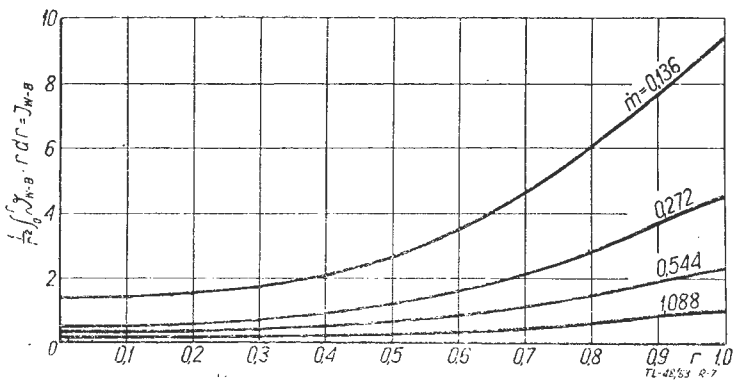
Rys. 4. Wartości funkcji $Y_I'(x)$ i $Y_{II}'(x)$ dla różnych parametrów \dot{m} , wyznaczone metodą wieloboku sznurowego



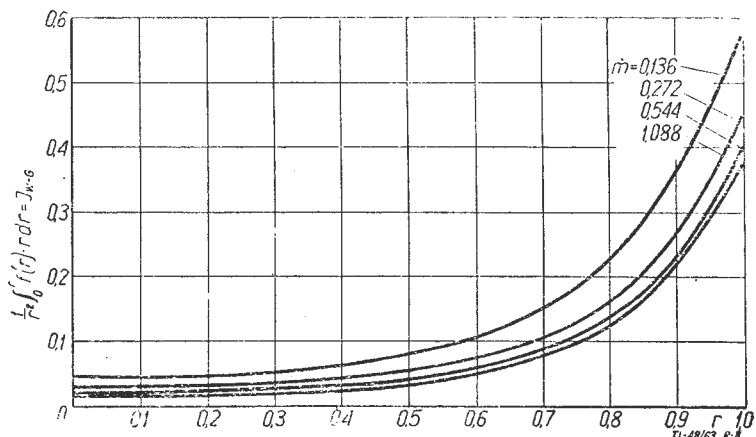
Rys. 5. Rozkłady temperatur w tarczy pełnej o stałej grubości $\vartheta_{w-B}(r)$ i warunku brzegowym $G_z = 0$, przy różnych wydatkach czynnika chłodzącego \dot{m}



Rys. 6. Wartości funkcji $f(r)$ określone wzorem [21] dla różnych parametrów m



Rys. 7. Przebiegi funkcji pomocniczej I_{W-B} określonej wzorem [27]



Rys. 8. Przebiegi funkcji pomocniczej I_{W-G} określonej wzorem [27]

chodzące od obciążeń mechanicznych, to znaczy od sił bezwładności wirującej tarczy i łopatek. Naprężenia te dla tarczy pełnej i stałej grubości wynoszą:

$$\sigma_r = \sigma_{rz} + \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 R^2 (1 - r^2)$$

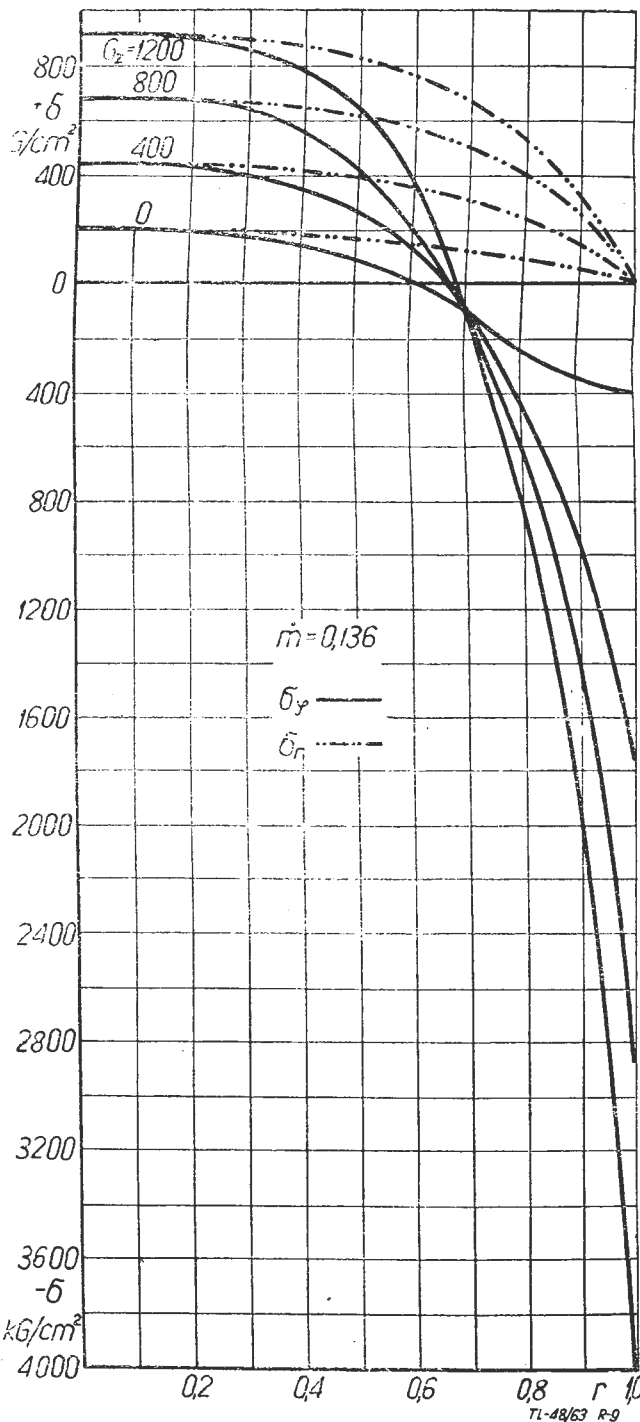
$$\sigma_\varphi = \sigma_\varphi + \frac{3 + \nu}{8} \rho \omega^2 R^2 \left(1 - \frac{1 + 3\nu}{3 + \nu} r^2 \right) \quad [29]$$

Oznaczono:

σ_{rz} — naprężenia promieniowe na zewnętrznej cylindrycznej powierzchni tarczy, wywołane siłami bezwładności wirujących łopatek i ewentualnie występów palczastych,

ρ — gęstość materiału tarczy.

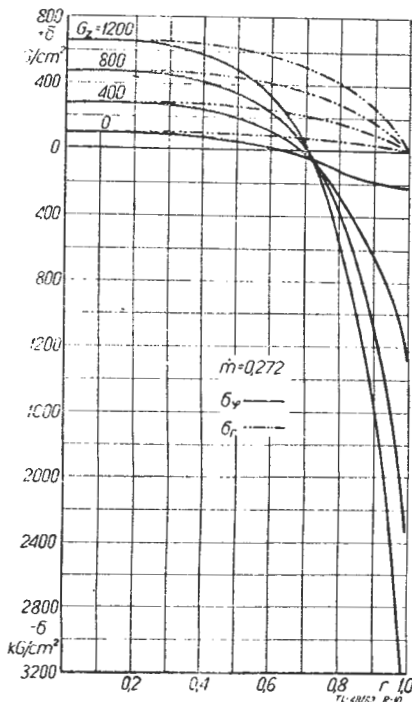
Jest oczywiste, że szczeliny na obrzeżu zewnętrznym zwiększają naprężenia pochodzące od obciążeń mechanicznych, z drugiej strony, jak wykazano poprzednio, obniżają naprężenia termiczne. Z tych względów istnieje optymalna z punktu widzenia naprężeń długość „z” nacięcia szczelin (rys. 13b). Ograniczona objętość pracy nie pozwala na przytoczenie pełnego obliczenia optymalnej wartości „z” i dlatego ograniczono się do podania na-



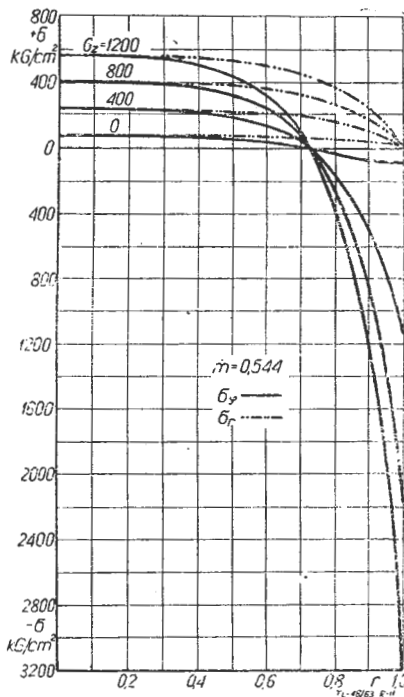
Rys. 9. Naprężenia termiczne promieniowe σ_r i obwodowe σ_φ w tarczy chłodzonej strumieniem o wydatku $\dot{m} = 0,136$ kg/sek przy różnych gradientach G_z

prężen całkowitych, to znaczy pochodzących od obciążeń mechanicznych i rozkładu temperatur, panujących w osi tarczy w zależności od „z” przy wydatku $\dot{m} = 0,272$ kG/sek. (rys. 14).

Należy przypuszczać, że obniżenie naprężeń ogólnych



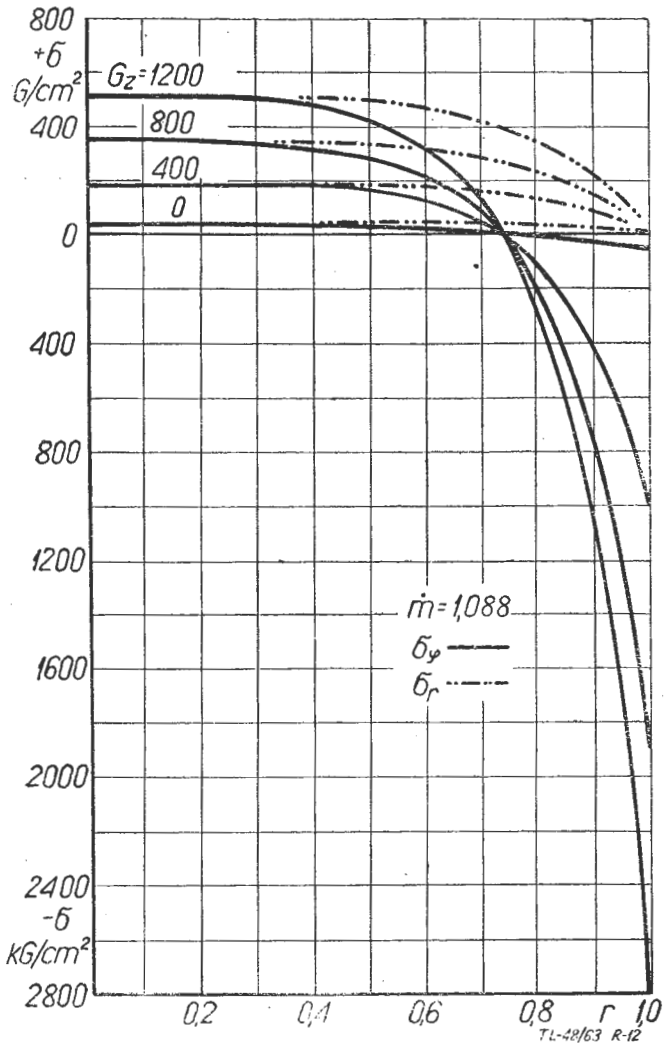
Rys. 10. Naprężenia termiczne promieniowe σ_r i obwodowe σ_φ w tarczy chłodzonej strumieniem o natężeniu $\dot{m} = 0,272$ kG/sek przy różnych gradientach G_z



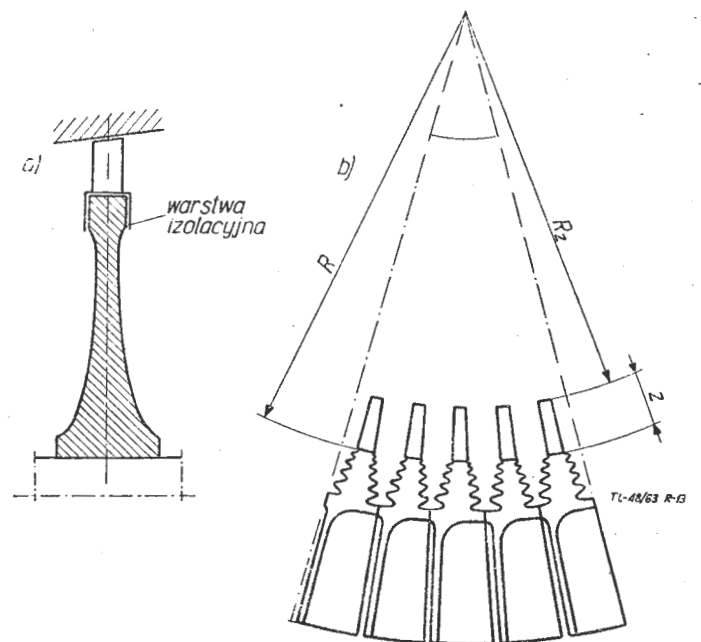
Rys. 11. Naprężenia termiczne promieniowe σ_r i obwodowe σ_φ w tarczy chłodzonej strumieniem o natężeniu $\dot{m} = 0,544$ kG/sek przy różnych gradientach G_z

przedstawionych na rys. 14, uzyskane dzięki stosowaniu wycięć szczelinowych, będzie znacznie większe przy właściwie dobranym profilu tarczy.

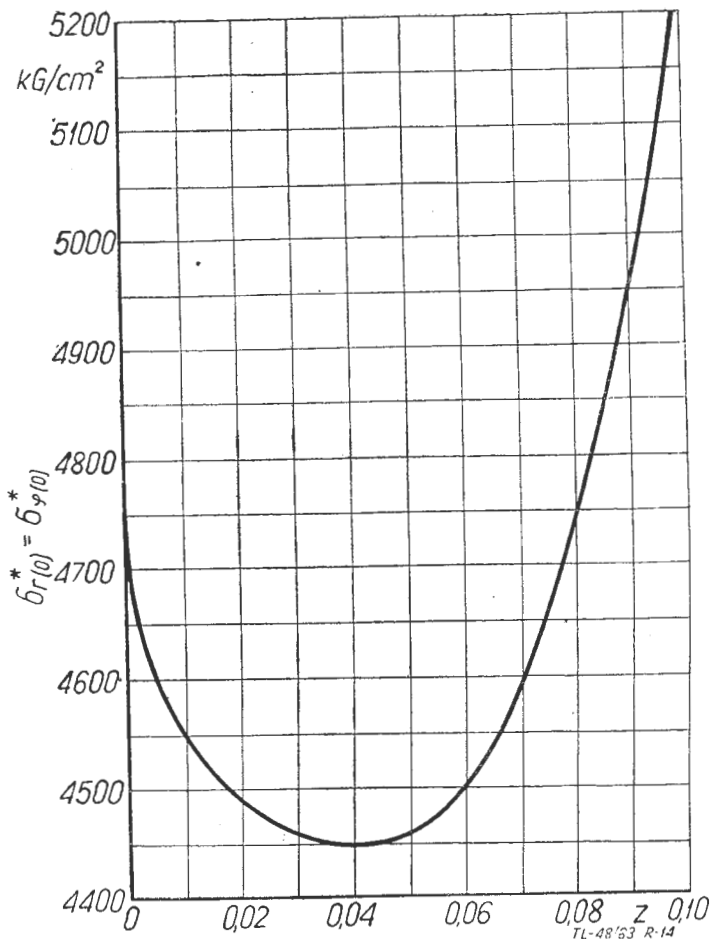
Oprócz rozważonego w przykładzie przypadku pracy tarczy wirnikowej istnieje duża różnorodność w sposobie prowadzenia procesu chłodzenia tarczy i w jej rozwiązaniach konstrukcyjnych. Na przykład strumień chłodzący można kierować na tarczę w różnych odległościach od osi tarczy. Można stosować dwa strumienie chłodzące, z których jeden omywa boczne powierzchnie, drugi zaś skierowany jest na występy palczaste obrzeża tarczy. Tarcza może posiadać różne profile oraz może być pełna względnie z otworem i osadzona na wale. Dla tych wszystkich przypadków możemy podaną metodą wyznaczyć pola temperatur i naprężeń oraz określić racjonalne ilości powietrza chłodzącego i właściwe głębokości nacięć szczelinowych.



Rys. 12. Naprężenia termiczne promieniowe σ_r i obwodowe σ_φ w tarczy chłodzonej strumieniem o wydatku $\dot{m} = 1,088$ kG/sek przy różnych gradientach G_z



Rys. 13. Tarcza wirnikowa turbiny ze schematycznie zaznaczoną osłoną izolacji cieplnej na zewnętrznym obrzeżu tarczy [13a]. Tarcza wirnikowa turbiny z nacięciami szczelinowymi [13b]



Rys. 14. Przebieg naprężeń panujących w osi tarczy $\sigma_r^*(0) = \sigma_\phi^*(0)$ pochodzących od rozkładów temperatur i sił bezwładności mas wirujących dla rozpatrywanego w pracy przykładowo, w zależności od głębokości „z” nacięć szczelinowych

Literatura

1. A. Michiejew: Zasady wymiany ciepła, PWN — Warszawa 1953 r.
2. V. D. I. — Warmeatlas 1954 — Deutscher Ingenieur Verlag GmbH Disseldorf 1954,
3. E. Broecker: Theorie und Experiment zum Reibungswiderstand der glatten rotierenden Scheiben bei turbulenter Strömung, ZAMM 39/1959, Heft 1/2, s. 68—76, Akademie Verlag GmbH, Berlin 1959,
4. E. Tuliszka: Temperatury i naprężenia termiczne w tarczowych wirnikach turbin cieplnych w różnych warunkach pracy, „ABM” PWN, Warszawa 1960, t. 7. 24,
5. E. Tuliszka: Rozkład temperatur w chłodzonych strumieniem powietrza wirnikowych tarczach turbin gazowych, „ABM” PWN, Warszawa 1961, t. 8 2, 3,
6. B. Eckert: Axialkompressoren und Radial Kompressoren, Springer — Verlag — Berlin — Göttingen — Heidelberg 1953.
7. C. B. Biezeno, R. Grammel: Technische Dynamik, Springer-Verlag—Berlin 1939,
8. S. Timoszenko: I. N. Goodiev — Teoria Sprężystości, Arkady — Warszawa 1962,
9. G. S. Skubaczewskij: Awiacionnyje gazoturbinnyje dwigateli,
10. W. Traupel: Thermische Turbomaschinen.

Mgr inż. M. KARLIŃSKI
 Mgr inż. E. SOBOCIŃSKI
 Instytut Mechaniki Precyzyjnej
 Warszawa

669.14.018:621.454

Stopy aluminium stosowane na elementy sprężarek silników turbinowych

Mimo że w większości przypadków w zakresie prędkości lotu poniżej 600—700 km/godz. silnik tłokowy jest nadal stosowany, pierwszy okres w historii rozwoju napędu samolotów został zakończony wraz z wprowadzeniem napędu turbinowego. Ulepszenia konstrukcyjne i technologiczne silników tłokowych ograniczają się obecnie wyłącznie do silników małej mocy, przeznaczonych dla stosunkowo niewielkich i powolnych samolotów turystycznych, sportowych, sanitarnych itp. oraz śmigłowców.

Zasadnicze tendencje rozwojowe w okresie ostatniego dwudziestolecia koncentrowały się wokół napędu turbinowego, a mianowicie turbinowośmigłowego i turbinowoodrzutowego oraz napędu pochodnego od dwu poprzednich, to jest turbinowoodrzutowego dwuprzepływowego.

Równoległe z rozwojem konstrukcji silników turbinowych postępuje rozwój materiałów ciepło- i żarowytrzymałych. O ile przy doborze materiałów na elementy tak zwanej „gorącej” części silnika, obejmującej komory spalania, turbinę i dopalacz, zasadniczą rolę odgrywają stale i stopy żarowytrzymałe na bazie niklu i kobaltu, to w części „zimnej” — sprężarce dominujące znaczenie mają stopy aluminium o odpowiedniej ciepłowytrzymałości. Coraz szersze wprowadzanie ulepszonych stopów magnezu oraz zastosowanie stopów tytanu nie umniejsza roli stopów aluminium spotęgowanej ostatnio pojawieniem się nowego tworzywa na bazie aluminium, znanego pod nazwą SAP (spiekanego proszku aluminium). Postęp w dziedzinie stopów lekkich stwarza możliwości pełniejszego i bardziej efektywnego wykorzystania własności poszczególnych grup stopów w zastosowaniu na określone części silnika.

W artykule niniejszym przedstawiono ogólne zasady doboru stopów aluminium na podstawowe elementy sprężarek, podano poza tym porównawcze charakterystyki konwencjonalnych i rozwojowych stopów i spieków aluminium stosowanych w różnych krajach i przeznaczonych do pracy w podwyższonych temperaturach.

1. Parametry pracy sprężarki silnika turbinowego

Rozkład parametrów strumienia wzdłuż silnika jest zmienny. Zmienność parametrów na wlocie i wylocie sprężarki jest funkcją prędkości lotu i wysokości lotu.

W każdym odrębnym przypadku, przy doborze materiałów pod kątem własności wytrzymałościowych, cieplnych, odporności korozyjnej i erozyjnej oraz cech technologicznych, umożliwiających wykonanie poszczególnych elementów, konieczna jest znajomość przewidywanych charakterystyk sprężarki w powiązaniu z rezersem silnika jako całości i osiągow samolotu.

2. Zasady doboru materiałów na podstawowe elementy sprężarek (ze specjalnym uwzględnieniem stopów aluminium)

W sprężarkach osiowych, stanowiących przeważającą liczbę wszystkich typów sprężarek, podstawowymi elementami składowymi są:

- korpus wlotowy,
- korpus sprężarki,
- łopatki wirnikowe,
- łopatki kierownicze,
- dyski wirników.

Korpusy, pracujące głównie pod obciążeniem statycznym powinny wykazywać dostateczną sztywność i lekkość. Do oceny materiału, z uwagi na sztywność i ciężar, miarodajny jest stosunek modułu sprężystości i ciężaru właściwego $\left(\frac{E}{\gamma}\right)$. Ponieważ grubości ścianek uzbro-

wania i kołnierzy wynikają raczej ze względów technologiczno-konstrukcyjnych, a nie wytrzymałościowych, najbardziej przydatne są w tym przypadku stopy aluminium i magnezu, przy czym przy występujących podwyższonych temperaturach i ciśnieniach wewnętrznych stopy te powinny charakteryzować się dostateczną ciepłotrzymałością, a ściślej biorąc — odpowiednim stosunkiem wytrzymałości na pełzanie lub granicy pełzania do ciężaru właściwego

$$\left(\frac{R}{\gamma} \text{ lub } \frac{R_{\epsilon}}{\gamma}\right).$$

Stosunkowo słabo obciążone korpusy wlotowe wykonywane są zwykle z odpowiednio tłoczonej blachy stalowej lub odlewane ze stopów magnezu. Stosowane są również odlewnicze stopy aluminium, przy czym w poszczególnych przypadkach używa się stopów typu AlSi, AlCu lub AlCuSi o niewysokich własnościach ciepłotrzymałych.

Korpus sprężarki stanowi zwykle element dwudzielny. Odlewnicze standardowe stopy magnezu, których własności wytrzymałościowe gwałtownie spadają powyżej 200°

nie zabezpieczają dostatecznego stosunku $\frac{R_{\epsilon}}{\gamma}$ i dlatego

konieczne jest przejście do stopów aluminium lub zastosowanie nowych stopów magnezu z torem, cyrkonem i metalami ziem rzadkich. Na korpusy sprężarek w zakresie niskich temperatur stosuje się stopy typu AlSi, AlCu lub AlCuSi, natomiast w przypadku temperatur rzędu 250—350°, stopy typu AlCuNiMg, AlCuMn, AlCuNi i inne, bardziej złożone. Dalszy wzrost temperatur powyżej 350—400 °C i ciśnień wewnętrznych sprężarki wyczerpuje możliwości stopów aluminium i stwarza konieczność przejścia do stopów tytanu i stali.

Łopatkki wirnikowe — poza pracą w wysokich temperaturach — podlegają złożonemu układowi obciążeń. Dlatego też dobór odpowiednich materiałów i technologii łopatek jest kluczowym problemem przy produkcji sprężarek.

W odniesieniu do łopatek (szczególnie wirnikowych) bardzo istotne znaczenie ma wartość stosunku $\frac{E}{\gamma}$ oraz stosunku granicy zmęczenia do modułu sprężystości $\left(\frac{Z}{E}\right)$. Wysoka wartość pierwszego wskaźnika $\left(\frac{E}{\gamma}\right)$ zabezpiecza wysoką częstotliwość rezonansową, drugi natomiast $\left(\frac{Z}{E}\right)$ daje gwarancję odporności na występujące naprężenia zmęczeniowe.

O ile stosunek $\frac{E}{\gamma}$ jest w przybliżeniu jednakowy dla stopów aluminium, magnezu, tytanu i stali, to wartość stosunku $\frac{Z}{E}$ wypada najmniej korzystnie dla stopów lekkich.

Łopatkki sprężarek osiowych wykonuje się najczęściej ze stopów aluminium, przerabianych plastycznie, typu AlCuMgMn, AlCuMgSiFeNi, AlCuMgNiFe, przy czym graniczne temperatury stosowania tych stopów nie przekraczają 300—350 °C. W przypadku wyższych temperatur stosowane są stopy tytanu, stali nierdzewne i SAP, przy czym ten ostatni w granicach do 400—450 °C, jednakże w stosunkowo ograniczonym zakresie.

Łopatkki pierwszych stopni sprężarek wykonuje się zazwyczaj ze stali nierdzewnych lub stopów tytanu, niezależnie od względów wytrzymałościowych umożliwiających stosowanie aluminium.

Dyski sprężarek osiowych i wirniki sprężarek odśrodkowych wykonuje się na ogół z tych samych materiałów co łopatkki. Pod względem odporności na korozję i ero-

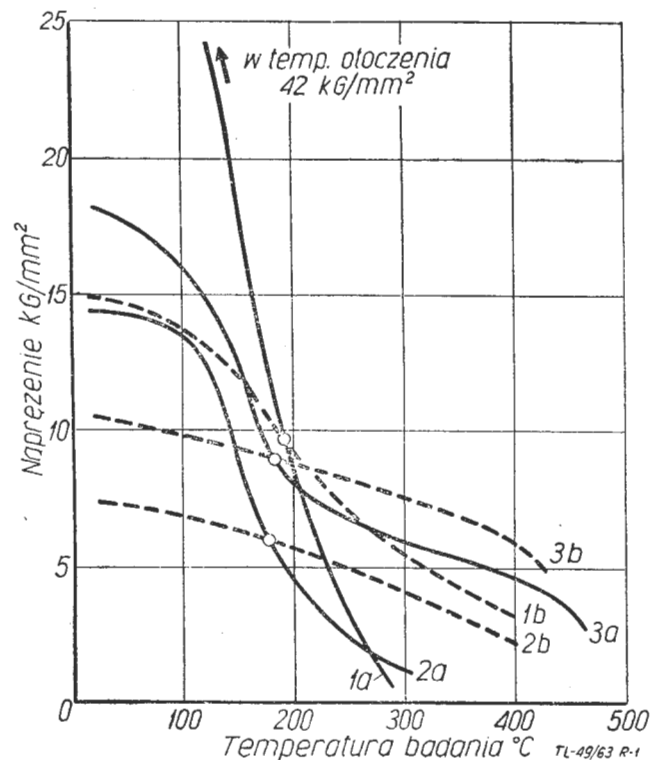
zję oraz działania podwyższonych temperatur materiały dysków mogą wykazywać gorsze własności. Stosowanie rozwiązań bębnowych stwarza jednak konieczność zapewnienia dostatecznej sztywności konstrukcji, a więc podobnie jak w przypadku korpusów — istotnym wskaźnikiem jest stosunek $\frac{E}{\gamma}$.

3. Cechy charakteryzujące przydatność stopów lekkich do pracy w podwyższonych temperaturach

Zjawisko zachowania odpowiednio wysokich własności mechanicznych, w miarę wzrostu temperatury oraz czasu pracy, stanowi istotę ciepłotrzymałości stopów aluminium. Najbardziej charakterystyczne z uwagi na warunki pracy elementów sprężarek są następujące wskaźniki wytrzymałościowe: wytrzymałość na pełzanie (lub granica pełzania) i wytrzymałość zmęczeniowa. Istotne znaczenie ma również zmienność modułu sprężystości (E i G) w funkcji temperatury.

Podobnie, jak w przypadku stali i innych stopów, ze wzrostem temperatury następuje spadek wytrzymałości na pełzanie i wytrzymałości zmęczeniowej. Stosunkowo wysoka — przy nieznacznie podwyższonych temperaturach — wartość wytrzymałości na pełzanie spada ze wzrostem temperatury znacznie szybciej niż wartość wytrzymałości zmęczeniowej. W ten sposób wykres charakteryzujący oba wskaźniki wykazuje punkt przecięcia obu zależności (rys. 1) przy określonej temperaturze w pobliżu 200 °C w zależności od rodzaju stopu. Poniżej tej temperatury krytycznej z punktu widzenia przydatności stopu jest wartość jego wytrzymałości zmęczeniowej, powyżej zaś — wytrzymałości na pełzanie (lub granicy pełzania). Wysokość temperatury, odpowiadającej punktowi przecięcia obu linii charakterystycznych, daje dodatkowy pogląd na ciepłotrzymałość stopu.

Wobec braku jednoznacznie przyjętych warunków określania granicy pełzania, jak i wytrzymałości zmęczeniowej, porównanie obu charakterystycznych wskaźników jest utrudnione. Wartości granicy pełzania okre-



Rys. 1. Przebieg zmian granicy pełzania i granicy zmęczenia stopów aluminium i SAP w podwyższonych temperaturach [9] Oznaczenia krzywych

Stop	Stop	Stop
AlCuMg, AlCuNi przerab. plast.	AlCuNi — lany	SAP
1a R 0,1/1000	2a R 0,1/1000	3a R 0,1/1000
1b Z — 10—100.10 ⁶	2b Z — 20.10 ⁶	3b Z — 10.10 ⁶

śła się w zależności od rodzaju konstrukcji i czasu pracy zwykle w zakresie 0,2%/100 godz. (duże wydłużenia) do 0,1/1000 godz. (małe wydłużenia). Podobnie przy badaniu wytrzymałości zmęczeniowej liczba cykli (tzw. baza) przyjmowana jest w granicach 10—100.10⁶.

Przy porównaniu stopów tego samego typu odlewniczych i przerabianych plastycznie okazuje się, iż stopy odlewnicze wykazują w zakresie wyższych temperatur większą wytrzymałość na pełzanie i odpowiednio większą granicę pełzania. Tłumaczy się to większą odpornością (nie naruszoną nawet w przypadku uprzedniego przesycania) usztywniającej siatki wydzielen trwałych faz międzymetalicznych i bardziej gruboziarnistą strukturą stopu lanego.

Przed omówieniem składu chemicznego i własności mechanicznych ciepłowytrzymałych stopów aluminium warto przeanalizować choćby pobieżnie istotę zjawiska ciepłowytrzymałości oraz wpływ dodatków stopowych na ciepłowytrzymałość stopów.

Ogólnie dodatni wpływ składników stopowych na ciepłowytrzymałość polega na zwiększaniu ciepłowytrzymałości roztworu stałego oraz na tworzeniu faz ciepłowytrzymałych.

Wpływ dodatków na ciepłowytrzymałość roztworu stałego tłumaczy się istnieniem większej więzi chemicznej pomiędzy atomami różnymi pierwiastków aniżeli pomiędzy atomami jednakowymi oraz tworzeniem tak zwanych „atmosfer Cotrella”. Atmosfery Cotrella są to skupiska atomów rozpuszczonych pierwiastków wokół defektów sieci roztworu. Skupiska te utrudniają procesy przemieszczania atomów w sieci roztworu stałego i tym samym powodują wzrost ciepłowytrzymałości stopu.

W stopach wielofazowych istnieją znacznie dogodniejsze warunki do powstawania atmosfer Cotrella aniżeli w stopach jednofazowych. Istota dodatniego wpływu nowych faz na ciepłowytrzymałość polega nie tylko na tym, że wprowadzane fazy mają specjalne własności. Wprowadzenie nowych faz powoduje powstawanie nowych powierzchni rozdziału w stopie. Wokół nowej fazy istnieje strefa charakteryzująca się znaczną ilością defektów sieci krystalicznej. Dookoła defektów tworzą się nowe atmosfery Cotrella, co daje w wyniku dalszy wzrost ciepłowytrzymałości. Największy efekt uzyskuje się w przypadku, gdy nowa faza wydzieliła się w kształcie siatki lub płytek. Jednakże nie każda faza krystalizująca w tej

postaci będzie wpływała dodatnio na ciepłowytrzymałość stopu. Fazy łatwotopliwe oraz fazy o znacznej rozpuszczalności w roztworze stałym i odwrotnie powodują wzrost pełzania stopu, gdyż ułatwiają procesy dyfuzyjne będące przyczyną pełzania.

Tak więc podstawowym warunkiem ciepłowytrzymałości jest niejednorodna budowa stopu, który powinien składać się z wieloskładnikowego roztworu stałego i z faz mających znaczne powierzchnie rozdziału. W stopie nie mogą występować fazy łatwotopliwe lub tworzące łatwotopliwą eutektykę oraz fazy o znacznej rozpuszczalności w innych fazach lub w roztworze stałym. Te wymagania odnoszą się do stopów odlewniczych, w stopach przerabianych plastycznie większą rolę odgrywa roztwór stały, zaś fazy dodatkowe powinny występować w postaci bardzo drobnych, nie rozgałęzionych wydzielen.

Badania wpływu poszczególnych dodatków stopowych na ciepłowytrzymałość roztworu stałego na bazie aluminium wykazały, że mangan, miedź, magnez i wapń wywierają wpływ dodatni, zaś krzem i cynk — ujemny.

Pod względem tworzenia faz ciepłowytrzymałych najlepsze wyniki dają miedź, magnez, nikiel, żelazo oraz krzem. Ten ostatni pod warunkiem, że wchodzi w skład faz aluminium-żelazowych.

4. Charakterystyka ciepłowytrzymałych stopów aluminium

Najbardziej znane i historycznie najstarsze ciepłowytrzymałe stopy aluminium należą do typu AlCuNi. Stopy te stosowane są zarówno w postaci lanej jak i po przeróbce plastycznej. Równolegle stosuje się stopy typu AlCuMgMn oraz nowe stopy, w których miejsce niklu i magnezu zajmuje mangan, to jest stopy typu AlCuMn.

W tabeli 1 zostały zgrupowane stopy stosowane w różnych krajach do pracy w temperaturach podwyższonych.

Z zestawienia wynika, że te same stopy, a nawet typy stopów w jednych krajach uznaje się za ciepłowytrzymałe, w innych stosuje się je tylko do pracy w temperaturze otoczenia. Na przykład stop AL4 (typu AlSi) używany jest na elementy pracujące w podwyższonych temperaturach tylko w ZSRR, stop A-U5GT typu AlCu tylko we Francji, zaś stopy L64 (typu AlCuMgSiMn) i DTD150A (typu AlCuMgMn) tylko w Anglii.

Tabela 1

Zestawienie gatunków stopów ciepłowytrzymałych i ich odpowiedników w różnych krajach w zależności od typu stopu

Typ stopu	Oznaczenie stopu					
	Polska	ZSRR	USA	Anglia	Francja	Niemcy
AlCu	—	AL7 *)	—	LM11 *)	A-U5GT	GA1Cu *)
	—	—	CG100A	LM12; RR50	A-U10G	—
AlCuMn	—	AL19	—	—	A-U6MT	—
	—	D20	X2219	RR57	—	—
	—	D21	—	—	—	—
AlCuNi	—	—	—	RR350	A-U5NZr	—
	—	—	2018	4L25	A-U5NK	AlCuNi
AlCuSi	AK51	AL5	SC51A *)	LM16 *)	A-U10S4	G AlSi5Cu1 *)
	—	—	SC82A	—	—	—
AlSi	AK9	AL4	SG100A *)	LM9 *)	A-S10G *)	G AlSiMg *)
AlCuMgMn	PA34	WD17	—	—	—	—
	PA6 *)	D1 *)	2017 *)	DTD150A	A-U4G *)	AlCuMg
AlCuNiMg	—	AL1	CN42A	LM14	A-U4NT	G AlCuNi
	—	W300	2218	2L25 (Y)	—	—
AlCuMgNiFe	PA30	AK4-1	2013	RR58; DTD731	A-U2GN	—
	—	—	—	DTD724; DTD745	—	—
AlCuMgSiMn	PA33 *)	AK8 *)	2014 *)	L 64	A-U4SG *)	—
	—	—	SC122A	—	—	—
AlCuSiFeMg	—	W14A	—	—	—	—
AlCuMgSiFeNi	—	—	—	LM15; RR53	—	—
	PA29	AK4	—	L52; RR59	A-U2GN	—
AlSiCuMgNi	AK12	—	SN122A	LM13	A-S12UN *)	—
	—	—	4032	DTD324	—	AlSiCuNi

*) Odpowiedniki stopów ciepłowytrzymałych nie stosowane do pracy w podwyższonych temperaturach

W przodujących krajach stosuje się ciepłowytrzymałe stopy trzech typów: AlCuMn, AlCuNiMg i AlCuMgNiFe, przy czym stopy ostatniego typu, mimo że są stosowane w różnych krajach, mają identyczny skład chemiczny (tabela 2). Przy stosowaniu stopów innych typów istnieje pewna specyfika. Stopy typu AlSi i AlCuSiFeMg stosowane są tylko w ZSRR, stopy AlCuMgSiMn tylko w Anglii i USA, zaś stopy AlCuNi i AlSiCuMgNi we wszystkich krajach oprócz ZSRR.

Różna ocena tych samych stopów z punktu widzenia ich przydatności do pracy w podwyższonych temperaturach wynika z różnych wymagań stawianych stopom pod względem własności technologicznych.

W świetle ujemnego wpływu krzemu na ciepłowytrzymałość aluminium dodatkowych wyjaśnień wymaga fakt stosowania w ZSRR stopu typu AlSi (stop AŁ4) na elementy pracujące w podwyższonych temperaturach. Tłumaczy się to bardzo dobrymi własnościami technologicznymi stopu, które w połączeniu ze znaczną wytrzymałością na rozciąganie, a zwłaszcza granicą plastyczności, decydują o stosowaniu tego stopu do produkcji dużych

odlewów o złożonych kształtach, narażonych na działanie znacznych obciążeń i temperatur nie przekraczających 200 °C. Takie same przyczyny decydują o stosowaniu stopów typu AlSiCuMgNi.

Z punktu widzenia wpływu poszczególnych dodatków stopowych na ciepłowytrzymałość stopów aluminium ciekawie będzie porównanie składów chemicznych stopów ciepłowytrzymałych oraz ich własności mechanicznych. W tabeli 2 przytoczono składy chemiczne stopów ciepłowytrzymałych w zależności od typu stopu. Maksymalne własności wytrzymałościowe poszczególnych typów stopów przedstawia tabela 3. Z tabeli tej wynika, że najwyższe własności wytrzymałościowe w temperaturze 300° mają stopy typu AlCuMn (przerabiane plastycznie) i typu AlCuNiMg (odlewnicze). Drugą grupę stanowią stopy typu AlCuMgMn (przerabiane plastycznie), AlCuMgNiFe (odlewnicze) oraz AlCuSiFeMg (odlewnicze i przerabiane plastycznie). Wytrzymałość na pełzanie stopów tych typów jest o około 3 kg/mm², zaś granica pełzania o około 1,5 kg/mm² niższa od analogicznych stopów pierwszej grupy. Należy przy tym zaznaczyć, że

Tabela 2

Zestawienie składów chemicznych stopów ciepłowytrzymałych w zależności od typu stopu

Typ stopu	Oznaczenie stopu	Kraj produkujący	Skład chemiczny w %								Uwagi:	
			Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Pozostałe		
AlCu	CG160A	USA	reszta	10	0,2	—	—	—	—	—	—	odlewniczy
	A-U5GT	Francja	„	4,2-5,0	0,18-0,35	—	—	—	—	Ti 0,17-0,35	„	
	A-U10G	Francja	„	9,5-10,5	0,2-0,3	—	0,5-1,5	—	—	—	„	
	LM12	Anglia	„	9,0-10,5	0,15-0,35	—	0,6-1,2	—	—	—	„	
AlCuMn	A-U6MT	Francja	„	6	—	—	—	0,34	—	Ti 0,12	odlewniczy	
	AŁ19	ZSRR	„	4,5-5,3	—	—	—	0,6-1,0	—	Ti 0,25-0,45	przer. plast.	
	D20	„	„	6-7	—	—	—	0,4-0,8	—	Ti 0,1-0,2	„	
	RR57	Anglia	„	6,5	—	—	—	0,6	—	Ti 0,15	„	
	X2219	USA	„	6	—	—	—	0,3	—	V 0,1+Zr 0,15	„	
	D21	ZSRR	„	6-7	0,25-0,45	—	—	0,4-0,8	—	Ti 0,1-0,2	„	
AlCuNi	A-U5NK	Francja	„	5,33	—	—	—	0,3	0,9	Ti 0,23+Co 0,3 +Sb 0,24	odlewniczy	
	A-U5Nzr	„	„	5,10	—	—	—	0,29	1,57	Ti 0,23+Zr 0,17 +Sb 0,32+Co 0,37	„	
	RR350	Anglia	„	4,5	—	—	—	0,26	1,7	Ti 0,3+Sb 0,25 +Co 0,25+Zr 0,24 +Cd 0,1	przer. plast.	
	2018	USA	„	3,5-4,5	0,45-0,9	—	—	—	1,7-2,3	—	„	
	AlCuNi 4L25	Niemcy Anglia	„ „	3,5-4,5 3,5-4,5	0,4-0,8 0,4-0,9	— —	— —	— —	1,7-2,3 1,8-2,3	— —	„ „	
AlCuSi	A-U10S4	Francja	„	10,8	—	4,2	—	—	—	—	odlewniczy	
	SC82A	USA	„	1,8	0,3	8	—	0,3	—	—	„	
	AŁ5	ZSRR	„	1,0-1,5	0,35-0,6	4,5-5,5	—	—	—	—	„	
AlSi	AŁ4	„	„	—	0,17-0,3	8,0-10,5	—	0,25-0,5	—	—	„	
AlCuMgMn	WD17	„	„	—	—	—	—	—	—	—	przer. plast.	
	PA34	Polska	„	2,6-3,2	2,0-2,4	—	—	0,45-0,7	—	—	„	
	DTD150A AlCuMg	Anglia Niemcy	„ „	3,5-4,5 2,5-5,0	0,4-0,9 0,2-1,8	— —	— —	0,4-0,7 0,3-1,5	— —	Ti 0,3 Ti 0,3	„ „	
AlCuNiMg	AŁ1	ZSRR	„	3,75-4,5	1,25-1,75	—	—	—	1,75-2,25	—	odlewniczy	
	W300	„	„	4,5-6,0	0,8-1,5	—	—	0,18-0,3	2,6-3,6	Cr 0,1-0,25	„	
	CN42A	USA	„	3,5-4,5	1,3-1,8	—	—	—	—	Ti 0,2+Cr 0,2	„	
	2218	USA	„	3,5-4,5	1,3-1,8	—	—	—	—	—	przer. plast.	
	2L35 (Y)	Anglia	„	3,5-4,5	1,2-1,7	—	—	—	1,8-2,3	Ti 0,2	„	
	LM14	„	„	3,6-4,5	1,2-1,8	—	—	—	1,8-2,2	Ti 0,1	„	
	A-U4NT G AlCuNi	Francja Niemcy	„ „	3,5-4,5 3,5-4,5	1,4-1,8 1,4-1,8	— —	— —	— —	1,8-2,3 1,8-2,3	— —	„ „	
AlCuMgNiFe	PA30	Polska	„	1,9-2,5	1,4-1,8	—	1,0-1,5	—	1,0-1,5	—	przer. plast.	
	AK4-1	ZSRR	„	—	—	—	—	—	—	—	„	
	DTD724	„	„	—	—	—	—	—	—	—	„	
	DTD731 DTD745 RR58	Anglia	„	1,8-2,7	1,2-1,8	—	0,9-1,4	—	0,8-1,4	—	„	
2618	USA	„	2,2	1,6	—	1,1	—	1,5	Ti 0,07	„		
A-U2GN	Francja	„	2,2-2,4	1,2-1,7	—	1,2-1,5	—	1,0-1,5	—	odlewniczy		
AlCuMgSiMn	SC122A	USA	„	1,5	0,7	12	—	0,7	—	—	odlewniczy	
	L64	Anglia	„	3,8-4,8	0,55-0,85	0,6-0,9	—	0,4-1,2	—	—	przer. plast.	
AlCuSiFeMg	W14A	ZSRR	„	3,5-4,5	0,7-1,2	1,5-2,0	1,2-1,7	0,15-0,3	—	Ti 0,05-0,1 +Cr 0,15	odlewniczy	
AlCuMgSiFeNi	LM15	Anglia	„	1,3-3,0	0,5-1,7	0,6-2,0	0,8-1,4	—	0,5-2,8	Ti 0,05-0,3	odlewniczy	
	RR53			1,3-3,0	0,5-1,7	0,6-2,0	0,8-1,4	—	0,5-2,0	Ti +Nb 0,05-0,3	przer. plast.	
	L52	ZSRR	„	1,9-2,5	1,4-1,8	0,5-1,2	1,0-1,5	—	1,2-1,6	—	„	
	RR59			1,9-2,5	1,4-1,8	0,5-1,2	1,0-1,5	—	1,2-1,6	—	„	
AK4 PA29	Polska	„	—	—	—	—	—	—	—	„		
AlSiCuMgNi	SN122A	USA	„	0,5-1,5	0,9-1,3	11-13	—	—	2,0-3,0	—	„	
	LM13	Anglia	„	0,5-1,3	0,8-1,5	11-13	—	—	2-3	—	przer. plast.	
	4032	USA	„	0,5-1,3	0,8-1,3	11,5-13,5	—	—	0,5-1,3	—	„	
	DTD324	Anglia	„	0,7-1,3	0,8-1,5	10,5-13	—	—	0,7-1,3	—	„	
	AlSiCuNi	Niemcy	„	0,4-1,5	0,8-1,5	11,5-13,5	—	—	1,0-2,0	—	„	
	AK12	Polska	„	0,5-1,5	0,8-1,5	12-13,5	—	—	0,5-1,5	—	odlewniczy	

Tabela 3

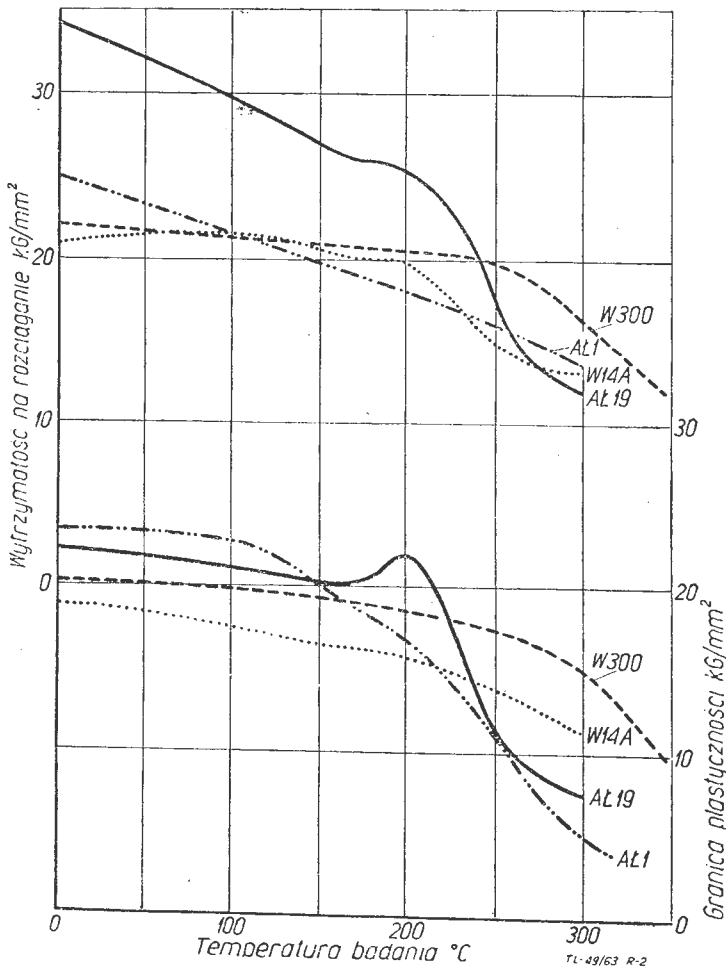
Zestawienie maksymalnych własności wytrzymałościowych stopów poszczególnych typów w temperaturze 300 °C

Typ stopu	Rr kG/ mm ²	Q _{0,2} kG/ mm ²	a %	R ₁₀₀ kG/mm ²	R _{0,2/100} kG/mm ²
AlCu	8	—	14	3,0	1,5
AlCuMn	18	12,6	14,3	8,0	5,5
AlCuNi	16,0*)	—	4,0*)	2,0**)	—
AlCuSi	11,0	—	2,8	3,5	2,4
AlSi	10,0	—	22	3,0	1,2
AlCuMgMn	17,4	11,4	21,5	5,5	3,0
AlCuNiMg	18,0	15,5	1,0	7,0—8,6	5,0
AlCuMgNiFe	16,0	14,0	30	5,0	3,0
AlCuMgSiMn	10,0	8,0	24	4,0	4,0
AlCuSiFeMg	13,0	7,0	1,8	6,0	4,0
AlCuMgSiFeNi	16,5	14,5	10,6	5,0	3,0
AlSiCuMgNi	10*)	4*)	5*)	2,1**)	—

*) Temperatura 315 °C
**) Wytrzymałość na pełzanie po 250 godzinach R₂₅₀

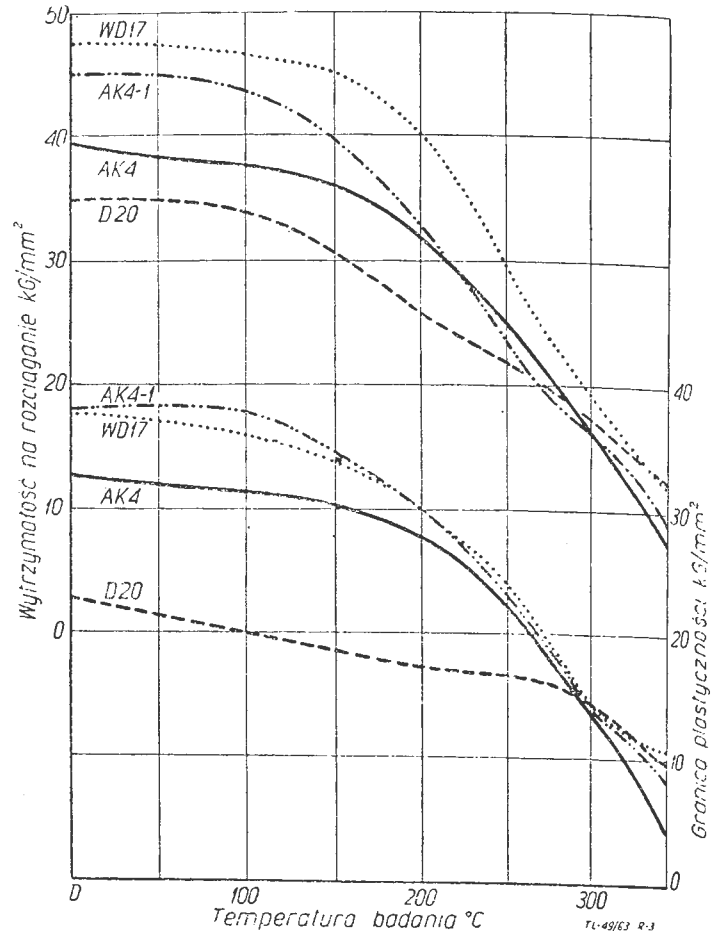
stopu pierwszej grupy zostały opracowane stosunkowo niedawno w oparciu o teoretyczne wytyczne na temat wpływu dodatków stopowych na ciepłowytrzymałość stopów aluminium.

Własności mechaniczne stopów o najwyższej wytrzymałości w zakresie temperatur 20—350 °C przedstawiono na rys. 2—5.

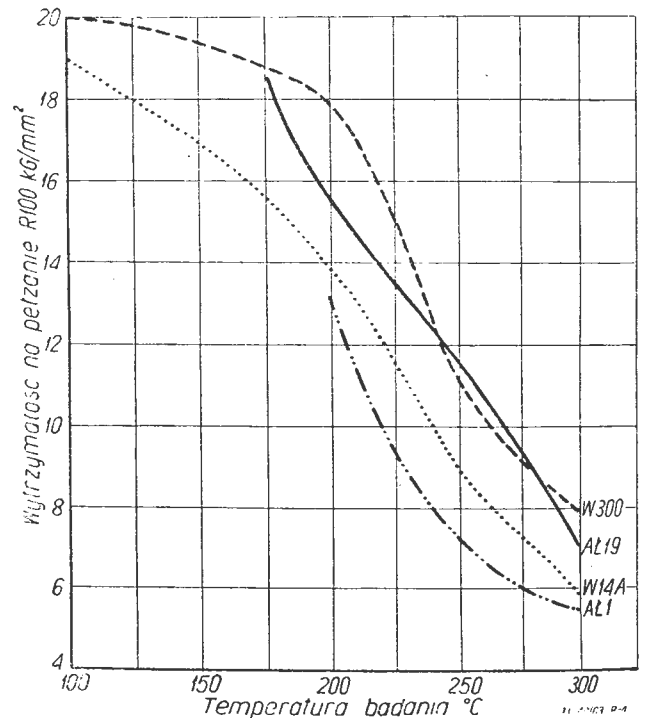


Rys. 2. Zależność wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności od temperatury badania radzieckich ciepłowytrzymałych stopów odlewniczych

Stopy typu AlCuMn i AlCuNiMg pod względem własności mechanicznych nie tylko zaspokajają wymagania stawiane w chwili obecnej materiałom na sprężarki, lecz nawet je wyprzedzają.



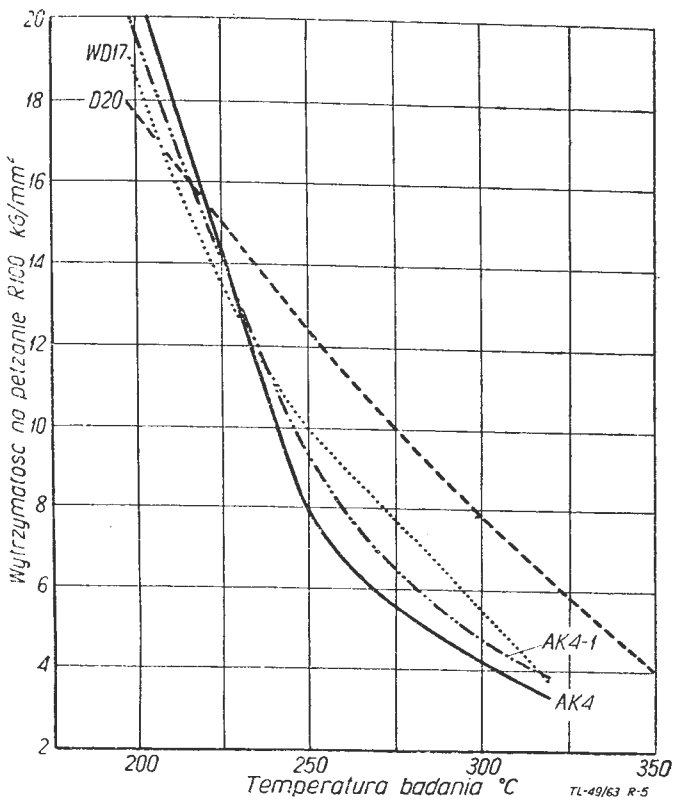
Rys. 3. Zależność wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności od temperatury badania radzieckich stopów ciepłowytrzymałych przerabianych plastycznie



Rys. 4. Przebieg zmian wytrzymałości na pełzanie (R₁₀₀) radzieckich odlewniczych stopów ciepłowytrzymałych w zależności od temperatury badania [12]

5. Spieki aluminium — SAP

W okresie ostatniego dziesięciolecia do produkcji niektórych elementów sprężarek, głównie łopatek, zaczęto stosować nowy materiał na bazie aluminium — spieki



Rys. 5. Przebieg zmian wytrzymałości na pełzanie (R_{100}) rzadkich stopów ciepłowytrzymałych przerabianych plastycznie w zależności od temperatury badania [12]

aluminium znane pod nazwą SAP. Ze względu na wysoki koszt i trudności technologiczne, powszechność i zakres zastosowania spieków aluminium są na razie ograniczone.

Spieki aluminium mają szereg oznaczeń handlowych w różnych krajach (ZSRR — SAP1, SAP2, USA — M255, 257, 276, Anglia — Hyduminium 100, Szwajcaria SAP 865, 895 itp.), w zależności od zawartości tlenu aluminium i technologii wytwarzania.

Charakterystyczną cechą spieków aluminium jest brak skłonności do rekrytalizacji niezależnie od stopnia przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej. Warstewki tlenków tworzące się wokół cząstek proszku w trakcie jego wytwarzania uniemożliwiają w gotowym materiale powstawanie nowych ziaren względnie ich rozrost. Podczas gdy we wszystkich stopach aluminium rekrytalizacja rozpoczyna się już w temperaturze 150–200 °C, w przypadku SAP zjawisko to nie zachodzi praktycznie aż do temperatury topnienia. Stabilność struktury powoduje możliwość zachowania wysokich własności mechanicznych spieków aluminium w zakresie do 500 °C.

Technologia produkcji półfabrykatów z SAP jest złożona; sprowadza się ona zasadniczo do:

- wstępnego zagęszczania (brykietowania) proszku aluminium o specjalnej łuskowej strukturze przez prasowanie na zimno przy ciśnieniu 20–50 kG/cm². Zimne wypraski osiągają ciężar właściwy rzędu 1,5–2,1 g/cm³;
- spiekania połączonego z prasowaniem w temperaturze 500–600 °C przy ciśnieniu 40–60 kG/cm². Ciężar właściwy wyprasek gorących sięga 2,7 g/cm³;
- tłoczenia prętów lub kształtowników w temperaturze 500–600 °C pod ciśnieniem 50–100 kG/cm², przy czym ciężar właściwy wzrasta już nieznacznie (do 2,8 g/cm³);
- ewentualnej dalszej przeróbki plastycznej na odkuwki, rury, blachy lub taśmy w tej samej temperaturze.

Ponieważ plastyczność SAP obniża się ze wzrostem zawartości tlenków, do wykonywania prętów i kształtowników stosuje się materiał z zawartością 13–14% Al₂O₃, natomiast odkuwki, blachy i rury wykonuje się z materiału o mniejszej zawartości Al₂O₃ (10–11%).

Przebieg zmian własności mechanicznych SAP w podwyższonych (i obniżonych) temperaturach ilustruje rys. 6. SAP wykazuje odrębny od innych materiałów stosunek przebiegu zmian udarności i wydłużenia. Zwykle wzrost

temperatury badania powoduje równoczesny wzrost zarówno udarności jak i wydłużenia, natomiast SAP charakteryzuje się spadkiem wydłużenia ze wzrostem temperatury. Różnica w zachowaniu się SAP w porównaniu ze stopami aluminium obejmuje również stosunek granicy proporcjonalności do granicy płynności. W temperaturze otoczenia stosunek ten wynosi około 50%, natomiast w temperaturze 400 °C — 75%.

Spieki aluminium w temperaturze otoczenia wykazują niższą wytrzymałość niż najbardziej ciepłowytrzymałe stopy aluminium. Począwszy jednak od temperatury 250–300 °C przewaga SAP jest bezsporna.

Wytrzymałość na pełzanie i granica pełzania spieków aluminium w porównaniu z tymi stopami jest również odpowiednio wyższa. W tabeli 4 podano porównawcze zestawienie wytrzymałości na pełzanie tych stopów aluminium i SAP. Wytrzymałość zmęczeniowa wykazuje przewagę spieków aluminium nad ciepłowytrzymałymi stopami aluminium dopiero powyżej 250 °C.

Tabela 4

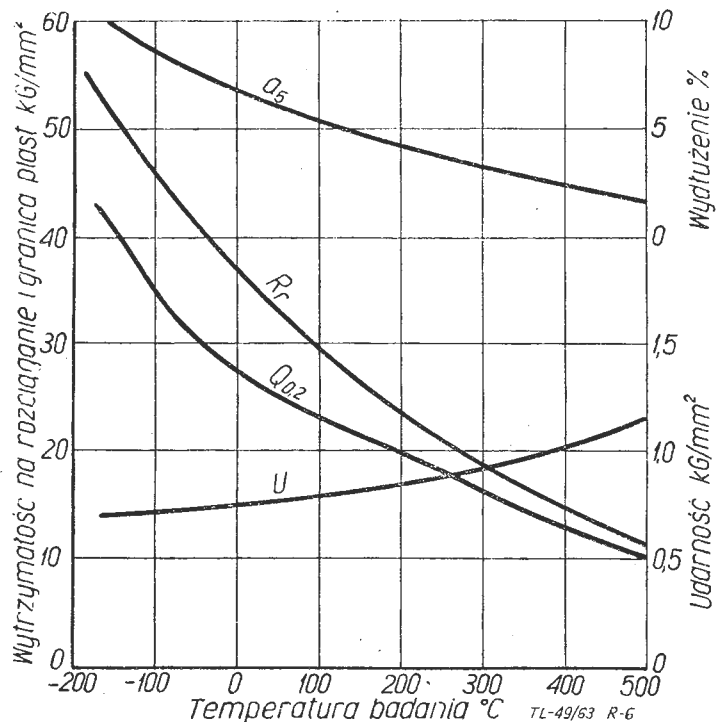
Porównawcze zestawienie wartości wytrzymałości na pełzanie (R_{100}) SAP i stopów WD17, D20, W300 i Al19

Temperatura badania (°C)	Wytrzymałość na pełzanie (kG/mm ²)				
	SAP	WD17	D20	W300	Al19
250	13	10	12,5	10,0	12,0
300	12	5,5	8,0	6,0	7,0
350	8,5	3,5*	4,0	3,75	3,5
500	4,5	—	—	—	—

*) w temperaturze 320 °C

Do typowych własności SAP należy jego odporność na długotrwałe wygrzewanie. Przeprowadzone badania wykazały, iż po dwuletnim okresie wygrzewania w temperaturach do 500 °C nie stwierdzono praktycznie żadnych zmian własności wytrzymałościowych, natomiast wszystkie badane stopy typu AlCuNi, AlMgSi i AlCuMg wykazywały poważne zmiany po przekroczeniu temperatury 100 °C (rys. 7).

W zakresie własności fizycznych SAP odznacza się znacznie niższymi współczynnikami rozszerzalności cieplnej w porównaniu ze stopami aluminium. Przewodność cieplna zbliżona jest do czystego aluminium. Odporność korozyjna SAP zarówno w temperaturze otoczenia jak i w podwyższonych temperaturach odpowiada odporności czystego aluminium. Zestawienie własności fizyko-mechanicznych SAP zawiera tabela 5.

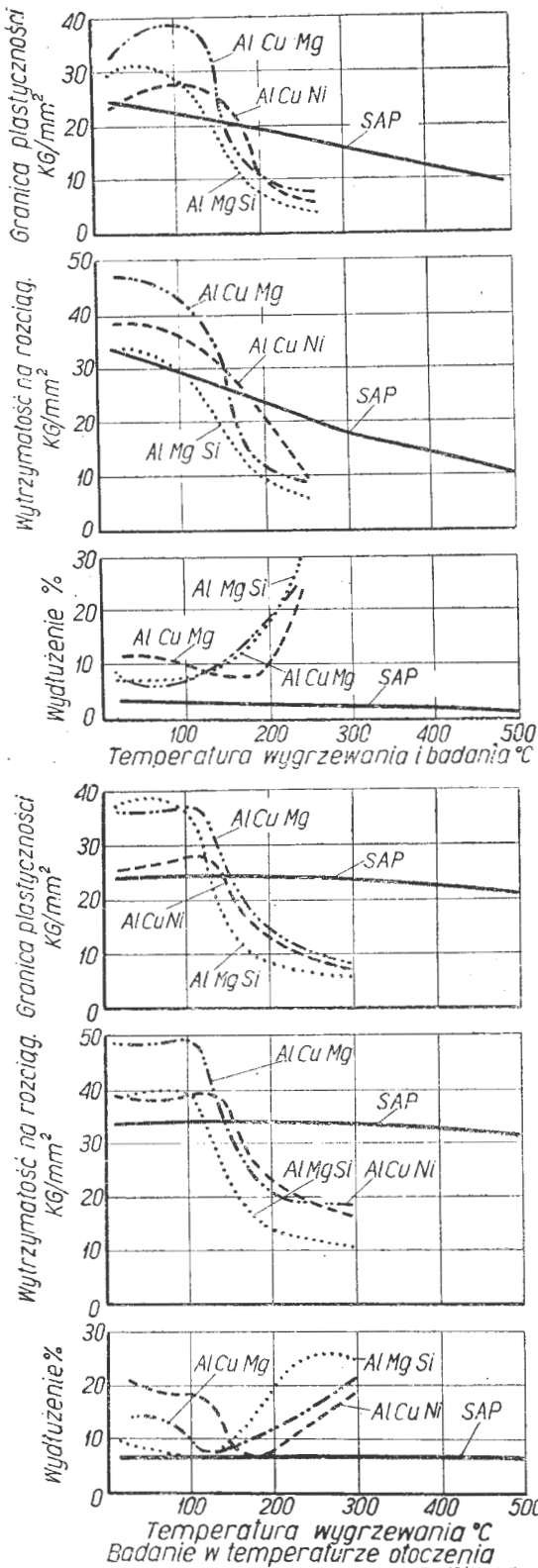


Rys. 6. Własności mechaniczne SAP w funkcji temperatury badania [28]

Tabela 5

Zestawienie najważniejszych własności fizykochemicznych SAP w porównaniu z aluminium i stopami typu AlCuNi

Własności	SAP	Aluminium (99,5%) w stanie wyżarzonym	Stopy typu AlCuNi utwardzone dyspersyjnie
CieŜar właściwy (g/cm ³)	2,8	2,7	2,8
Moduł spręŜy- stości podłuŜ- nej — E (kG/mm ²)	7300—7700	6500—7000	7000—7500
Moduł spręŜy- stości po- przecznaj — G (kG/mm ²)	2700—2900	2400—2600	2600—2800
Współczynnik rozszerzalno- ści cieplnej (cm/cm ^o) · 10 ⁻⁶ w zakresie:			
20—100 °C	20	24	23
20—200 °C	21	25	24
20—300 °C	21,5	26	24,5
20—400 °C	22	27	25
20—500 °C	22,5	28	25,5
Przewodność cieplna w za- kresie 20—500 °C (Kcal) m.h.°C	150	175	110



Rys. 7. Wpływ długotrwałego (okres 2 lat) wygrzewania na własności wytrzymałościowe SAP i ulepszonych stopów aluminium [28]

W oparciu o wysoce pozytywne znaczenie dodatków stopowych jako czynników powodujących wzrost ciepłowytrzymałości stopów aluminium rozpoczęto badania nad tzw. spiekami „stopami”, (zwanymi również „stopowymi” spiekami aluminium). Spieki te otrzymuje się w dwojaki sposób: na drodze spiekania i tłoczenia mieszaniny proszku aluminium z proszkami innych metali lub przez spiekanie i tłoczenie proszków wykonanych z odpowiadających stopów. Próby wprowadzania dodatków uszlachetniających do SAP takich jak miedź, magnez, żelazo i inne nie przyniosły jednakże oczekiwanych rezultatów. Własności mechaniczne w zakresie temperatur do 300 °C uległy co prawda podwyższeniu, jednakże w tym zakresie stosowanie SAP jest niecelowe. Powyżej temperatury 300 °C stwierdzono pogorszenie własności

„stopowego” SAP w porównaniu z SAP bez dodatków innych składników.

Badania dotyczące spiekanych „stopów” aluminium są niepełne i dlatego nie można z góry przekreślać możliwości rozwoju tego typu materiałów.

Na podstawie dokonanego przeglądu własności stosowanych ciepłowytrzymałych stopów aluminium należy stwierdzić, że opracowywanie nowych materiałów do pracy w podwyższonych temperaturach zmierza w trzech zasadniczych kierunkach. Pierwszy to opracowanie nowych stopów na bazie układów AlCuMn, AlCuNiMg przez wprowadzanie do nich nieznacznych ilości innych składników stopowych jak Ti, Zr, Nb, Co, V, Sb, Cd, przeznaczonych do pracy w temperaturach powyżej 300 °C. Drugi kierunek ma na celu opracowywanie stopów do pracy w temperaturach poniżej 300 °C, charakteryzujących się korzystnymi własnościami technologicznymi przy zachowaniu średniej ciepłowytrzymałości. Są to siluminy eutektyczne i nadeutektyczne zawierające miedź, magnez i nikiel. Trzeci kierunek polega na oparowaniu i doskonaleniu technologii produkcji wyrobów typu SAP o różnej zawartości tlenu glinu.

LITERATURA

1. Luftfahrttechnik, 1960, 12, 337
2. E. I. Kordik — Luftfahrttechnik, 1961, 10, 299—308
3. H. Pearson, R. M. Fitzgerald — Luftfahrttechnik, 1959, 4, 106—113
4. R. Brunetaud — Technique et Science Aeronautiques, 1958, 2, 71—76
5. D. Fiecke — Luftfahrttechnik, 1959, 9, 305—321
6. G. Güntler — VDI-Berichte, 1958, 28, 49—57
7. A. I. Kennedy, A. R. Sollars — Aircraft Engineering, 1960, 374, 100—105
8. I. B. Fonda — Luftfahrttechnik, 1961, 10, 288—292
9. W. Jung-König, U. Zwicker — Aluminium, 1958, 6, 337—345
10. A. A. Boczwiar — Izwestija Akademii Nauk SSSR, OTN, 1957, 1
11. M. W. Zacharow — Issledowanije splawow ewietnych metalow, cz. II, Moskwa 1960, S9
12. I. I. Kornitow — Fizykochemiczne osnowy żaroprocności spławow, Moskwa 1961
13. R. Develay — Revue de l'Aluminium, 1962, 300, 843—854
14. F. H. Smith — Light Metals, 1954, 1, 17—20
15. I. Weller — Deutsche Flugtechnik, 1960, 6, 177—181
16. A. S. Wiesielow — Awiacjonnaja Promyszlennost', 1959, 8, 68—69
17. A. S. Wiesielow — Awiacjonnaja Promyszlennost', 1959, 7, 64—65
18. W. I. Stotin, G. I. Eskin — Awiacjonnaja Promyszlennost', 1959, 3, 49—51
19. H. E. Gresham, A. G. Farnsworth, W. D. Hall — Patent ang. nr 686—819 i 686—820 — 28.I.1953
20. Patent USA, nr 2 781 263 — 12.II.1957
21. Aircraft Production, 1962, 6, 193
22. M. W. Doyle — Aircraft Production, 1961, 12, 440—449
23. Awiacjonnaja Promyszlennost', 1958, 6, 98—102
24. G. A. Pagonis — The Light Metals Handbook, New York 1955
25. Sprawoznik po maszynostroitelnym materialam, t. 2, Moskwa 1959
26. I. F. Kolobniew — Tiermiczieskaja obrabotka aluminijewych spławow, Moskwa 1951
27. Aluminium Taschenbuch, Düsseldorf 1955
28. R. Irmann — Aluminium, 1957, 4, 250—259
29. Tiejoprocnyj material iz spieczionnoj aluminijewoj pudry — SAP, Moskwa 1961.

Stopy żarowytrzymałe na osnowie niklu

I. Wstęp

Postęp w rozwoju budowy turbin spalinowych jest związany przede wszystkim z rozwojem produkcji stopów żarowytrzymałych, ponieważ współczynnik sprawności tych maszyn zależy w dużym stopniu od temperatury spalin na wlocie do turbiny. Wiadomo że zależność ta jest wprost proporcjonalna: im wyższa temperatura spalin, tym wyższy uzyskuje się współczynnik sprawności turbiny, a to z kolei wymaga użycia materiałów o własnościach wytrzymałościowych, przesuniętych w zakres wysokich temperatur. Przy podwyższeniu temperatury spalin na wlocie do turbiny z 815° do 1040 °C w lotniczym silniku odrzutowym — ciąg wzrasta o 30—45%. Równocześnie przy określonych warunkach pracy uzyskuje się również zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa [1].

1. Łopatkki wirnikowe

W zależności od rodzaju turbiny, to jest jej konstrukcji i mocy, łopatkki turbiny nowoczesnych, na przykład seryjnych lotniczych silników turbinowych wykonywane są przeważnie z materiałów przerabianych plastycznie na drodze kucia i prasowania na gorąco. Do tego celu angielski przemysł używa stopów nimonic 90, 95, 100, 105, a w ZSRR stopów niklowych FJ 437B, 617, 598, 445, 826, 827 i innych¹⁾.

Ostatnio od kilku lat coraz częściej na łopatkki wirnikowe, szczególnie pierwszych stopni turbin wielostopniowych, stosowane są żarowytrzymałe stopy odlewnicze, jak na przykład mimocast — 258 (Anglia) — GMR — 235D, Inconel 713C, HDA 8294, JN-100/25/ i inne (USA) oraz ZS6, ZS6K, (ZSRR).

W turbinach stacjonarnych, gdzie do uzyskania lepszego współczynnika sprawności, w porównaniu z turbiną parową, wymagane jest stosowanie temperatur, w których nimonic 80 i 80A musi zastąpić stale wysokostopowe. Również dla tych turbin jest również rozważane zagadnienie stosowania stopów odlewniczych, co wpływa w bardzo zasadniczy sposób na ogólny koszt ich produkcji.

2. Kierujące łopatkki turbinowe

W większości przypadków łopatkki kierujące turbin gazowych wykonywane są ze stopów odlewniczych, przy czym zarówno przemysł USA, jak i do niedawna przemysł angielski stosował wyłącznie do tego celu stopy o podstawie kobaltowej. Ten ostatni rozpoczął od niedawna stosowanie żarowytrzymałych stopów odlewniczych typu nimocast 90, 242, 257, 258, w ZSRR początkowo był stosowany również stop kobaltowy ŁK-4 (Vitalium), a obecnie, w nowych konstrukcjach prawie wyłącznie zastosowanie znalazły odlewnicze stopy niklowe takie, jak ZS-3, ANW-300, ZS6, ZS6K.

Należy nadmienić, że odlewnicze stopy niklowe charakteryzują się bardzo wysoką żaroodpornością (na utlenianie) oraz odpornością na pacerzenie się elementów w wysokich temperaturach (na uderzenie cieplne).

Skład chemiczny i własności niektórych stopów odlewniczych podano w tabeli 1 i rys. 1 [2, 3, 4, 5, 7].

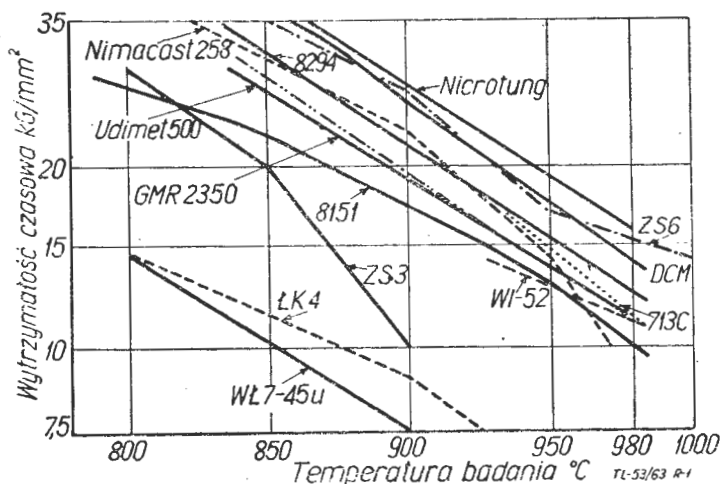
3. Wymagania stawiane przy eksploatacji i najczęściej spotykane wady łopatek w produkcji i eksploatacji

¹⁾ Własności mechaniczne tych stopów zostały szeroko omówione w poprzednich publikacjach autora, patrz: „Technika Lotnicza”, nr 5—6, str. 3, XI/1956/nr 5 str. 139 oraz Zeszyty Instytutu Lotnictwa IV/1958.

Materiałom przeznaczonym na łopatkki turbin gazowych, w szczególności na łopatkki wirnikowe stawiane są bardzo wysokie i wszechstronne wymagania. Spowodowane to jest specjalnie ciężkimi warunkami pracy, gdzie występują nieraz takie czynniki, jak wysokie naprężenia rozciągające, warunki sprzyjające korozji, duże zmiany temperatury, drgania elementów oraz zanieczyszczenia erozji na skutek obecności cząstek stałych w spalinach. Narzuca to zasadnicze kryteria kwalifikujące przydatność stopów żarowytrzymałych:

- 1) wytrzymałość czasowa oraz granica pełzania,
- 2) wytrzymałość na zmęczenie,
- 3) własności udarnościowe,
- 4) żaroodporność (odporność na utlenianie),
- 5) odporność na zmiany temperatury — zmęczenie cieplne.

Również przy doborze materiału przez konstruktora muszą być brane pod uwagę własności fizyczne takie jak: ciężar właściwy, współczynnik rozszerzalności i przewodności cieplnej.



Rys. 1. Wytrzymałość czasowa (100 godz.) odlewniczych stopów żarowytrzymałych [2, 3, 4, 5, 7]

W przypadku, gdy łopatkki mają być wykonywane ze stopów odlewniczych, to technologia wytwarzania tych elementów stawia również dodatkowe wymagania, a mianowicie takie, że metal musi być odpowiednio rzadko-płynny, aby dobrze wypełniał formy oraz nie może posiadać skłonności, w stanie płynnym, do absorbowania gazów i wydzielania ich podczas krzepnięcia, gdyż to powoduje porowatość odlewów.

Odlewy muszą być obrabiane mechanicznie dla nadania im ostatecznego kształtu oraz gładkości niektórych powierzchni. Wymagana jest wobec tego obrabialność narzędziami skrawającymi w takim stopniu, aby wydajność pracy była ekonomiczna i nie występowała nadmierna ilość braków.

W czasie eksploatacji pojawiają się następujące wady: odkształcenia krawędzi spływu, wyrastanie elementów połączone z ogólną deformacją (większą w przypadku łopatek kierujących), pęknięcia, urywanie się łopatek wirnikowych, erozja i inne.

Odkształcenie się krawędzi spływu ma najczęściej miejsce w górnej części łopatek kierujących, gdzie występuje najwyższa temperatura gazów spalinowych. Krawędź spływu zostaje tutaj odgięta przez napór gazów. A dzieje się to na skutek niewystarczającej wytrzymałości czasowej i granicy pełzania stopu.

Wyrastanie łopatek w czasie pracy oraz ich ogólna deformacja jest połączona ze zjawiskiem zmian strukturalnych. Zachodzi w tych przypadkach najczęściej

Tabela 1

Skład chemiczny odlewniczych stopów żarowytrzymałych

Kraj produkujący	Czyszczenie stopu	Skład chemiczny w %													Zastosowanie
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	B	
Polska	WL7-45u	0,10-0,20	≤0,70	≤0,55	19,5-20,5	45-47	—	—	7-9	—	—	—	rcszta	0,03-0,05	Łopatki kierujące
	ŁK-4	0,15-0,25	0,60	0,30	25-28	3,0-3,75	podstawa	4,5-5,5	0,50	—	—	—	1,5	—	„
ZSRR	ANW-300	0,1	—	—	14-17	podstawa	—	—	7-10	—	1,5-2,0	4,5-5,5	≤1,0	≤0,1	„
	ZS-3	0,16	—	—	15	„	—	4,8	5,0	—	2,0	3,0	5	0,06	„
	ZS-6	—	—	—	skład nieznan			—	—	—	—	—	—	—	—
Anglia	Nimocast 242	0,3	—	—	20,0	podstawa	10,0	10,0	—	—	0,3	0,2	1,0	—	Łopatki kierujące
	Nimocast 257	0,08	—	—	20,0	„	16,0	—	—	—	1,6	0,9	2,0	—	Łopatki kierujące i elementy pierścieniowe
	Nimocast 258	0,2	—	—	10,0	„	20,0	5,0	—	—	3,7	4,8	2,0	—	Łopatki kierujące i próbnic serie łopatek wirnikowych
USA	H.D.A. 8294	0,01	0,1	0,1	15,0	73,5	—	5,0	—	—	—	6,7	—	—	Łopatki wirnikowe i kierujące
	Inconel 713C	0,15	0,1	0,3	12,5	73,0	—	4,5	—	2,0	0,75	6,0	0,3	—	„
	GMR-2350	0,15	0,05	0,15	15,5	70,0	—	5,5	—	—	2,3	3,5	4,3	0,08	„
	DCN	0,08	0,10	0,15	15,0	podstawa	—	5,0	—	—	3,5	4,6	5,0	0,08	„
	Nicrotung	0,10	—	—	12,0	podstawa	10	—	8	—	4,0	4,0	—	0,05 i 0,05 Zr	„
	Udimet-500	0,07	0,1	0,3	18,0	63,5	18	4,5	—	—	3,8	3,0	0,5	—	„
	WI-52	0,4	0,3	0,3	19,5	1,0	68,0	—	11,0	1,5	—	—	0,5	0,09	„
H.D.A. 8151	0,5	0,6	0,6	20,0	—	66,0	—	12,5	—	—	—	—	0,05	„	

rozpad niektórych faz, a więc jest to sprawa trwałości struktury.

Pęknięcia łopatek powstają wówczas, kiedy materiał nie posiada odpowiedniej odporności na gwałtowne zmiany temperatury, to jest małą odporność na tak zwane uderzenia cieplne. Jest to pośrednio związane ze współczynnikiem rozszerzalności. Stopy o wysokim współczynnikiem rozszerzalności ulegają pęknięciom przy zmianach temperatury łatwiej od tych, które posiadają mały współczynnik rozszerzalności.

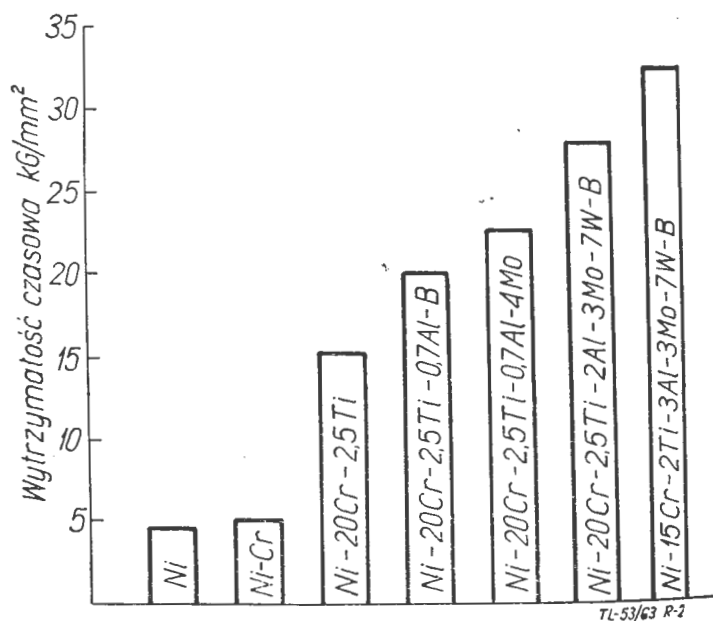
Urywanie się łopatek wirnikowych, jako wynik przekroczenia własności wytrzymałościowych materiału, powodowane być może niejednorodnością struktury i drobnymi wadami, trudnymi do ujawnienia obecnymi metodami kontroli.

II. Zarys metaloznawstwa stopów żarowytrzymałych na osnowie niklu

Wszystkie stopy niklowe, charakteryzujące się wysokimi własnościami żarowytrzymałymi, są z reguły wieloskładnikowe, a ich optymalne własności uzyskuje się przez odpowiedni dobór jakościowy i ilościowy szeregu dodatków uszlachetniających. Wpływ różnych pierwiastków na wytrzymałość czasową stopów niklowych ilustruje rys. 2 [2].

Jednym z klasycznych stopów żarowytrzymałych, który w latach pięćdziesiątych stał się podstawą dla konstrukcji i produkcji turbinowych silników odrzutowych oraz stanowił bazę rozwoju doskonalszych stopów, to angielski

nimonic 80 i odpowiednik radziecki EJ437 o składzie Ni-20, Cr-2,5, Ti-0,7, Al-B, przedstawiający sobą w zasadzie stop układu poczwórny Ni-Cr-Ti-Al.



Rys. 2. Wpływ dodatków stopowych na wytrzymałość czasową (800°C, 100 godz.) stopów o podstawie niklu [2]

Biorąc pod uwagę warunki pracy stopów żarowytrzymałych i związaną z nimi kinetykę przemian, jaka może mieć miejsce w samej budowie (strukturze) materiału należy stwierdzić, że wysokie własności żarowytrzymałe stopów zależą od następujących czynników:

1) stopnia utwardzenia i stabilności temperaturowej roztworu stałego,

2) temperaturowej stabilności pierwotnych i wtórnych wydzieleni fazy utwardzającej, to jest wysokiej odporności na roztwarzanie i koagulację w wysokich temperaturach,

3) wzajemnego oddziaływania między roztworem a fazą wydzieloną — charakteryzującego się szybkością dyfuzji składników stopowych zawartych w tworzywie,

4) wytrzymałości granic ziarn.

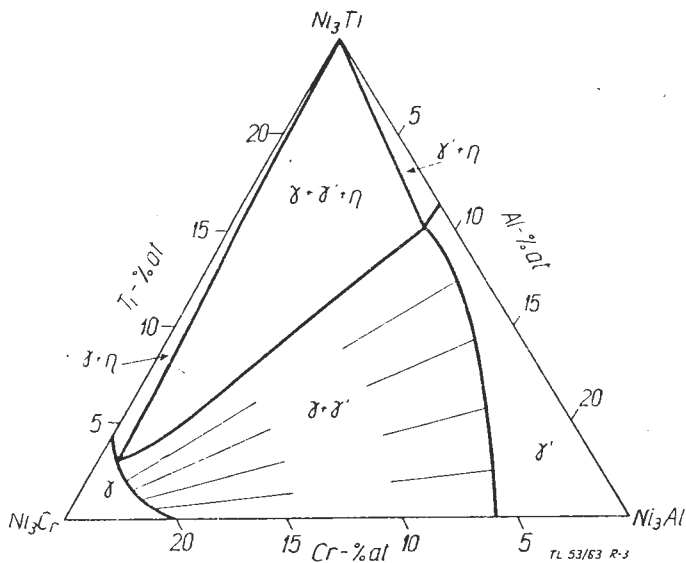
Badania strukturalne stopów układu podwójnego Ni-Cr, układów potrójnych Ni-Cr-Ti, Ni-Cr-Al, i Ni-Ti-Al oraz układu poczwórnego Ni-Cr-Ti-Al i innych, przeprowadzone przez wielu uczonych, dały częściowo podstawy świadomego postępowania w zakresie doskonalenia i tworzenia nowych stopów.

III. Składniki strukturalne stopu nimonic 80/80A (EJ437/437A-ZSRR)

Wszystkie stopy żarowytrzymałe na osnowie niklu (nimonic, inconel, EJ 437) opierają swoje własności w wysokich temperaturach na zjawisku utwardzenia samego roztworu stałego oraz stopu w wyniku procesów wydzieleniowych, polegających na tworzeniu się dyspersyjnej fazy międzymetalicznej. W związku z powyższym, czynnikiem na równi ważnym ze składem chemicznym stopu są parametry obróbki cieplnej, to jest temperatura i czas oddziałujące na intensywność wydzielenia się faz utwardzających stop.

Skład chemiczny stopów nimonic 80 i EJ 437 podany jest w tabeli 2 i zaznaczony czarnym punktem na rys. 3 i 4.

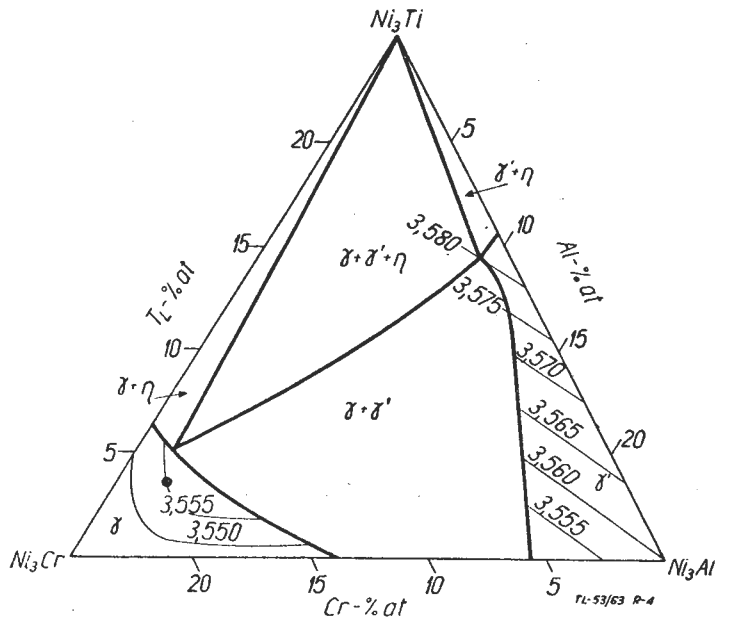
Stop nimonic 80A oraz EJ 437 posiadają prawie ten sam skład chemiczny jak stopy bez indeksu „A”, a róż-



Rys. 3. Wykres równowagi układu pseudopotrójnego $Ni_3Cr-Ni_3Ti-Ni_3Al$, przy 750 °C. Przekrój izotermiczny [8]

nią się od nich tylko nieco wyższymi własnościami wytrzymałościowymi, uzyskanymi na skutek zastosowania bardziej czystych materiałów wsadowych.

Badania strukturalne tego stopu przeprowadzone przez wielu uczonych i opublikowane w ostatnim dziesięciu lat nie wyczerpują jednoznacznie zagadnienia kinetyki zjawisk zachodzących w różnych temperaturach. Stwierdzono, że przy rozpadzie w procesie starzenia przesyconego roztworu stałego — γ z temperatury rzędu 1100 °C wydzieliła się faza międzymetaliczna typu $Ni_3(Al, Ti)$, w której według Nordheima i Granta [10] $\frac{2}{3}$ atomów Al może być zastąpione przez Ti. W przypadku, gdy w stopach stosunek Ti (Al=4 [1] c. at.) występuje już tylko faza $\eta - Ni_3Ti$. W stopie typu nimonic 80 zasadniczą fazę wydzieleniową stanowi $Ni_3(Al, Ti)$, przy czym występuje ona wyraźnie przy starzeniu stopu w zakresie temperatur 700—880 °C. Według Betteridge [8] powyżej temperatury 880 °C faza ta przechodzi całkowicie do roztworu. Wielkość pojedynczych cząsteczek tej fazy powstałej w temperaturze 750 °C wynosi rzędu kilku dziesiątych mikrona, [15, 16], przy czym im wyższa temperatura i dłuższy czas przebywania, tym większa zachodzi koagulacja tej fazy. Prócz fazy $Ni_3(Al, Ti)$



Rys. 4. Wykres równowagi układu pseudopotrójnego $Ni_3Cr-Ni_3Ti-Ni_3Al$, przy 1000 °C. Przekrój izotermiczny [8]

w stopie nimonic 80/80A występują również węgliki, a w niektórych przypadkach azotki, przy czym te ostatnie oraz węgliki tytanu występują w znikomej ilości i to jako wydzielenia pierwotne.

Betteridge i Franklin [17] stwierdzili, że w stopie nimonic 80/80A może występować dwojakiemu rodzajowi węglik chromu, to jest typu $Cr_{23}C_6$ oraz Cr_7C_3 , przy czym rodzaj i parametry obróbki cieplnej warunkują, który typ węglika chromu występuje w stopie.

Całkowite rozpuszczenie się węglika chromu zachodzi w temperaturach powyżej 1150 °C. Przy powolnym chłodzeniu z temperatur wysokich do około 1000 °C następuje wydzielenie się węglika chromu Cr_7C_3 (przy zawartości 0,03—0,012% C). Następnie wygrzanie stopu przy niższych temperaturach powoduje już przemianę tego

Tabela 2

Skład chemiczny stopów Nimonic 80 i EJ437

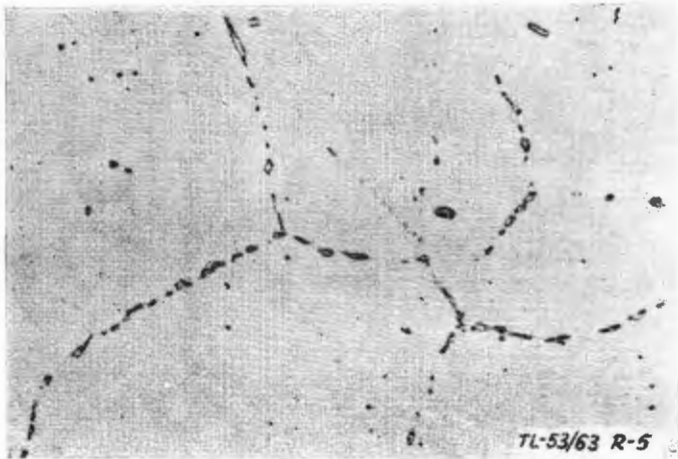
Cznaczenie stopu	Skład chemiczny w %							Ni
	C	Mn	Si	Cr	Al	Ti	Fe	
Nimonic 80/80A	≤ 0,1	≤ 1,0	≤ 1,0	ok. 20	0,5—1,8	1,8—2,7	≤ 5,0	reszta
EJ 437	≤ 0,08	≤ 0,50	≤ 1,00	19,0÷23,0	0,40÷1,10	2,00÷2,90	≤ 2,5	reszta
EJ 437A	≤ 0,06	≤ 0,35	≤ 0,65	19,0—22,0	0,55÷0,95	2,30÷2,70	≤ 1,0	reszta

Skład nimonic 80/80A podany według „Les Alliages de nickel Wiggin”, Birmingham 16
 Skład EJ437 według GOST 5632-51
 Skład EJ437A według Cz-MTU 5211-55

węgliku na węgiel $Cr_{23}C_6$. Całkowita transformacja zachodzi na przykład w temperaturze $850^{\circ}C$ przy czasie wygrzania około 24 godzin lub dłużej w temperaturach niższych. Niecałkowite jeszcze przejście z jednego typu w drugi ma miejsce na przykład przy wygrzaniu przez 200 godzin w $750^{\circ}C$, 500 godzin w $700^{\circ}C$, a całkowicie po 4000 godzin w 750° , i po 14 000 godzin w $700^{\circ}C$. Jeżeli węgliki tworzą się przy wysokich temperaturach rzędu ok. $1100^{\circ}C$, wtedy wydzielanie się ich ma miejsce po granicach ziaren (rys. 5), przy niskich temperaturach węgliki rozmieszczone są w masie roztworu stałego.

Ostatnio opublikowane wyniki badań przez Ziminę i Pridancewa [18] rozszerzają dotychczasowe dane dotyczące kinetyki przemian w stopach EJ437 (nimonic 80/80A), gdzie rozpad przesyconego roztworu stałego według wyników badań zachodzi w dwóch etapach:

a) pierwszy etap charakteryzuje się wydzielaniem metastabilnej fazy $\alpha' - Ni_3(Ti, Al)^2$ posiadającej ten sam typ sieci co roztwór stały o parametrze $3,58 k\text{\AA}$; przy czym skład chemiczny fazy α' jest bardzo zbliżony do składu związku Ni_3Ti , w którym część atomów tytanu zastąpiona została przez aluminium,



Rys. 5. Mikrostruktura stopu nimonic 80A. Widoczne węgliki chromu wydzielone po granicach ziaren. Pow. $500 \times$ [8]

b) w drugim etapie następuje tworzenie się stabilnej, płytkowej fazy $Ni_3Ti - \eta$ o sieci heksagonalnej ($a = 5,11 k\text{\AA}$; $c = 8,29 k\text{\AA}$; $c/a = 1,63$).

Przyczynę procesów przechodzenia kubicznej α' — fazy w heksagonalną η — fazę stanowi dążność układu do osiągnięcia stanu równowagi na drodze dyfuzji i stąd szybkość przemiany $\alpha' \rightarrow \eta$ zależna jest od temperatury i czasu starzenia, stanu naprężenia panującego w materiale, jak i składu chemicznego stopu. Ustalono, że dla stopu EJ 437 największa intensywność procesu przemiany $\alpha' \rightarrow \eta$ ma miejsce przy $800^{\circ}C$.

Badanie przemian strukturalnych zachodzących w zakresie $500^{\circ}C$ do $910^{\circ}C$ podczas starzenia przesyconego stopu EJ 437, przeprowadzone przez Czernyja [19], pozwoliło na stwierdzenie, że stosując metodę elektrochemicznej izolacji składników strukturalnych (faz), można wydzielić fazę $\alpha' - Ni_3(Al, Ti)$ ze stopu starzonego w zakresie 700 do $910^{\circ}C$ (przy czasie wygrzania 4 godziny). Przy wzrastającym czasie wygrzania w zakresie niższych temperatur, to jest $700-550^{\circ}C$ cząstki fazy α' powiększają się, następnie przy wygrzewaniu w temperaturze 900 i 910° następuje zmniejszenie się ich wielkości tak, że po starzeniu stopu w $910^{\circ}C$ — wielkość cząstek jest tego samego rzędu, co w przypadku temperatury $700^{\circ}C$.

Podczas starzenia stopu w temperaturze 500 do $910^{\circ}C$ ma miejsce wzrost wielkości parametru sieci krystalograficznej roztworu stałego, przy czym zmiana ta przebiega następująco: parametr roztworu stałego w stanie przesyconym wynosi $3,5557 \text{ „\AA”}$. Wygrzanie w zakresie

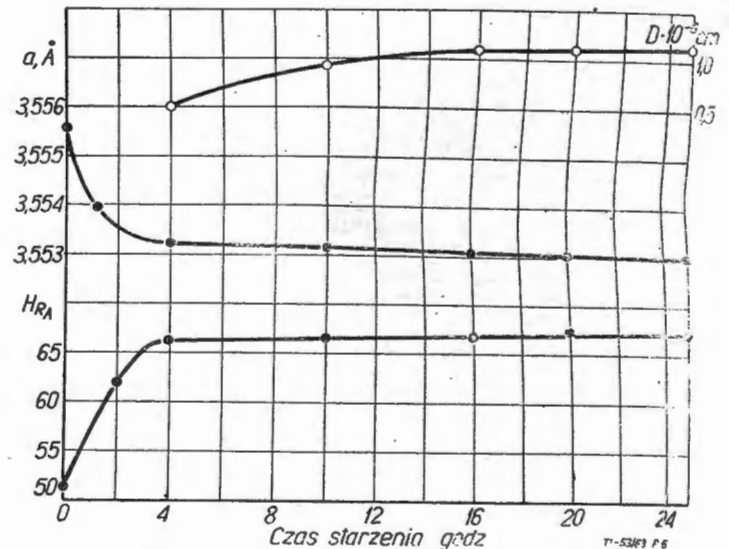
²⁾ W pracach radzieckich z ostatnich lat fazę metastabilną o składzie bliskim Ni_3Ti i strukturze Ni_3Al oznacza się przez α' , w odróżnieniu od fazy stabilnej γ' o tym samym typie sieci krystalicznej, lecz opartej na związku chemicznym Ni_3Al . Szkoła „zachodnia” nie różnicuje tego i oznacza jednym symbolem γ' zarówno fazę Ni_3Al jak i $Ni_3(Al, Ti)$. Przyjęto oznaczenia radzieckie.

temperatur $500-600^{\circ}$ praktycznie nie wpływa na zmianę wielkości parametru „ α' ”.

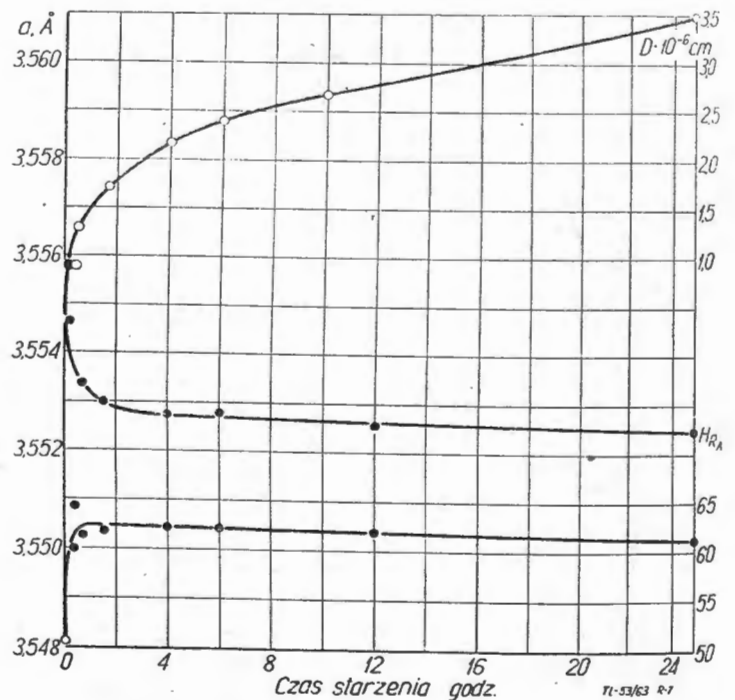
W zakresie temperatur starzenia $600-800^{\circ}C$ parametr sieci wyraźnie zmniejsza się, osiągając przy $800^{\circ}C$ wielkość $a = 3,5527 \text{ \AA}$. Powyżej temperatur $800^{\circ}C$ następuje wzrost parametru, gdzie przy $950^{\circ}C$ wynosi $a = 3,5546 \text{ \AA}$, to znaczy jego wielkość zbliża się do wielkości charakteryzującej stan przesycony. Po starzeniu stopu w warunkach $800^{\circ}/25$ godzin parametry sieci roztworu stałego osiągają wartość $a = 3,5525 \text{ \AA}$, zaś parametry sieci fazy $\alpha' - Ni_3(Al, Ti)$ wartość $a = 3,5843 \text{ \AA}$. Wzrost twardości zaobserwowany podczas starzenia stopu (rys. 6 i 7) [19] autor tłumaczy powstawaniem submikroskopowej niejednorodności koncentracyjnej stopu, wywołanej procesem rozpadu roztworu stałego.

IV. Wpływ innych dodatków na własności stopu nimonic 80/80A

Dane literaturowe na ten temat są bardzo skąpe i ograniczają się w zasadzie do podawania wskaźników wytrzymałościowych lub gotowych charakterystyk stopów o określonym składzie [2, 3 4, 5, 6, 7]. Badania



Rys. 6. Zmiana wielkości wydzieleni fazy α' — średnicy (D), parametru sieci krystalograficznej (a) i twardości (HRA) — stopu EJ437 po starzeniu w temp. $700^{\circ}C$ przez [19]



Rys. 7. Zmiana wielkości wydzieleni fazy α' — średnicy (D), parametru sieci krystalograficznej (a) i twardości (HRA) — stopu EJ437 po starzeniu w temp. $800^{\circ}C$ przez [19]

metodyczne, mające za zadanie poznanie wpływu takich dodatków jak Mo, W, Nb, B i innych na kinetykę przemian strukturalnych, zostały częściowo opublikowane dopiero w latach ostatnich (1957—1960). J. J. Korniłow wraz ze swoimi współpracownikami [20, 21] poddał badaniu stopy układów: Ni-Al, Ni-Cr-Al, Ni-Cr-Ti-Al, Ni-Cr-Ti-W-Al, Ni-Cr-Ti-W-Mo-Al, Ni-Cr-Ti-W-Mo-Nb-Al, Ni-Cr-Ti-W-Mo-Nb-Co-Al, czyli ilość składników stopowych wynosiła od 2 do 8. Zmienny był dodatek aluminium od 0 do 12% (oraz nikiel o tyle, ile wynosiła zawartość dodatkowego składnika).

Wyniki przeprowadzonych badań dają się ująć w następujące wnioski:

1) pierwiastki różnych grup periodycznego układu Mendelejewa niejednakowo wpływają na własności fizyczne i mechaniczne badanych stopów,

2) stopień naprężenia sieci krystalograficznej roztworów stałych będzie tym większy, im większa jest różnica średnic atomowych pomiędzy wprowadzającym dodatkiem a roztworem podstawowym,

3) biorąc pod uwagę stopień zniekształcenia sieci przypadającej na 1% c. at wprowadzonego elementu roztworu stałego, to na pierwszym miejscu znajduje się Nb, następnie W, Ti, Mo, Cr i na ostatnim Co, przy czym ten ostatni, tworzący z Ni roztwory stałe ciągłe, w nieznanym stopniu zmienia własności. Wynika z tego, że im dalej od niklu położony jest w tablicy Mendelejewa pierwiastek wprowadzony do roztworu stałego niklu, tym większy daje on efekt w odkształceniu sieci krystalograficznej, wchodząc do roztworu stałego.

4) duże utwardzenie roztworów stałych niklu można osiągnąć przez równoczesne wprowadzenie do niego składników zwiększających stopień zniekształcenia jego sieci krystalograficznej.

W pracy [18] badano równoczesny wpływ dodatku do stopu EJ 437 molibdenu i wolframu w ilości po 5% każdy na mechanizm tworzenia się i stabilności fazy α' . Stwierdzono, że w temperaturze 700 °C procesy dyfuzyjne zachodzą na tyle powoli, że faza przez okres 2500 godzin zachowuje wymiary submikroskopowe, a koagulacja tej fazy zachodzi tylko zasadniczo po granicach ziaren (rys. 8).

Po starzeniu w 770° przez 1000 godzin, prócz wyraźnie widocznej fazy w strukturze, zaczyna pojawiać się płytkowa faza η umiejscowiona przeważnie na granicach ziaren. Podwyższenie temperatury starzenia do 850° przyspiesza tworzenie się η — fazy. Wynika stąd, że w stopie EJ 437 + 5% W + 5% Mo, podobnie jak w stopie EJ 437 na skutek długotrwałego starzenia tworzy się trwała faza η — Ni_3Ti o sieci heksagonalnej, z tym, że dodatek W + Mo znacznie opóźnia ten proces.

Tworzenie się cząstek — płytek η — fazy przebiega zgodnie z ogólną teorią powstawania fazy, to jest kosztem roztwarzania się najbliższych cząstek α' — fazy i dyfuzji atomów tytanu do rosnącej płytki.

Wyniki uzyskane z badań wpływu wolframu i molibdenu w ilościach do ok. 10% na strukturę stopu EJ 437 A w temperaturze 800 °C [26] wykazały, że z przebadanych dwóch dodatków stopowych korzystniejszy wpływ na mechanizm tworzenia się fazy wywiera dodatek molibdenu. Powoduje on zmniejszenie wydzieleń w czasie, większą dyspersyjność oraz działa hamująco na procesy dyfuzyjne w zakresie koagulacji wydzieleń. Wolfram w mniejszym stopniu wpływa hamująco na procesy starzenia w 800 °C, gdzie większe jego ilości powodują wyraźną koagulację fazy wtórnej, przy czym uwidacznia się to szczególnie przy dłuższych czasach starzenia rzędu 1000 godzin.

Wiadomo, że wytrzymałościowe własności materiału w wysokich temperaturach, to jest wytrzymałość czasowa, jak i granice pełzania, zależą w dużej mierze od wytrzymałości granic ziarn i stref do niej tuż przyległych. W procesie krzepnięcia stopu wszelkie jego zanieczyszczenia umiejscawiają się między osiami dendrytycznymi oraz po granicach ziaren. W związku z tym stop będzie wykazywał daleko większą wytrzymałość materiału samych ziaren w porównaniu z wytrzymałością warstwy międzykrystalicznej. Sposoby, którymi technika stara się przeciwdziałać temu zjawisku, to znaczy umocnić tak warstwę międzykrystaliczną, ażeby wykazywała możliwie zbliżoną wytrzymałość do własności samych ziaren, to:

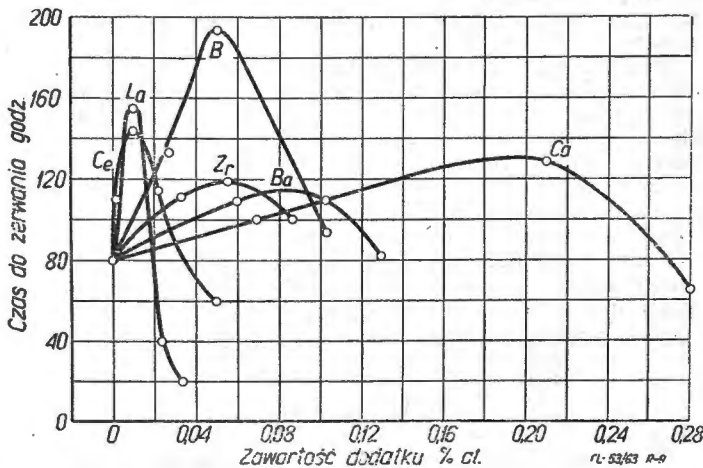
a) stosowanie materiałów wyjściowych możliwie naj-

bardziej czystych i pozbawionych prawie zupełnie takich niskotopliwych pierwiastków jak ołów, arsen, bizmut, cyna, kadm, miedź, siarka i inne,

b) wprowadzenie do stopu tego rodzaju dodatków, które by wiązały niskotopliwe pierwiastki w związki wysokotopliwe i do nich należą cer, wapń, bar i lantol,

c) wprowadzenie do stopu małych ilości boru lub cyrkonu, przy czym ich działanie odbywa się w inny sposób aniżeli pierwiastków podanych w pkt. b).

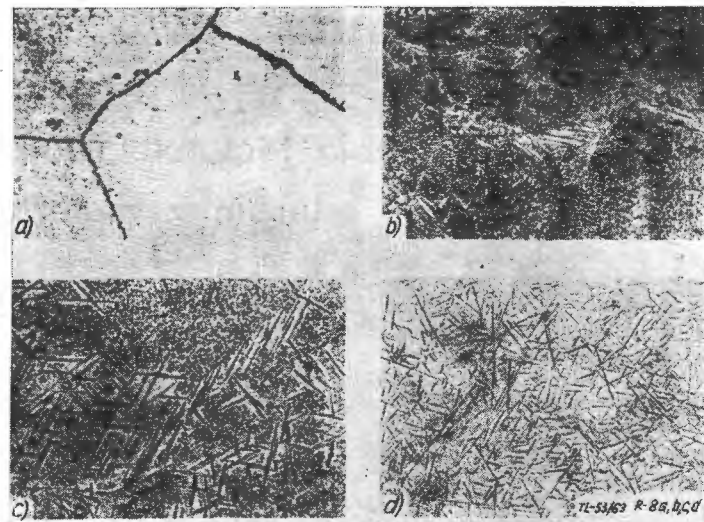
Wpływ małych dodatków tych pierwiastków na wytrzymałość czasową pokazany jest na rys. 9, z którego wynika, że największe pozytywne działanie w kierunku



Rys. 8. Mikrostruktura stopu EI445 po starzeniu w temp.: a — 700 °C/2500 godz. (× 600); b — 770 °C/1000 godz. (× 600); c — 850 °C/1000 godz. (× 600); d — 850 °C/2000 godz. (× 200) [18]

zwiększenia czasu do zerwania dla stopu EJ 437 wykazuje bor [22, 24]. Badania przeprowadzone przez W. J. Penningtona [23] potwierdzają dane prac M. W. Pridancewa [22, 24] i szeregu innych uczonych, z tym jednak, że na stopy typu nimonic według jego danych bardziej dodatnio wpływa cyrkon.

Bor należy obecnie do dodatków powszechnie stosowanych w stopach żarowytrzymałych, chociaż działanie jego w różnych stopach jest różne i niezupełnie zbadane. Według danych Nickolsona [23] rozpuszczalność boru w γ — żelazie wynosi około 0,01—0,02%, a w niklu



Rys. 9. Wpływ małych zawartości ceru, lantalu, boru, cyrkonu, baru i wapnia w stopie EI437 na jego wytrzymałość czasową (mierzoną czasem do zerwania) w zakresie temperatur 700—800 °C [22]

nieokreślona chociaż na pewno bardzo ograniczona i tego rzędu, jak dla γ — żelaza. Zawartość boru w stopach EJ 437 w ilościach tysięcznych i setnych nie powoduje jeszcze powstawania twardej i kruchej eutektyki, wpływającej ujemnie na własności stopu. Prócz borków chromu występują na przykład w stopie EJ 437 (z borem) również borki niklu typu Ni_3B o identycznej sieci krystalograficznej. Prawdopodobne jest występowanie również złożonych związków boru typu $(Cr, Ni)_2B$.

W bardziej złożonym stopie, w którym występuje również wolfram lub molibden, powstają borki Mo_2B i W_2B , które są izomorficzne z Cr_2B i Ni_2B , a mogą w nich rozpuszczać się, podwyższając tym samym ich odporność na temperaturę.

Możliwe jest również, że bor na skutek swojej chemicznej aktywności oddziałuje dodatkowo, oczyszczając granice ziaren metalu od tlenków i innych związków podobnie do działania pierwiastków grupy ziem rzadkich.

Jednak wpływu boru nie należy utożsamiać z działaniem ceru, lantalu, wapnia, i baru, gdyż ich działanie jest przede wszystkim rafinujące, a śladowe zawartości w stopie w pewnym, małym stopniu wpływają również na utwardzenie stref przygranicznych przez hamowanie procesów dyfuzyjnych.

Bor wchodzi w pewnych określonych ilościach do roztworu stałego, a jego duży wpływ na zwiększenie własności żarowytrzymałych materiału należy objaśnić przede wszystkim tym, że umiejscawiając się na granicach ziaren tworzy roztwór stały, międzywęzłowy. Powoduje to opóźnienie procesów dyfuzyjnych i tym samym zwiększenie odporności granic ziaren na procesy „rozmocnienia” w wysokich temperaturach.

Przy zawartościach boru powyżej jego granicznej rozpuszczalności powstają stosunkowo niskotopliwe związki boru lub eutektyki, których umiejscowienie na granicy ziaren powoduje obniżenie własności.

V. Wnioski

W oparciu o przytoczone dane (fragmentaryczne) można sformułować następujące zasadnicze wnioski:

1. Umocnienie stopów o podstawie niklu typu nimonic 80/80A i pokrewnych następuje na skutek wydzielenia się z przesyconego roztworu stałego — metastabilnej fazy α' — $Ni_3(Ti, Al)$ w zakresie temperatur starzenia 700—900 °C.

2. Metastabilna faza α' w miarę czasu przebywania stopu w podanym zakresie temperatur przechodzi na skutek procesów dyfuzyjnych w fazę stałą η — Ni_3Ti .

3. Dodatki stopowe takie, jak Mo, W, Nb i inne, wydają się wpływać na okres trwałości fazy α' , opóźniając procesy dyfuzyjne i stabilizując w ten sposób utwardzenie stopu.

4. Utwardzenie stopów niklowych osiągnąć można

przez wprowadzenie składników znacznie odkształcających sieć roztworu stałego oraz tworzących submikroskopowe wydzielenia blokujące płaszczyzny poślizgów.

Literatura

1. Zaroprocnyje mietalliczeskije materialy — Sbornik statiej; doklady procitannye na 58 jezegodnoj konferenciji Amierikanskogo Obszczestwa po ispytanijam Izd. In. Lit. Moskwa 1958 r. str. 7.
2. F. F. Chimuszin — Awiacjonnaja Promyszlenost — (1957) nr 11, str. 52.
3. Dr Wood i J. F. Gregg — The Nimocast Alloys — Birmingham, 1957 r.
4. R. P. Dominic — Materials in Desing Eng. t. 46/1957/ nr 3, str. 115.
5. D. K. Hanink, F. J. Webbere i A. L. Boegehold — SAE Transaction, t. 63/1955/, str. 104.
6. J. T. Brown i J. E. Wilson — Metal Progress, t. 44 (1958), nr 5, str. 83.
7. F. S. Badger — Journal of Metals, t. 10 (1958) nr 8, str. 512.
8. W. Betteridge — The nimonic alloys — London 1959, Edward Arnold LT.
9. L. B. Pfeil, N. P. Allen, O. G. Conway — A Symposium on high temperature Steels and alloys for gas turbines — Spec. rep. nr 43, London 1952, str. 37.
10. R. Nordheim, N. J. Grant — Transaction A. J. ME, t. 200 (1954), str. 211 lub Journal of Metals 1954 — Februar, str. 211.
11. A. Taylor, R. W. Floyd — Journal Inst. of Metals, t. 80 (1951—1952), str. 5.
12. A. Taylor, R. W. Floyd — Journal Inst. of Metals, t. 81 (1952—1953), str. 25.
13. A. Taylor, R. W. Floyd — Journal Inst. of Metals, t. 81 (1952—1953), str. 451.
14. A. Taylor — Journal Inst. of Metals, t. 8, (1956), nr 10, str. 1356.
15. L. M. Utiewskij — Problemy Mietalłowiedienija i Fiziki Mietalłow, Piatij sbornik trudow — Moskwa — Mietalłurgizdat 1958, str. 266.
16. Struktura i swojstwa spława EJ-437, Moskwa, Oborongiz.
17. W. Betteridge, A. W. Franklin — Journal Inst. of Metals, t. 85 (1957), str. 459.
18. L. N. Zimina, M. W. Pridancew — Issledowanija po Zaroprocnyj Splawam, Izd. A. N. SSSR, t. 5 (1959), str. 9.
19. W. G. Czernyj — Fizika Mietalłow i Mietalłowiedienije, t. 8 (1959), nr 2, str. 6.
20. J. J. Kornilow, N. T. Domotienko — DAN SSSR, t. 120, (1958), nr 2, str. 311.
21. J. J. Kornilow, L. J. Priachina, L. A. Riabcew — Izwestija An SSSR otd. tiechn. nauk, (1960), nr 2, str. 110.
22. M. W. Pridancew — Issledowanija po Zaroprocnyj Splawam, Izd. A. N. SSSR, t. 4 (1959), str. 280.
23. W. J. Pennington — Metal Progress, t. 73 (1958), nr 3, str. 82.
24. M. W. Pridancew, G. W. Estulin — Mietalłowiedienije i Tiermiczeskaja obrabotka, Priłożenije k žurnalu Stal — Mietalłurgizdat, Moskwa (1959), str. 68.
25. J. S. Servi, W. J. Boesch — Metal Progress 60 (1961), nr 6, str. 73.
26. J. Chodorowski — Prace IMP 10 (1962), nr 35, str. 1.

Mgr inż. W. KLUZ
ZPL — Warszawa

621.746.5:621—253:669.018.45

Zagadnienia technologiczne odlewania łopatek i wirników turbin z materiałów żaroodpornych

W artykule omówiono wstępnie zakres stosowania metody odlewania jako sposobu wytwarzania części wirujących turbin. Podano przykład technologii wykonania form rdzeniowych dla odlewów łopatek kierownicy turbiny gazowej oraz metody wytapianych modeli do produkcji tych samych łopatek. Opisano metody wytwarzania rdzeni dla łopatek drażonych. Opisano sposoby topienia metalu w różnych typach pieców z uwzględnieniem zalet wytapiania i zalewania w próżni, poza tym podano metody kontroli materiałów i odlewów.

W zakończeniu porównano ogólne właściwości materiałów w stanie prasowanym i odlewanych oraz wspomniano o metodzie pośredniej (lano-kutej) wytwarzania łopatek.

W produkcji maszyn wirnikowych, a zwłaszcza w produkcji turbin gazowych, technologia odlewnicza znalazła zastosowanie nie tylko przy wytwarzaniu korpusów, ale i w wytwarzaniu najbardziej odpowiedzialnych elementów, jak łopatki kierownicy, łopatki turbin, wirniki integralne. Podyktowane to jest nie tylko względami ekonomicznymi, ale również i technicznymi.

Mimo iż badania porównawcze dla stopów podobnych wykazały wyższe własności wytrzymałościowe materiałów w stanie kutym w stosunku do lanego, to rozwój nowych stopów spowodował rozszerzenie odlewania i to zarówno dla łopatek kierujących, jak i wirnikowych. No-

woczesne konstrukcje turbin cechują wyższe moce jednostkowe i wyższe wymagania trwałości (resursów). Równocześnie, nawet materiały o wyższej żaroodporności posiadają również wyższą granicę plastyczności, co stwarza poważne problemy przy ich kuciu. Poza tym szeregi opracowanych stopów jest nieobrabialnych mechanicznie, co z góry przesądza o metodzie wytwarzania części wirujących turbin z tych stopów. Obecnie metoda odlewania ma zastosowanie w przypadkach:

1) wytwarzania części o złożonym kształcie z materiałów nieobrabialnych;

2) produkcji części o bardzo złożonym kształcie, które są zbyt trudne do obróbki, nawet jeśli są wykonane ze stopów obrabialnych.

Odlewanie części metalowych do turbin ze stopów żarowytrzymałych jest procesem bardzo złożonym i jednym z najtrudniejszych zarówno w dziedzinie technologii formy, jak i przygotowania stopu.

A. Technologia formy

Sposób wykonania formy dla stopów żaroodpornych musi uwzględniać stosunkowo wysokie temperatury zalewania i duży skurcz zarówno w stanie ciekłym, jak i stałym. Formy muszą posiadać odpowiednio duże zasilacze i nadlewy, a układ wlewowy musi być tak zaprojektowany, aby zapewniał swobodne i spokojne wypełnianie formy.

Zasadniczo stosowane są dwie metody wykonania form:

- 1) piaskowa z klasycznych mas formierskich,
- 2) wytapianych modeli.

Metoda piaskowa. Formy piaskowe wykonywane są z mas rdzeniowych na spoiwie olejowym; piasek kwarcowy powinien się odznaczać wysoką ognioodpornością, a masa w stanie suchym — dobrą podatnością, aby uniknąć pęknięcia na gorąco, oraz dobrą przepuszczalnością. Jako przykład posłużyć może sposób wykonania łopatek kierujących turbiny gazowej. Odlewy łopatek wykonywane były ze stopów typu Vitalium oraz ze stopu na osnowie nikiel-żelazo-chrom z dodatkiem wolframu i molibdenu. Układ wlewowy (wraz z zasila-czami) pokazano na rys. 1, a sposób formowania na rys. 2. Forma składa się z 4 elementów wykonanych z masy rdzeniowej, odpowiednio zbrojonych, z rozmieszczonymi chłodnikami w miejscach powstawania węzłów termicznych w odlewie. Masa rdzeniowa — bardzo starannie przygotowywana z piasku kwarcowego Biała Góra, płukanego K70/100/140 w ilości 100 części wagowych, oleju lnianego 0,80 cz. wag., glinki ogniotrwałej + bentonitu 0,80, dekstryny 0,77. Własności mas po wysuszeniu $R_p^s = 10-12 \text{ kG/cm}^2$, $P_s = 160 \text{ cm}^4/\text{G.min}$.

Rdzenie, po dokładnym sprawdzeniu jakościowym i wymiarowym, montowane są w zespoły w specjalnych uchwytach, a następnie pó dostarczeniu do wydziału piecowego, są one mocowane na piecyku łukowym o poj. 3 kG (rys. 3) zbiornikiem wlewowym na otworze wylęwowym piecyka. Przez obrót o $210^\circ-230^\circ$ piecyka wraz z zamontowaną na nim formą następuje zalanie formy.

Opisana powyżej metoda, pomimo pewnych korzyści, a mianowicie niezbyt dużych nakładów inwestycyjnych i uzyskanie drobniejszego ziarna w odlewie, nie może być stosowana przy większych seriach. Odlewy z form piaskowych w porównaniu z odlewami z form uzyskanych metodą wytapianych modeli posiadają niższą dokładność wymiarową, co prowadzi do większych naddatków na obróbkę mechaniczną, wzrostu pracochłonności w operacjach poodlewniczych, a zwłaszcza w operacjach szlifierskich.

Zwiększone naddatki, to zwiększona pracochłonność obróbki oraz straty drogich materiałów.

Analiza ekonomiczna przejścia z form piaskowych na metodę wytapianych modeli wykazała, że pracochłonność operacji poodlewniczych została obniżona o 25%, a straty bezzwrotne o 20% w stosunku do ciężaru gotowej części.

Niezależnie od powyższego, metoda piaskowa nie nadaje się do produkcji cienkościennych odlewów łopatek (do 3 mm) z uwagi na to, że stopy żaroodporne posiadają gorszą lejność w formach piaskowych, a niektóre reagują z materiałem formy, oraz że nie daje możliwości wykonania skomplikowanych kształtów.

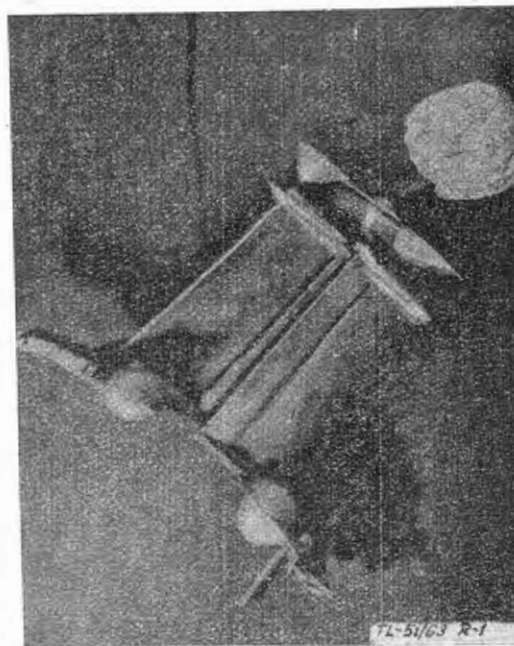
Dlatego obecnie powszechnie przyjętą metodą wytwarzania łopatek lanych (kierujących i wirnikowych), jak i wirników integralnych, jest metoda wytapianych modeli.

Należy zaznaczyć, że metoda ta znalazła również szerokie zastosowanie do wytwarzania innych elementów konstrukcji lotniczych. Na przykład [2] w USA w okresie od 1950 r. do 1960 r. udział odlewów wykonanych metodą wytapianych modeli wzrósł w konstrukcjach lotniczych przeszło 10-krotnie (z 2,8% do 30%).

Metoda wytapianych modeli. Ten sposób wytwarzania form znany był przed naszą erą. Metoda polega na tym, że model wykonany z masy łatwo topli-

wej (mieszanej wosku, stearyny, cerezyny, parafiny, polistyrenu i innych), wraz z układem wlewowym pokrywa się mieszkanką ceramiczną, twardniejącą pod wpływem zachodzących w niej reakcji chemicznych. Następnie model usuwa się (przez wytopienie, rozpuszczenie) i po odpowiednim przygotowaniu powstaje w ten sposób formy zalewa się ją metalem. Metoda powyższa różni się od klasycznych metod tym, że forma jest nie dzielona (na formę używa się specjalnych materiałów dających gładką powierzchnię) oraz jednorazowym użyciem modelu wykonanego z materiałów łatwo topliwych lub rozpuszczalnych.

Istnieje wiele odmian tej metody zarówno w odniesieniu do sposobu wykonania poszczególnych operacji, jak i stosowanych materiałów. W zasadzie są one zbliżone do siebie, różnią się w szczególności tak, że można twierdzić, iż każdy wytwórca odlewów metodą wytapianych modeli posiada swoiste sposoby wytwarzania. Jako przykład omówiono sposób wytwarzania łopatek kierujących omawianych przy poprzedniej metodzie.



Rys. 1. Odlew łopatek kierujących z formy piaskowej

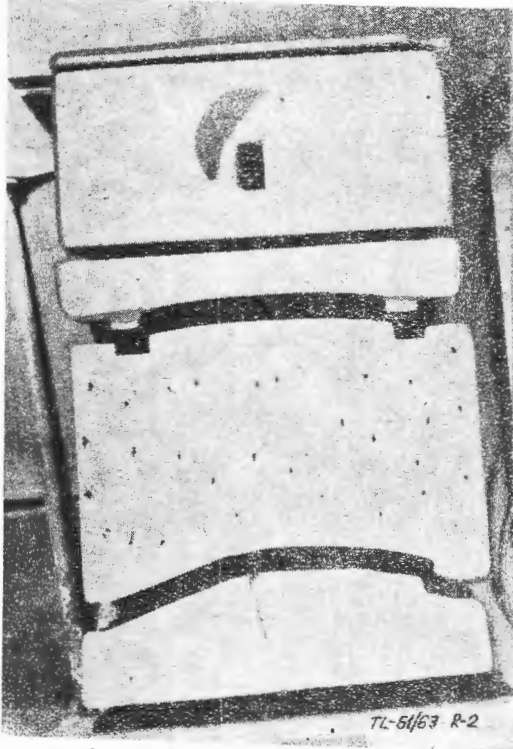
Proces odlewania nową metodą zawiera kolejne czynności:

1. Wykonanie modelu z mieszanki modelowej.
2. Wykonanie powłoki ceramicznej.
3. Zaformowanie.
4. Wytapianie modeli.
5. Wyżarzanie form.
6. Zalewanie.

Wykonanie modeli odbywa się przez wprasowanie pod ciśnieniem 6 at mieszanki modelowej do odpowiednio przygotowanej formy metalowej. Forma wykonana ze stali jest tak skonstruowana, że uwzględnia zarówno łatwość obsługi, jak i wymiarowe wykonanie modeli przewidujące odpowiednie skurcze masy modelowej stopu łopatkowego oraz rozszerzalność formy podczas wypalania, a więc gwarantuje otrzymanie odlewu o przewidzianych wymiarach. Jako mieszkankę modelową stosuje się mieszkankę 50% kalafonii, 30% polistyrenu i 20% cerezyny. Mieszanka tego typu posiada skurcz liniowy (po wprasowaniu w formie) 0,9%, dużą wytrzymałość na rozzerwanie (38 kG/cm^2) i na zginanie ($75-80 \text{ kG/cm}^2$) przy założeniu, że próbki były wykonane pod ciśnieniem. Robocza temperatura wprowadzania mieszanki wynosi $160-180^\circ\text{C}$. Mieszanka omawiana przewyższa inne stosowane do wyrobu łopatek i daje gładką powierzchnię, dobrze zwilża się mieszkanką ceramiczną, szybko krzepnie w formie, jest bardziej odporna na wpływy temperatury i na uszkodzenia. Do ujemnych stron stosowania tej mieszanki należy: złożony proces przygotowania mieszanki i wykonania modeli, stosowanie drogich materiałów, wysoka temperatura topliwości, duża gęstość, łatwopalność, trudności wytapiania z form (wskutek dużej gęstości). Odzysk masy przy wytapianiu nie przekracza 30-40%. Należy podkreślić, że

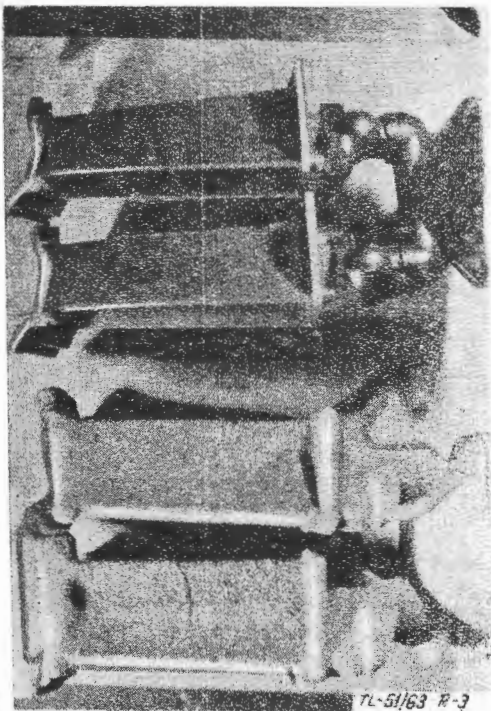
wymagania odnośnie przygotowania mieszanki, temperatura form, mieszanki i pomieszczenia, w którym wykonuje się modele, winny być dokładnie przestrzegane, w przeciwnym wypadku wzrasta odsetek modeli usterkowych.

Po wykonaniu modelu łopatkki i odczekaniu technologicznie przewidzianego okresu czasu modele łopatek poddawane są ścisłej kontroli wymiarowej i jakościowej, a następnie łączone w zespoły, zawierające po 2 modele łopatek. Zespoły te są łączone następnie parami, otrzymując pełny zespół modelowy — 4 modele łopatek z układem wlewowym. Łączenie modeli odbywa się przez zalanie modeli łopatek masą modelową (zwroty z pieca do wytapiania) w specjalnych uchwytach, dających równocześnie kształt elementów układu wlewowego (rys. 3).



Rys. 2. Zespół rdzeni dla wykonania odlewu łopatek

Wykonanie powłoki ceramicznej. Gotowe zespoły modelowe podlegają odtłuszczeniu w 0,2% wodnym roztworze mydła obojętnego i 50% wodnym roz-



Rys. 3. Zespół modelowy czterech łopatek przed i po pokryciu masą ceramiczną

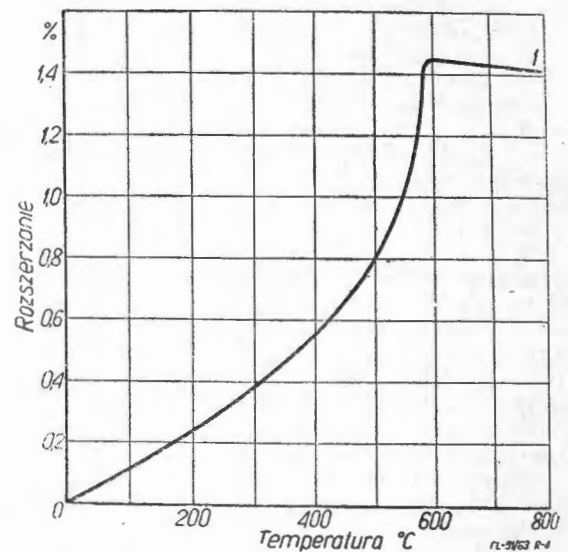
tworze spirytusu denaturowanego, a następnie poddane są kontroli i skierowywane do oddziału pokryć ceramicznych.

Formę ceramiczną wykonuje się z mieszanki ceramicznej złożonej z wyżarzonego piasku kwarcowego o odpowiedniej ziarnistości oraz spoiwa — krzemian etylu. Mieszanke nanosi się warstwami na zespół modelowy przez zanurzenie, przy czym po każdym zanurzeniu zespół obсыpuje się wyżarzoną masą piaskiem kwarcowym przesianym na sitach o 760 oczkach/cm². Mieszanke ceramiczna, jak wyżej wspomniano, składa się z drobno zmielonego w młynach kulowych piasku kwarcowego Biała Góra, wyżarzonego i przesianego przez sita o 800 oczkach/cm². Stanowi on 67% zawartości. Jako spoiwa używa się zhydrolizowanego krzemianu etylu.

Dobranie właściwych proporcji i sposób przeprowadzenia hydrolizy stanowi jeden z podstawowych czynników prawidłowego przygotowania mieszanki oraz wykonania form. Celem hydrolizy jest wytrącenie krzemionki koloidalnej z krzemianu etylu. Istnieje obszerna literatura na temat sposobu obliczania proporcji oraz przeprowadzania samej hydrolizy. W zakładzie stosującym ten proces, używa się krzemianu etylu 40% (o zawartości około 40% SiO₂ w krzemianie etylu) i podaje się hydrolizie roztworem wodnym alkoholu etylowego, równocześnie zakwaszając roztwór stężonym HCl. Objętościowe proporcje dodawanych składników w odniesieniu do 16,8 części objętościowych krzemianu etylu wynoszą: 9,5 spirytusu etylowego 98,5%; 1,6 wody destylowanej; 0,09 kwasu solnego stężonego; 0,04 kwasu octowego lodowatego.

Hydrolizę przeprowadza się w hydrolizerze, przy zachowaniu kolejności dodawania poszczególnych składników. Reakcja jest egzotermiczna i przebieg jej kontroluje się pomiarem temperatury, która winna być utrzymana w granicach 32—50 °C. Zhydrolizowany krzemian etylu podlega kontroli na jakość hydrolizy (zawartość SiO₂), współczynnik załamania światła, gęstość, zawartość HCl - PH i na własności technologiczne (próba).

Mieszanke ceramiczną sporządza się przez dokładne zmieszanie mączki kwarcowej ze zhydrolizowanym krze-



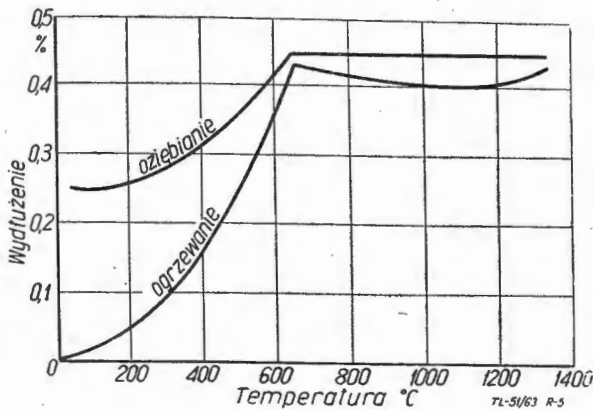
Rys. 4. Krzywa dylatometryczna powłoki ceramicznej z modelem mieszanki polistyrenowej

mianem etylu. Sprawdza się gęstość mieszanki w mieszalniku, co ściśle określony czas.

Dla pierwszej warstwy ceramicznej stosuje się mieszanke o wyższej gęstości niż dla następnych. Po zanurzeniu w mieszanke ceramicznej zespół modelowy obсыpuje się wyżarzoną masą piaskiem kwarcowym o ziarnistości 40/70, a następnie poddaje suszeniu na powietrzu przez 1 godzinę. Po wstępnym suszeniu zespoły modelowe poddaje się działaniu par amoniaku w szafie amoniakalnej w ciągu pięciu minut, a następnie — po dwudziestu minutach — przystępuje się do nanoszenia następnej warstwy w sposób wyżej opisany. Czynność tę powtarza się 4-krotnie.

Zaformowanie. Wysuszone bloki zaformowuje się w masie cementowej w skrzynkach lanych ze stali żaroodpornej. Przygotowaną masę cementową o składzie:

66,6% piasku, 8,4% szamotu mielonego, 8,4% cementu nr 350, 16,6% wody zagęszcza się stopniowo na stołach wibracyjnych o określonej amplitudzie i częstotliwości drgań. Proces zagęszczenia jest ważnym czynnikiem z uwagi na wpływ jakości zagęszczenia na jakość form



Rys. 5. Rozszerzalność i skurcz syntetycznego piasku formierskiego w zależności od temperatury

po wyżarzeniu. Po zaformowaniu zespołów modeli w formy cementowe, formy podlegają naturalnemu suszeniu w ciągu 16–24 godzin.

Wytapianie modeli. Następną operacją jest usuwanie mieszanki modelowej przez wytopienie w piecu tunelowym strefowym. Jest to proces długotrwały, składający się z dwu okresów:

- podsuszenia w temperaturze 80–90 °C przez 10 godzin,
- wytapiania masy modelowej w zakresie temperatury 200–220 °C.

Sposób przeprowadzania tych operacji decyduje w zasadzie o jakości form, ponieważ zachodzą zjawiska, które przy sprzyjających warunkach powodują uszkodzenie formy. Do tych zjawisk należą:

- rozszerzalność powłoki ceramicznej,
- rozszerzalność masy modelowej,
- schnięcie formy,
- odparowanie płynu z żelu (woda/alkohol),
- uchodzenie gazu ze zhydrolizowanego krzemianu etylu.

W tym okresie powstaje większość wad w formach, a zwłaszcza pęknięcia powłok ceramicznych.

Wyżarzanie form. Formy z wytopionymi modelami kieruje się bezpośrednio do wyżarzania w piecu tunelowym czterostrefowym, o temperaturach w poszczególnych strefach: I—500 °C, II—650 °C, III—850 °C i IV—1050 °C. W ciągu 8 godzin formy zostają nagrzane, resztki masy modelowej wypalone i w IV strefie wyżarzone w 1050 °C. Jest to temperatura, przy której następuje zalewanie metalem. W okresie wyżarzania żel przechodzi ostatecznie w twardy SiO₂ przez odparowanie wody adsorpcyjnej i chemicznie związanej. Zjawiskom tym oraz podnoszeniu temperatury towarzyszą zmiany dylatometryczne powłoki ceramicznej, jak pokazano na rys. 4 [1].

Niezależnie od tego sprawę komplikuje obecność wypełniacza formy (masa cementowa) posiadającego różną rozszerzalność w zakresie omawianych temperatur.

Na rysunku 5 [3] pokazano wpływ temperatury na przebieg krzywej rozszerzalności piasku syntetycznego.

Dlatego proces wyżarzania winien być prowadzony ściśle według ustalonego optymalnego przebiegu: czas, temperatura dla poszczególnych rodzajów form, aby uniknąć pęknięcia powłok i form.

Zalewanie. Wyżarzone formy wyjmują się z pieca, ustawia zbiornikiem wlewowym do góry (wytapianie i wyżarzanie odbywa się przy ułożeniu formy zbiornikiem wlewowym ku dołowi) i zalewa w ciągu maks. 15 minut (od czasu wyjęcia formy z pieca) metalem z ręcznej kadzi czajnikowej.

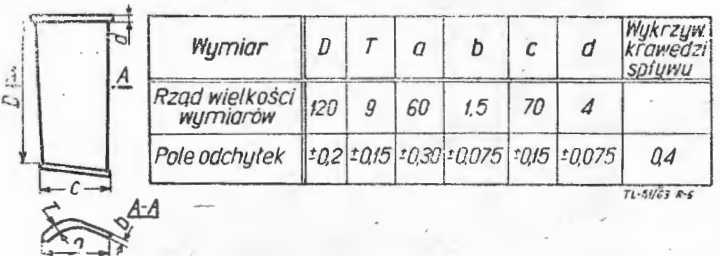
Opisany powyżej proces wykonania form jest tylko jednym z przykładów. Istnieje wiele odmian tej metody, stosowanych również w zakładzie produkcyjnym, o którym mowa. Proste, nieskomplikowane łopatki kierujące turbin gazowych wykonuje się w podobny sposób. Na

modele stosuje się mieszankę modelową — 50% stearyny, 50% parafiny, co pozwala na użycie prostych urządzeń do wykonania modeli, jak prasy ręczne lub zalewanie masy z łyżki. Modele łączone są w zespoły po 12 sztuk; dalszy cykl produkcyjny podobny jest do opisanego powyżej.

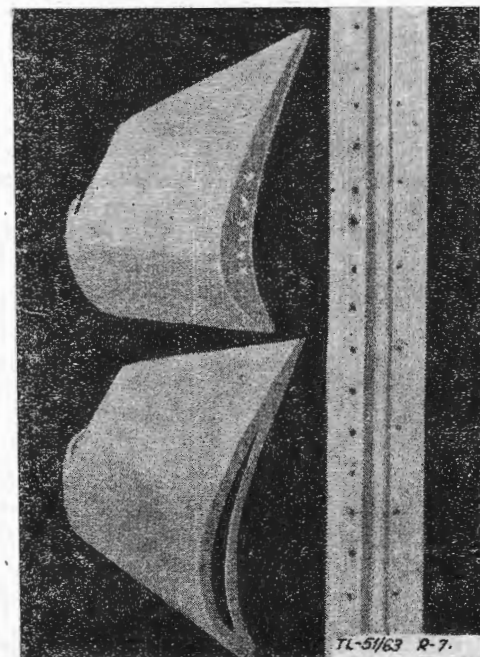
W zakładzie przeprowadzono pozytywne próby zastosowania elektrokorundu do produkcji lanych łopatek turbiny ze stopu na osnowie niklu. W miejsce mączki kwarcowej w mieszance ceramicznej na zhydrolizowanym krzemianie etylu zastosowano elektrokorund o ziarnistości odpowiadającej mączce kwarcowej.

Z uwagi na zastosowanie o wiele droższego elektrokorundu, z mieszanki ceramicznej wykonywano jedynie dwie pierwsze warstwy, a następne z mieszanki na mączce kwarcowej. Przez wprowadzenie elektrokorundu na pierwsze warstwy uzyskano lepszą gładkość powierzchni oraz wyeliminowano pewne wady powierzchniowe, które można było przypisać reakcji między składnikami stopu (Ti, Al) a krzemionką (SiO₂). Obecnie czyni się przygotowania do przeprowadzenia prób zastosowania mączki cyrkonowej w mieszance ceramicznej na pierwsze warstwy pokryć. Uzyskiwane dokładności wymiarowe na odlewanych łopatkach kierujących, wykonanych powyższą metodą, podano na rysunku 6.

Technologia wykonania modeli i przygotowania form przy bardziej złożonych kształtach elementów turbin,



Rys. 6. Odchyłki wymiarowe łopatek wykonanych metodą wytapiania modeli



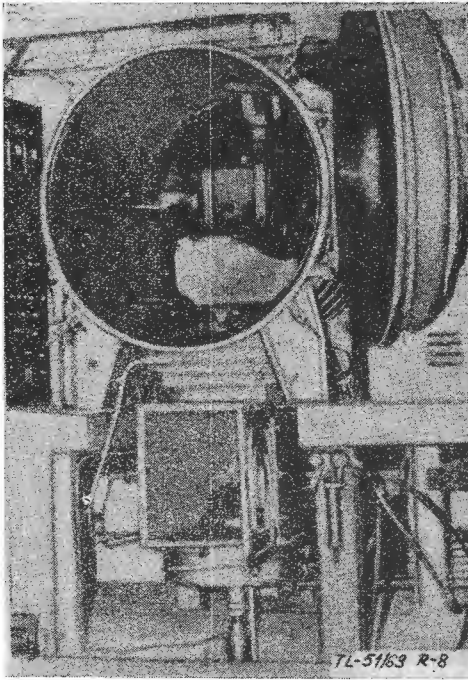
Rys. 7. Łopátka drążona i pełna

jak na przykład wirniki integralne lub łopatki z chłodzeniem, wymaga zastosowania bardziej skomplikowanych sposobów. I tak dla nadania kształtów wewnętrznych modelowi, dla którego wykonanie formy metalowej byłoby zbyt skomplikowane lub wręcz niemożliwe, stosuje się rdzenie wykonane z amidu kwasu karboamidowego (karbamid — mocznik CO(NH₂)₂).

Formę metalową na rdzenie zalewa się stopionym karbamidem w temperaturze 130±3 °C. Po skrzepnięciu wyjmuje się rdzeń z rdzennicy i jeśli nie ma potrzeby natychmiastowego zużytkowania, przechowuje się go

w eksikatorze (z uwagi na dużą higroskopijność karbamidu). Rdzeń posiada gładką powierzchnię i dokładne wymiary. Przed włożeniem do form do wykonania modeli rdzenie podusza się w temperaturze $60 \pm 5^\circ\text{C}$, następnie układa w formie i zaprasowuje masą modelową [3]. Należy zaznaczyć, że jako mieszankę modelową można stosować nie tylko niskotopliwe mieszanki (wosk, cerezyna, parafina), ale również wysokotopliwe, jak kalafonia, polistyren, cerezyna, której temperatura zalewania przekracza o 35°C temperaturę topliwości karbamidu (127°C) [4]. Po ostygnięciu modelu usuwa się rdzenie przez rozpuszczanie karbamidu w wodzie o temperaturze 30°C . Karbamid odzyskuje się z roztworu wodnego przez odparowanie. Po wytopieniu rdzeni model podlega wykończeniu (usunięcie nalotu, zacyzyszczenie gratów, miejsc wadliwych) i kontroli. Dalszy tok operacji — jak przy normalnej metodzie wytapiania modeli.

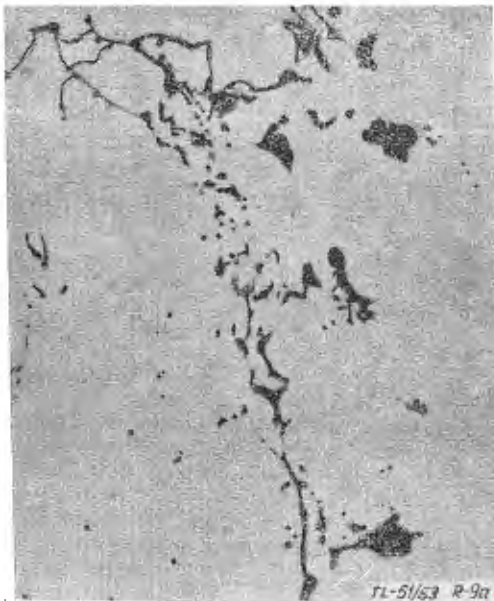
W ten sposób wykonuje się na przykład integralne



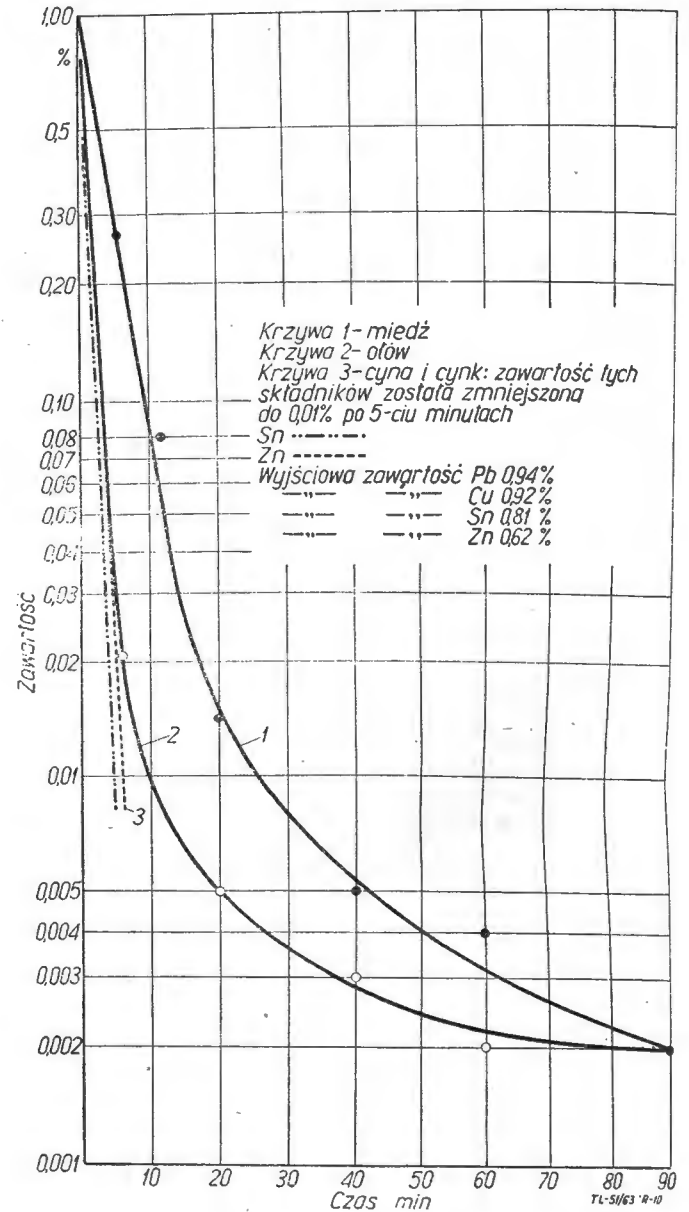
Rys. 8. Indukcyjny piec próżniowy o pojemności 20 kG

wirniki sprężarek odśrodkowych, gdzie rdzenie z karbamidu odtwarzają puste przestrzenie między poszczególnymi łopatkami wirnika.

Niektóre konstrukcje turbin wymagają stosowania (z uwagi na wysokie temperatury gazów wlotowych) ło-



Rys. 9. Obecność błonki tlenków w żaroodpornym stopie na osnowie niklu a) topionego na powietrzu, b) topionego w próżni. Powiększenie 140 X



Rys. 10. Wpływ przetapiania w próżni ($1 \mu\text{Hg}$) na zawartość składników stopowych. Stop podwójny (osnowa Fe) o wysokiej czystości

patek drażnych, które osłabiają działanie naprężeń w różniących się znacznie pod względem wymiarowym przekrojach łopatek. Dzięki takiej konstrukcji można utrzymać bardziej równomierne nagrzanie i chłodzenie łopatek turbiny przy starcie i wyhamowaniu, co zmniejsza znacznie powstające naprężenia cieplne. Poza tym odlany otwór w łopatkę służy jako dodatkowe chłodzenie łopatek.

Rysunek 7 przedstawia łopatkę z odlanym otworem i pełną.

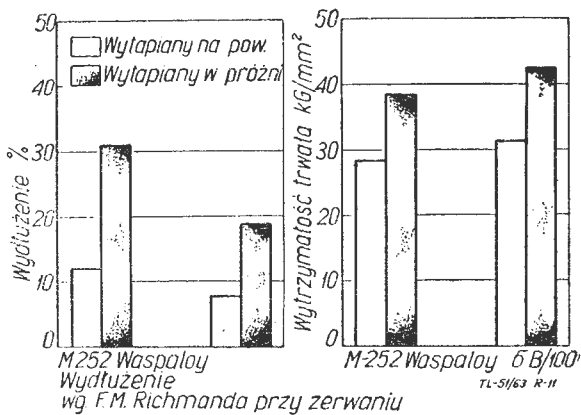
Wykonanie rdzeni do tego typu łopatek jest operacją dość skomplikowaną. Jako materiał służą przeważnie najwyższej jakości materiały ceramiczne, jak piasek kwarcowy, marszalit, glina ognioodporna, kaolin, a jako spoiwo stosuje się szkło wodne (ciężar właściwy $1,26 \text{ g/cm}^3$) [3], [5].

W szeregu pieców po zalaniu formy doprowadza się powietrze pod ciśnieniem 0,25—0,5 atn w celu doprowadzenia płynnego metalu do najcieńszych części odlewu.

Proces topienia i zalewania w próżni wymaga stosowania specjalnych pieców (rys. 8). Jako przykład technologii topienia i zalewania stopu może posłużyć piec próżniowy indukcyjny o pojemności 20 kG. Składa się on z komory topialnej wraz z cewką indukcyjną i znajdującą się pod nią komorą wstępną oddzieloną od topialnej szczelną zasuwą. Na komorze topialnej umieszczona jest komora wsadowa, przez którą podczas pracy pieca umieszcza się w tyglu odważoną ilość materiału wsadowego, bez potrzeby otwierania komory topialnej i zmiany w niej ciśnienia. Komora topialna podczas pracy jest pod działaniem próżni i po stopieniu oraz nagrzaniu metalu do temperatury zalewania wstawia się formy i wyjmuje z komory topialnej poprzez komorę wstępną. Zalewanie następuje przez przechyl tygla za pomocą urządzenia sterowanego z zewnątrz.

Piece próżniowe łukowe pozwalają na zalewanie form przez obrót o 180°. Topienie i zalewanie w tego typu piecach następuje przy pewnym (≈ 50 mm) ciśnieniu Argonu [8].

Technologia topienia w piecach elektrycznych do grupowego zalewania form nie różni się w zasadzie od topienia w małych piecach. Czasy wytopów są znacznie dłuższe, na przykład dla pieca indukcyjnego 60 kG wynoszą 2 godziny i powinny być zsynchronizowane z cyklem wyżarzania form (przy odlewaniu metodą wyt-



Rys. 11. Wpływ przetapiania w próżni na własności stopów M252 i Waspaloy

pianych modeli). Przy zalewaniu na powietrzu formy zalewa się z kadzi lub wlewa do specjalnych pieców pośrednich, gdzie zalanie do formy zamocowanej na piecu odbywa się przez obrót pieca. W piecach próżniowych zalewanie odbywa się przez wlewanie metalu w komorze do zespołu form lub przez indywidualne podstawianie ustawionych w komorze form.

Z punktu widzenia metalurgicznego proces przygotowania metalu do zalania jest trudnym i skomplikowanym procesem, mimo stosowania szeregu ułatwień. Stosuje się przeważnie przetapianie uprzednio przygotowanego i zbadanego stopu.

Ze względu na charakter stopów wykładzina pieców (tygla) jest zasadowa lub obojętna (magnezyt, chromo-magnezyt, elektrycznie topione Al_2O_3 , MgO). Temperatury zalewania leżą w granicach od 1480 °C do 1600 °C. Jednak wymagania stawiane w chwili obecnej materiałom zmuszają do bardzo ostrego zawężenia parametrów wytopu (skład chemiczny, czas, temperatura, ciśnienie), powodują, że prowadzenie wytopu przebiega podobnie jak w warunkach laboratoryjnych z dokładną kontrolą poszczególnych parametrów.

W okresie rozwoju stopów żaroodpornych typu nimonin z podwyższoną zawartością Ti i Al wprowadzono topienie i zalewanie w próżni (co dodatkowo skomplikowało proces), dając jednocześnie szereg korzyści, jak:

a. Topienie w próżni eliminuje niebezpieczeństwo dostania się błonki tlenków do odlewu. Rysunek 9 przedstawia różnicę mikrostruktury stopu zależną od metody topienia.

b. Wady o charakterze pochodzenia gazowego jak pęcherze gazowe, porowatość są prawie całkowicie usunięte.

c. Niespawy, zimne krople w odlewach nie występują ze względu na duże prędkości zalewania i nieobecność powietrza we wnęce formy.

d. Zalewając w próżni można stosować niższe temperatury zalewania, co zwiększa drobnoziarnistość i pośrednio odporność na uderzenia cieplne. Wielkość ziaren można zmniejszyć jeszcze przez dodanie odpowiednich dodatków do powłoki ceramicznej.

e. Ważnym czynnikiem jest łatwość utrzymania składu chemicznego w wąskich granicach używając odpowiednio przygotowanego stopu i znając wielkości ubytku procentowego w próżni dla poszczególnych składników.

f. Ubytek poszczególnych składników stopu przez odparowanie w wysokiej próżni ma duże znaczenie przy usuwaniu lub zmniejszeniu do minimum śladowych zawartości takich pierwiastków, jak: Sb, Bi, Cu, Pb, Sn i Zn, których ujemny wpływ na wytrzymałość trwałą w podwyższonych temperaturach jest znany. Na rysunku 10 pokazano krzywe zależności zawartości poszczególnych pierwiastków od czasu wytrzymania stopu w próżni 10⁻³ mm Hg stopów podwójnych z Fe.

Wszystkie powyższe czynniki sprawiają, że można było dla stopów typu nimonin podnieść zawartość składników Al, Ti i zwiększyć wymagania odnośnie eksploatacji w czasie.

Na rysunku 11 pokazano wyniki porównawcze wydłużenia i wytrzymałości trwałej dla dwóch stopów M252 i Waspaloy w zależności od tego, czy stopy były topione w próżni czy na powietrzu.

Obróbka poodlewnicza i metody kontroli. Po wystygnięciu odlewu wybija się go z formy, a następnie piaskuje. Nadlewy i układ wlewowy obcina się tarczą ścierną na pile wahadłowej, ewentualnie obcina na piłach anodowych. Odlewy podlegają wstępnemu zaczyszczaniu, a następnie poddane są obróbce cieplnej, o ile wymagają tego warunki techniczne dla danego gatunku stopu. Po obróbce cieplnej odlewy kierowane są na obróbkę wykańczającą (na szlifierkach, polerkach).

W cyklu poodlewnicznym odlewy poddawane są wielokrotnej kontroli. Od jakości odlanych części niezawodność pracy turbin, ich rewers, osiągi techniczne i ekonomiczna praca. Rodzaj i sposób kontroli jest każdorazowo ściśle określony dla każdego typu łopatki czy wirnika i ujęty w formie warunków technicznych odbioru określających równocześnie wymagania, jak i dopuszczalne odchyłki. Niezależnie od prób technologicznych przeprowadzanych na specjalnych próbkach przy odlewaniu dla oceny jakości stopu i utrzymania parametrów wytopu i zalania, każdy wytop podlega w 100% badaniu składu chemicznego.

Przy stosowaniu pieców porcjowych z indywidualnym zalewaniem form, badanie składu chemicznego przeprowadza się wrywkowo na pewnej procentowo ustalonej ilości wytopów, przy założeniu, że proces metalurgiczny jest ustabilizowany, a materiały wsadowe przeanalizowane. Analizy przeprowadza się metodą spektrograficzną.

Badaniu własności mechanicznych podlegają próbki odlane wraz z odlewami lub próbki wycięte z odlewów. Określa się zarówno Kr , a , c , H_B , U , jak i wytrzymałość trwałą w podwyższonych temperaturach (przyjmuje się zwykle czas 100 lub 1000 h, temperatura w zależności od badanego stopu). Badaniom niektórych własności mechanicznych podlegają również stopy macierzyste (bazy).

Niezależnie od badania twardości na próbkach, niektóre odlewy podlegają indywidualnie badaniu twardości (H_B i R).

Strukturę odlewów bada się przez wykonanie przełomu, makrostruktury i mikrostruktury. Badania te przeprowadza się zarówno na próbkach, jak i na odlewach, jeśli chodzi o określenie wielkości ziarna i obecności wtrąceń niemetalicznych. Wykonane próbki porównuje się z ustalonymi przez warunki techniczne wzorcami na wielkość ziaren, obecność wtrąceń niemetalicznych, czystości granicy ziaren, a przy ocenie mikrostruktury porównuje się szlify trawione.

Każdy odlew przechodzi skrupulatną kontrolę wymiarów i wad pochodzenia odlewniczego. Kontrolę wymiarów przeprowadza się zgodnie z rysunkiem odlewu, a procentowo poddaje się kontroli wszystkie wymiary. Wszystkie wymiary sprawdza się również przy wprowadzaniu nowego oprzyrządowania (na przykład formy metalowej) lub usprawnieniach procesu technologicznego.

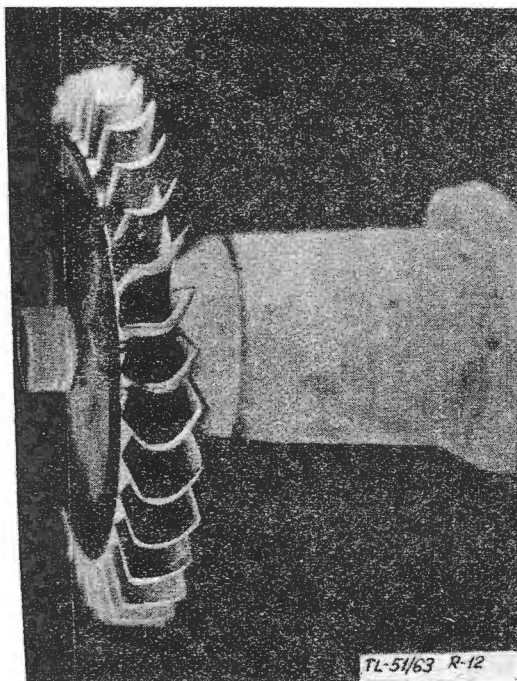
Do kontroli używa się specjalnych przyrządów, szablonów itp.

Kontroli wizualnej na obecność wad odlewniczych podlegają wszystkie odlewy zaraz po wybiciu, a następnie po każdej operacji technologicznej, dającej możliwości ujawnienia wad powierzchniowych. Celem wykrycia pęknięć stosuje się metody luminescencyjne (fluoroscencyjne), ponieważ większość łopatek i wirników jest wykonana z materiałów niemagnetycznych. Kontrolę luminescencyjną poddaje się wszystkie odlewy co najmniej dwukrotnie w cyklu poodlewniczym. Szereg odlewów (w tym i wirniki) przechodzi również kontrolę metodą kolorowej defektoskopii (Sudan).

Wszystkie odlewy łopatek przechodzą przez kontrolę rentgenowską, przy czym wykonuje się zdjęcia rentgenowskie każdej łopatki w kilku rzutach. W odlewach wirników kontroli rentgenowskiej podlega zarówno całość odlew, jak i każda łopatka oddzielnie.

C. Zakończenie

Opisane powyżej sposoby odlewania łopatek dają wyobrażenie o trudnościach procesów technologicznych, jak i wymaganiach stawianych odlewom na odpowiedzialne części — wirniki integralne (rys. 12).



Rys. 12. Odlew wirnika turbiny

Technika odlewnicza w ostatnim okresie posunęła się naprzód, zwłaszcza w dziedzinie wytwarzania przedmiotów metodą wytapianych modeli, dzięki uzyskaniu nowych materiałów potrzebnych do tej metody, jak i dzięki wprowadzeniu topienia i zalewania w próżni oraz udoskonaleniu metod kontroli. Pozwoliło to na zastosowanie odlewów do najbardziej odpowiedzialnych części

turbin. Odlewy wykonane metodą wytapianych modeli („precyzyjne”) w dużym stopniu zastąpiły wypraski lub części obrabiane z prętów kutech, wykonane w sposób bardziej ekonomiczny, a odpowiadający technicznym wymaganiom. Odkuwki (wypraski) pozostały w konstrukcjach tam, gdzie charakter i warunki pracy danego elementu tego wymagają. Wypraski i odkuwki odznaczają się pewnymi właściwościami w porównaniu z materiałem lanym. Struktura materiału jest włóknista i z tym związane są różne własności mechaniczne w kierunku podłużnym i poprzecznym do orientacji włókien. Odlewom tej właściwości brak, ich struktura jest izotropiczna. Struktura odlewu jest na ogół bardziej odporna na działanie wysokich temperatur i na zużycie, posiada wyższą żaroodporność, zwłaszcza przy zachowaniu drobnoziarnistej struktury w warstwie powierzchniowej. Materiał kuty odznacza się natomiast większą jednorodnością struktury, na ogół wyższą wytrzymałością przy obciążeniach dynamicznych, przy czym tłumienie drgań w materiałach kutech bywa niższe niż w lanych. Kontrola odkuwek jest pewniejsza ze względu na wyższą stabilność kontrolowanych właściwości w danej partii wyprasek z wytopu. Dlatego na zakończenie należy wspomnieć o metodzie stosowanej w jednym z zakładów CSRS przy produkcji łopatek turbin [12]. Jest to metoda pośrednia między laniem a kuciem, a raczej łącząca oba te procesy.

Zasada polega na tym, że przy wykonawstwie wypraski drogą obróbki plastycznej nie używa się, jak normalnie, materiału wyjściowego w postaci pręta, lecz odlewu, którego kształt jest taki, aby uzyskać potrzebny charakter struktury inny w nóżce łopatki i inny w piórze. Odlew taki jest następnie zwykłym sposobem sprasowany w matrycy i ogradowany. Metoda ta pozwoliła jednocześnie na zastosowanie oszczędnościowego stopu (VZU-60) praktycznie nieplastycznego. Metoda ta jest specjalna i stanowi niejako pomost między wytwarzaniem łopatek przez odlewanie i przez kucie.

Wykaz literatury

1. „Litje po wyplawajennym modelam” — praca zbiorowa pod red. J. I. Szklennika i W. A. Ozierowa, Maszgiz 1961 r.
2. R. F. Waindle „Specyfing reliability” Foundry Tr. Journ. No 2365, kwiecień 5, 1962 r.
3. Otto Büchner KDT „Die Verwendung von Harnstoff und chemisch löslichen Keramikkerne im Feingießverfahren nach ausschmelzbaren Modellen”, Giessereitechnik nr 11, 1952 r.
4. A. W. Kuzin, M. P. Woronow, J. F. Borowski „Otlivka nacsnyh i kompressornyh krilczatok po wyplawajennym modelam s raztworinnymi wstawkami”, Lit. Proizw. Maszgiz nr 1, 1963 r.
5. John Webb „Preformed ceramic cores permit greater design complexity” Iron Age nr 7, 1962 r.
6. H. Kirtchik „Cerium sulfide cores”. Precis. Metal Mold. nr 4, 1961 r.
7. C. Bieber i T. E. Kilhlgren „A new cast malloy for use at 1900 eF”, Metal Progr. nr 4, 1961 r.
8. D. Tedd. The Br. Doundryman, nr 51, 1961 r.
9. „Vacuum — cast blades” Aircraft Prod. Nov. 1960, str. 408
10. A. Dunlop „Precision melting and casting” Foundry Tr. Journ. nr 2395, listopad 1962 r.
11. W. Betteridge „Nimonic alloys” wyd. Wiliam Clowes i Ska, Londyn, 1959, str. 268
12. Dr inż. Zdenek Eminger, inż. Vaclav Paur, Zakłady Lenina, Pilzno CSRS „Powiększenie odporności na obciążenie dynamiczne odlewów wykonanych ze stopu żaroodpornego Skoda VZU 60”.

NA PÓLKACH KSIĘGARSKICH

Teoria silników odrzutowych, praca zbiorowa pod redakcją B. Stieczkina. Tłum. T. Gajewski, R. Wiatrek, MON zł 70.—

W książce omówiono szczegółowo klasyfikację, obliczenia cieplne i metody wyznaczania charakterystyk różnych typów silników odrzutowych oraz zasadnicze właściwości każdego z nich. Książka zawiera wiadomości na temat projektowania i regulacji wlotów, dysz wylotowych i komór spalania silników odrzutowych. Książka jest przeznaczona dla studentów wydziałów lotniczych i mechanicznych wyższych szkół technicznych. Jest także pomocna dla inżynierów pracujących przy projektowaniu silników odrzutowych.

Z.

Napędy elektryczne lotniczych urządzeń pokładowych, W. Kulebakin, W. Nagórski. Tłum. L. Będkowski, J. Kruś, J. Dombrowicki. MON zł 55.—

Książka omawia podstawy teoretyczne i specyfikę samolotowych urządzeń elektonapędowych. Podano w niej również osiągnięcia i perspektywy rozwoju w tej dziedzinie.

Z.

Lotnicze elektryczne urządzenia zapłonowe, ogrzewcze i oświetleniowe, praca zbiorowa. MON zł 55.—

W książce omówiono zasady budowy i działania urządzeń elektrycznych zapłonowych, ogrzewczych, oświetleniowych i sygnalizacyjnych, stosowanych na współczesnych samolotach tło-

kowych i odrzutowych zarówno cywilnych, jak i wojskowych. Oprócz tego książka podaje podstawy teoretyczne procesów roboczych, metody obliczania i właściwości konstrukcyjne oraz eksploatacyjne urządzeń tego typu.

Z.

Elektryczne urządzenia automatycznej regulacji, A. Bułgakow. Tłum. A. Sowiński. WKŁ, zł 55.—

W książce omówiono elektroniczne układy automatycznej regulacji urządzeń produkcyjnych i procesów technologicznych. Szczególna uwaga została zwrócona na główne elementy i układy sterowania napędu elektrycznego, wykorzystane jako organy regulacyjne oraz elementy układów nadążnych. Wiele miejsca poświęcono sterownikom prądu stałego i zmiennego. Podano również szereg przykładów zastosowania urządzeń elektronicznych w wielu dziedzinach przemysłu. Książka przeznaczona jest dla inżynierów pracujących w dziedzinie automatyzacji, może być także pomocna dla studentów specjalizujących się w automatyce, napędzie elektrycznym i elektronice przemysłowej.

Z.

Dynamika nieliniowych serwomechanizmów, N. Gorskaja, I. Krutowa, W. Rutkowski; tłum. W. Paczeńskiowski. WNT 1962 zł 49.—

Omówiono zagadnienia drgań samowzbudnych, stany poślizgowe i stabilność serwomechanizmów, które mogą być opisane równaniami różniczkowymi drugiego lub niekiedy trzeciego stopnia oraz warunki powstawania tych drgań i stanów. Książka jest przeznaczona dla pracowników naukowych i inżynierów, zajmujących się badaniem i projektowaniem układów sterowania i elementów tych układów.

Z.

Tranzystory w urządzeniach automatycznego sterowania, J. Koniew. Tłum. T. Machowski. WKŁ, zł 12.—

Zasady i sposoby zastosowania działania tranzystorów w układach automatycznego sterowania. Autor omawia podstawowe układy wzmacniaczy tranzystorowych i innych urządzeń stosowanych w automatyce. Liczne, starannie dobrane rysunki oraz schematy i wykresy uzupełnione zostały szczegółowymi objaśnieniami.

Z.

Teoria lotu rakiety niekierowanych, F. Gantmacher, L. Lewin. MON, zł 35.—

Książka zawiera systematyczny kurs balistyki zewnętrznej rakiet niekierowanych, stabilizowanych za pomocą brzechw lub ruchem obrotowym, również zagadnienia rozrzutu rakiet niekierowanych.

Z.

Tłoczenie na zimno. Poradnik. W. Romanowski. Tłum. K. Szopski. WNT.

Opisy procesów tłoczenia i prasowania na zimno. Zasady projektowania tych procesów i potrzebne do tego celu dane liczbowe. Zasady konstrukcji tłoczników. Opisy i charakterystyki pras do tłoczenia na zimno. Materiały stosowane na przedmioty tłoczone.

Z.

Mały słownik techniczny rosyjsko-polski i polsko-rosyjski, Praca zbiorowa. WNT, po zł 15.—

Każda z części słownika zawiera około 10 000 terminów wyściowych wraz z ich odpowiednikami, opatrzonymi oznaczeniami z danej dziedziny i w razie potrzeby objaśnieniami w drugim języku.

Z.

Budowa lotnisk. Drogi lotnicze, W. Araszkievicz; PWN 1962. Str. 265, rysunki; cena zł 17.—

Jest to III wydanie skryptu przeznaczonego dla studentów wyższych szkół technicznych (I wydanie pt. „Drogi lotnicze” ukazało się w 1956 r.). Po części ogólnej, dającej porównanie różnych rodzajów transportu, autor omawia znaczenie i rozwój dróg lotniczych oraz daje pojęcia podstawowe. Następnie zapoznaje czytelników z zagadnieniami lotnisk i portów lotniczych, radionawigacją, radiolokacją i telewizją lotniczą oraz wpływami meteorologii na budownictwo lotniskowe. Dalsze rozdziały skryptu poświęcone są zasadom oświetlania lotnisk, przeszkodom lotniczym i ich oznakowaniu oraz wyposażeniu dróg lotniczych. W ostatniej części omówiono „ładowiska”. Recenzowane opracowanie z uwagi na obszerność i encyklopedyczność będzie przydatne dla cywilnych i wojskowych

pracowników lotnictwa — w szczególności zaś dla personelu latającego oraz ruchu.

Z.

Zagadnienia z transportu lotniczego, W. Araszkievicz; PWN 1962. Str. 290, cena zł 17.—

Jest to skrypt przeznaczony dla wyższych uczelni. Autor omawia zagadnienia personelu lotniczego, technicznej i handlowej eksploatacji samolotu, planowania organizacji i kontroli ruchu. Skrypt zawiera również wiadomości z mechaniki lotu, budowy statków powietrznych, szybownictwa i spadochroniarstwa.

Z.

Gasturbinen, Entwicklung — Konstruktion — Anwendung, P. Witt; VEB Verlagstechnik, Berlin 1962. Str. 240, rys. 148; cena DM 21,60.

W I części autor omawia rozwój, budowę i użytkowanie turbin gazowych. Zapoznaje ze środkami napędowymi i smarowniczymi niezbędnymi do eksploatacji różnych typów turbin, podaje sposoby zmniejszenia zużycia tych środków. W rozdziale „Hochwarmfeste Werkstoffe” autor omawia zagadnienie materiałów o wysokich własnościach mechanicznych, odpornych na działanie środków chemicznych i środków wysoce żarowytrzymałych, analizuje również cechy ich obrabialności. Część II wydawnictwa poświęcona jest zastosowaniu turbin gazowych; podano przykłady różnych typów oraz omówiono przekładnie napędowe turbin. Książka jest przydatna dla inżynierów-konstruktorów i użytkowników.

Z.

Navigation Systems for Aircraft and Space Vehicles, T. G. Thorne; Pergamon Press, Oxford 1962. Str. 550, rysunki, wykresy; cena zł 529,20 (Wzorcownia PAN).

Obszerne dzieło składa się z 3 części. Część A poświęcono systemom nawigacyjnym łącznie z systemem opartym na zjawisku Dopplera, omówiono też automatyczne układy liczące oraz nawigację astronomiczną. W części B podano systemy radarowe, zagadnienia i urządzenia automatycznego zbliżania i lądowania samolotów, omówiono problem radiowysokościomierza na duże wysokości. Część C zawiera zagadnienia związane z nawigacją w przestrzeni kosmicznej oraz nawigacją ziemską z wykorzystaniem układów satelitarnych.

Z.

Cours d'aérotechnique, G. Sérane; Dunod, Paris 1963. Str. 342, rysunki, wykresy, tabele; cena 195,20 (Wzorcownia PAN).

Jest to trzecie poszerzone wydanie mechaniki lotu. Dziełko zawiera interesujące rozdziały obejmujące napędy turbosmigłowe i odrzutowe, osiągi statków latających, zagadnienia wodnopłatów; omówiono postawowe przyrządy pokładowe, zasady i systemy nawigacyjne, zagadnienia zbliżenia i lądowania bez widoczności ziemi, nawigację bezwładnościową i wielkich zasięgów.

Z.

Flight Mechanics, Volume 1: Theory of flight paths, Angelo Miele, Addison-Wesley Publishing Comp. Inc., USA 1962. Str. 416, wykresy, tabele; cena zł 300.— (Wzorcownia PAN).

Jest to pierwsza część pracy prof. A. Miele, dyrektora astrodynamiki i mechaniki lotu w Laboratorium Badań Naukowych Boeinga, poświęcona teorii lotu statków powietrznych, rakiet, satelitów i pojazdów kosmicznych. Dalsze dwie części (które są w opracowaniu) obejmować będą teorię optymalnego toru lotu oraz lotu w niejednorodnym polu ciężenia. Zawiera one będą matematykę techniczną, podstawowe pojęcia mechaniki lotu oraz zagadnienia fizyczne.

Z.

Highway and Airport Engineering, A. R. Legault; Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 1960. Str. 483, liczne fotografie i wykresy; cena zł 270.— (Wzorcownia PAN).

Książka poświęcona inżynierii lotnisk i portów, od założeń, obliczeń i rysunków — do budowy i wyposażenia. Obszerne zilustrowano urządzenia mechanizujące budowę, omówiono zagadnienia mechanizacji eksploatacyjnej, znaki i sygnały, porty przyszłości, środki transportowe.

Z.

Industrial Hydraulics, J. Pippenger and T. Hicks; McGraw-Hill Book Co., New York 1962. Str. 360, rysunki, tabele; cena zł 210.— (Wzorcownia PAN).

Konstruktor lotniczy znajdzie w tym wydawnictwie szereg przydatnych mu informacji. Dzieło obejmuje: ciecze hydrauliczne, pompy, silniki i napędy hydrauliczne, ponadto układy zwykle i servo oraz urządzenia sterowania elektrohydrauliczne.

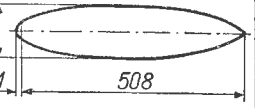
Tabela 2.2
Rys. 2.3 Geometria badanych kadłubów jest przedstawiona w tabeli 2.2 i na rys. 2.3

x_{mm}		-4	0	6,4	12,7	18,3	25,4	38,1	50,8	58,7	88,0	102	152
okrągły	ϕ mm	0	19,6	31,4	40,0	—	52	—	64,8	—	—	82,2	86,7
prostokątny	y_0 mm	ϕ	ϕ	ϕ	ϕ	45,6	—	60,5	—	71,0	78,5	82,2	86,7
	y_1 mm	0	19,6	31,4	40,0	—	—	57,0	—	60,3	62,8	64,8	68,0

Tabela 2.2 c.d.

203	254	305	356	407	432	457	484	436	508	
87,5	86,7	83,2	76,1	64,0	55,2	42,9	25,4	13,9	0	
87,5	86,7	83,2	76,1	64,0	55,2	—	—	—	28,6	
68,7	68,1	65,2	59,7	50,2	43,4	33,9	19,5	10,9	0	

Rys. 2.3



Wielkości współczynnika oporu płatów izolowanych od kadłuba przy zmiennych kątach natarcia, przedstawia tab. 2.4

Tabela 2.4

Rodzaj płata	$\alpha = -4^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 8^\circ$	$\alpha = 12^\circ$	$\alpha = 16^\circ$
Płat prostokątny NACA 0012	—	0,0080	0,0087	—	0,0150
Płat prostokątny NACA 23012	—	0,0085	0,0095	—	0,0161
Płat prostokątny NACA 4412	0,0097	0,0095	—	0,0136	—
Płat trapezowy NACA 0018-09	—	0,0093	0,0099	—	0,0146

W tabeli 2.5 podano współczynniki oporów kadłubów izolowanych od skrzydła przy zmiennych kątach natarcia. (Wielkości współczynników są odniesione do pow. płata)

Tabela 2.5

Rodzaj kadłuba	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 4^\circ$	$\alpha = 8^\circ$	$\alpha = 12^\circ$	$\alpha = 16^\circ$
Kadłub izolowany okrągły	0,0041	0,0042	0,0049	0,0062	0,0085
Kadłub izolowany prostokątny	0,0049	0,0054	0,0068	0,0097	0,0151

Tabela 2.6 przedstawia wielkości współczynników oporu dla:
1) Różnych zespołów skrzydło-kadłub
2) Przyrostu współczynnika oporu wywołanego interferencją

$$\Delta C_{x_{int}} = (C_{x_p} \cdot C_{x_k}) - C_{x_{zesp}}$$

gdzie: $\Delta C_{x_{int}}$ przyrost współczynnika oporu wywołany interferencją
 C_{x_p} współczynnik oporu płata izolowanego
 C_{x_k} współczynnik oporu kadłuba izolowanego
 $C_{x_{zesp}}$ współczynnik oporu zespołu kadłub-skrzydło

3) Przyrost współczynnika oporu skrzydła wywołany interferencją skrzydło-kadłub δC_{x_p}

$$\delta C_{x_p} = C_{x_p}^* - C_{x_p}$$

gdzie: $C_{x_p}^*$ współczynnik oporu skrzydła mierzony w obec. kadłuba
 C_{x_p} współczynnik oporu skrzydła izolowanego
 δC_{x_p} przyrost współczynnika oporu skrzydła spowodowany interferencją skrzydło-kadłub

4) Współczynnik oporu kadłuba w obec. skrzydła dla różnych rodzajów kombinacji skrzydła-kadłub C_{x_k}

Tabela 2.6

Lp	Szkic	N _k kombinacji	Rodzaj badania				Opis modelu		Położenie skrzydła względem kadłuba		$(C_{x_{zesp}})_{min}$	$\Delta C_{x_{int}}$	δC_{x_p}	C_{x_k}
			Kadłub	Płat	Owiewka kadł.-skrz.		x/c	y/c						
1		7	1	1	1	—	0	0	0,0115	0,0006	—	—		
2		165	1	1	2	—	0	-0,04	0,0126	0,0010	—	—		
3		284	1	1	3	—	0	0	0,0117	0,0009	—	—		
4		186	2	1	4	—	0	0	0,0115	0,0009	—	—		
5		204	3	2	1	—	0	0	0,0122	0,0007	—	—		
6		208	3	2	2	—	0	0	0,0136	0,0008	—	—		
7		209	3	2	4	—	0	0	0,0127	0,0015	—	—		
8		1	4	1	1	—	0,64	0	0,0111	0,0010	—	—		
9		3	4	1	1	—	0,25	0	0,0112	0,0009	—	—		
10		7	4	1	1	—	0	0	0,0115	0,0006	—	—		
11		11	4	1	1	—	-0,25	0	0,0115	0,0006	—	—		
12		13	4	1	1	—	-0,75	0	0,0118	0,0003	—	—		
13		32	4	1	1	—	0	0,54	0,0125	-0,0004	0,0003	0,0042		
14		48	4	1	1	—	0,25	0,54	0,0129	-0,0008	0,0013	0,0039		
15		53	4	1	1	—	-0,25	0,54	0,0126	-0,0005	0,0002	0,0044		
16		58	4	1	1	—	-0,75	0,54	0,0128	-0,0007	0,0000	0,0049		
17		99	4	1	1	—	0,25	-0,54	0,0129	-0,0008	0,0013	0,0039		
18		83	4	1	1	—	0	-0,54	0,0125	-0,0004	0,0003	0,0042		

Tabela 2.6 c.d.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
19		104	4	1	1	—	-0,25	-0,54	0,0126	-0,0005	0,0002	0,0044
20		109	4	1	1	—	-0,75	-0,54	0,0128	-0,0007	0,0000	0,0049
21		14	5	1	1	—	0	0,08	0,0116	0,0005	—	—
22		15	5	1	1	—	0	0,16	0,0116	0,0005	—	—
23		16	5	1	1	—	0	0,24	0,0121	0,0000	—	—
24		19	5	1	1	—	0	0,28	0,0122	-0,0001	—	—
25		22	5	1	1	—	0	0,34	0,0133	-0,0012	—	—
26		24	5	1	1	—	0	0,40	0,0153	-0,0032	—	—
27		29	5	1	1	—	0	0,44	0,0124	-0,0003	0,0003	0,0042
28		32	5	1	1	—	0	0,54	0,0125	-0,0004	0,0003	0,0042
29		37	5	1	1	—	0	0,70	0,0116	0,0005	0,0004	0,0034
30		42	5	1	1	—	0	1,00	0,0111	0,0020	0,0007	0,0028
31		62	5	1	1	—	0	-0,08	0,0116	0,0005	—	—
32		63	5	1	1	—	0	-0,16	0,0116	0,0005	—	—
33		64	5	1	1	—	0	-0,24	0,0121	0,0000	—	—
34		67	5	1	1	—	0	-0,28	0,0122	-0,0001	—	—
35		70	5	1	1	—	0	-0,34	0,0133	-0,0012	—	—
36		72	5	1	1	—	0	-0,40	0,0153	-0,0032	—	—
37		74	5	1	1	—	0	-0,40	0,0132	-0,0011	0,0001	0,0055
38		78	5	1	1	—	0	-0,44	0,0124	-0,0003	0,0003	0,0042
39		83	5	1	1	—	0	-0,54	0,0125	-0,0004	—	—
40		88	5	1	1	—	0	-0,70	0,0116	0,0005	0,0004	0,0034
41		93	5	1	1	—	0	-1,00	0,0111	0,0020	0,0007	0,0028
42		160	5	1	2	—	0	0,54	0,0127	-0,0006	0,0013	0,0024
43		165	5	1	2	—	0	-0,04	0,0126	-0,0005	—	—
44		168	5	1	2	—	0	-0,54	0,0144	-0,0023	-0,0014	0,0062
45		182	5	1	4	—	0	0,54	0,0132	-0,0011	0,0001	0,0037
46		185	5	1	4	—	0	0,22	0,0124	-0,0003	—	—
47		187	5	1	4	—	0	-0,22	0,0124	-0,0003	—	—
48		189	5	1	4	—	0	-0,54	0,0132	-0,0011	0,0001	0,0037
49		193	5	1	5	—	0	0,54	0,0116	0,0005	0,0005	0,0037
50		197	5	1	5	—	0	0	0,0111	0,0010	—	—
51		199	5	1	5	—	0	-0,54	0,0116	0,0005	0,0005	0,0037
52		210	5	1	1	—	0	0,28	0,0123	-0,0002	—	—
53		211	5	1	1	—	0	0,34	0,0126	-0,0005	—	—
54		213	5	1	1	—	0	-0,28	0,0123	-0,0002	—	—
55		214	5	1	1	—	0	-0,34	0,0126	-0,0005	—	—
56		219	5	1	2	—	0	0,26	0,0128	-0,0007	—	—
57		220	5	1	2	—	0	0,34	0,0131	-0,0010	—	—
58		221	5	1	2	—	0	-0,30	0,0139	-0,0018	—	—
59		222	5	1	2	—	0	-0,34	0,0142	-0,0021	—	—
60		225	5	1	4	—	0	0,22	0,0124	-0,0003	—	—
61		226	5	1	4	—	0	0,34	0,0128	-0,0007	—	—
62		227	5	1	4	—	0	-0,22	0,0124	-0,0003	—	—
63		228	5	1	4	—	0	-0,34	0,0128	-0,0007	—	—
64		232	5	1	4	—	0	0,34	0,0139	-0,0018	—	—
65		235	5	1	4	—	0	-0,34	0,0139	-0,0018	—	—
66		230	5 ₆	1	4	4	0	0	0,0117	0,0004	—	—
67		231	5 ₆	1	4	4	0	0,22	0,0124	-0,0003	—	—
68		233	5 ₆	1	4	4	0	0,34	0,0135	-0,0014	—	—
69		234	5 ₆	1	4	4	0	-0,22	0,0124	-0,0003	—	—
70		236	5 ₆	1	4	4	0	-0,34	0,0135	-0,0014	—	—

Tabela 2,6 cd

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
71		135	6	1	1	2	0	0	0,0112	0,0009	—	—
72		136	6	1	1	3	0	0	0,0114	0,0007	—	—
73		137	6	1	1	4	0	0	0,0115	0,0006	—	—
74		140	6	1	1	5	0	0	0,0135	-0,0014	—	—
75		141	6	1	1	6	0	0	0,0120	0,0001	—	—
76		142	6	1	1	7	0	0	0,0135	-0,0014	—	—
77		143	6 ₅	1	1	8	0	0,40	0,0128	-0,0007	—	—
78		144	6 ₅	1	1	9	0	0,40	0,0131	-0,0010	—	—
79		145	6 ₅	1	1	10	0	0,40	0,0129	-0,0008	—	—
80		146	6 ₅	1	1	8	0	-0,40	0,0128	-0,0007	—	—
81		147	6 ₅	1	1	9	0	-0,40	0,0131	-0,0010	—	—
82		148	6 ₅	1	1	10	0	-0,40	0,0129	-0,0008	—	—
83		149	6 ₅	1	1	11	0	0,54	0,0134	-0,0013	—	—
84		150	6 ₅	1	1	12	0	0,54	0,0130	-0,0009	—	—
85		151	6 ₅	1	1	13	0	0,54	0,0142	-0,0021	—	—
86		152	6 ₅	1	1	14	0	0,54	0,0140	-0,0019	—	—
87		153	6 ₅	1	1	15	0	0,54	0,0143	-0,0022	—	—
88		154	6 ₅	1	1	11	0	-0,54	0,0134	-0,0013	—	—
89		155	6 ₅	1	1	12	0	-0,54	0,0130	-0,0009	—	—
90		156	6 ₅	1	1	13	0	-0,54	0,0142	-0,0021	—	—
91		157	6 ₅	1	1	14	0	-0,54	0,0140	-0,0019	—	—
92		158	6 ₅	1	1	15	0	-0,54	0,0143	-0,0022	—	—
93		223	6	2	2	4	0	0	0,0137	-0,0016	—	—
94		224	6 ₅	2	2	16	0	0,34	0,0133	-0,0012	—	—
95		229	6	2	4	4	0	0	0,0127	-0,0006	—	—
96		306	6	1	4	4	0	0,22	0,0122	-0,0001	—	—
97		307	6	1	4	4	0	-0,22	-0,0122	-0,0001	—	—

Objaśnienia do tabeli 2,6

- Oznaczenia „rodzaju badania”
 - wpływ wygięcia linii środkowej profilu
 - wpływ obrysu płata
 - wpływ obrysu kadłuba
 - wpływ przesunięcia płata wzdłuż cięciwy
 - wpływ przesunięcia płata wzdłuż osi z (L do cięciwy)
 - wpływ oprofilowania przejścia skrzydło-kadłub
 - wpływ przesunięcia płata wzdłuż osi z przy oprofilowaniu przejścia skrzydło-kadłub
 - wpływ oprofilow. przejścia skrz-kadł. przy przes. płata wzdłuż osi z
- Oznaczenia kadłuba
 - kadłub o przekrojach prostokątnych opisany na rys. 2, 3 i w tab. 2, 2
 - kadłub o przekrojach prostokątnych opisany na rys. 2, 3 i w tab. 2, 2
- Oznaczenia płata
 - NACA 0012
 - NACA 4412 } prostokątny
 - NACA 23012
 - NACA 0018-09-trapezowy
- Oprofilowanie przejścia skrzydło-kadłub
 - owiewka z krzywizny słozkowej
 - owiewka o słabym, małym, promieniu krzywizny (0,03c)
 - owiewka o słabym, dużym, promieniu krzywizny (0,12c)
 - owiewka z dwu krzywizn słozkowych
 - owiewka z płytki wygiętej w górę
 - owiewka z płaskiej płytki
 - owiewka z płytki wygiętej w dół
 - mała owiewka z krzywizny słozkowej
 - duża owiewka z krzywizny słozkowej
 - duża owiewka z krzywizny słozkowej wydłużona w kier. kraw. natarcia
 - cienka płytka łącząca (o przekr. NACA 0012c na 0,40c) zaczynająca się 0,15c za kraw. nat.
 - średnio gruba kolumna łącząca (o przekr. NACA 0025 i długości 0,85c)
 - gruba kolumna łącząca (o przekr. NACA 0012 i długości 0,85c)
 - odmiana układu poprzedniego (14) z kolumną zaczynającą się od kraw. natarcia
 - odmiana układu poprzedniego (14) z dodaną małą owiewką
 - owiewka przy krawędzi natarcia
- Oznaczenia współczynników

$(C_{x\text{zesp}})_{\text{min}}$ - minimalny współczynnik oporu zespołu skrzydło-kadłub

$\Delta C_{x\text{int}} = (C_{x\text{p}} + C_{x\text{k}}) - (C_{x\text{zesp}})_{\text{min}}$ - przyrost współczynnika oporu wywoł. interfer.

$C_{x\text{p}}$ - współczynnik oporu płata izolowanego } minimalne

$C_{x\text{k}}$ - współczynnik oporu kadłuba izolowanego }

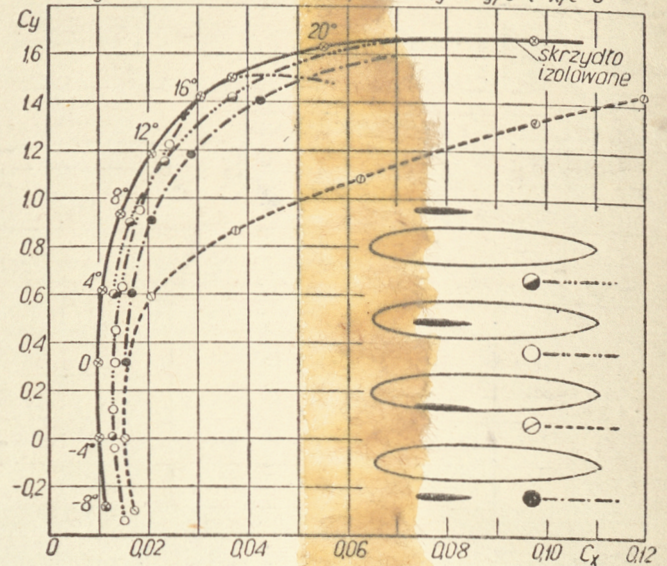
$\Delta C_{x\text{p}}$ - przyrost współczynnika oporu skrzydła wywołany oporem interferencyjnym skrzydło-kadłub

$\Delta C_{x\text{k}} = C_{x\text{p}} - C_{x\text{k}}$

$C_{x\text{p}}$ - współczynnik oporu skrzydła w obecności kadłuba

$C_{x\text{k}}$ - współczynnik oporu kadłuba w obecności skrzydła

Rys. 27 podaje biegunowe płata prostokątnego o prof. NACA 4412, izolowanego i w obecności kadłuba, dla różnych y/c i x/c=0



Rys. 28 oraz w tabeli 2,9 przedstawiono zależność współczynnika oporu od kąta natarcia dla skrzydła izolowanego w obecności kadłuba. Płat prostokątny NACA 0012, kadłub okrągły, x/c=0, y/c=0, $\alpha_z=0$

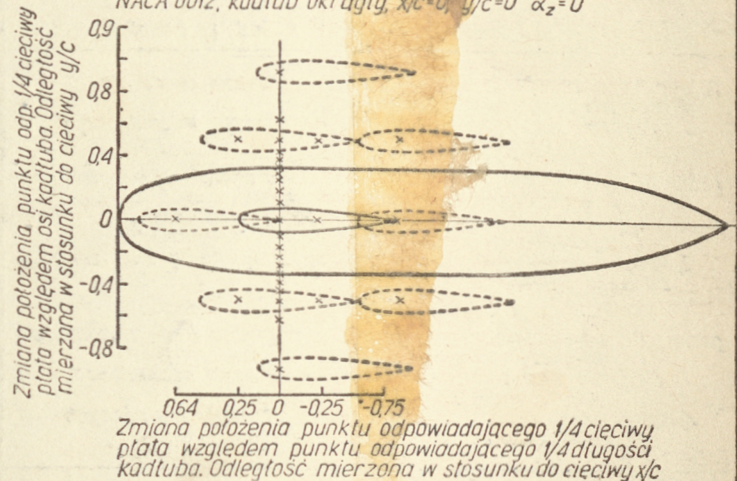


Tabela 2,9

Rodzaj zespołu	$\alpha=-4^\circ$	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=4^\circ$	$\alpha=8^\circ$	$\alpha=12^\circ$	$\alpha=16^\circ$	$\alpha=20^\circ$
Skrzydło izolowane	0,0085	0,0080	0,0087	0,0115	0,0150	0,0220	0,0355
Skrzydło w obec. kadł. komb.32	0,0130	0,0085	0,0060	0,0080	0,0125	0,0220	0,0400

Na rys. 2,10 i w tabeli 2,11, przedstawiono zależność współcz. oporu od kąta natarcia dla kadłuba izolowanego oraz dla Tab. 2,11 kadłuba w obecności skrzydła. Płat prostokątny NACA 0012, kadłub okrągły, x/c=0, y/c=0, $\alpha_z=0$

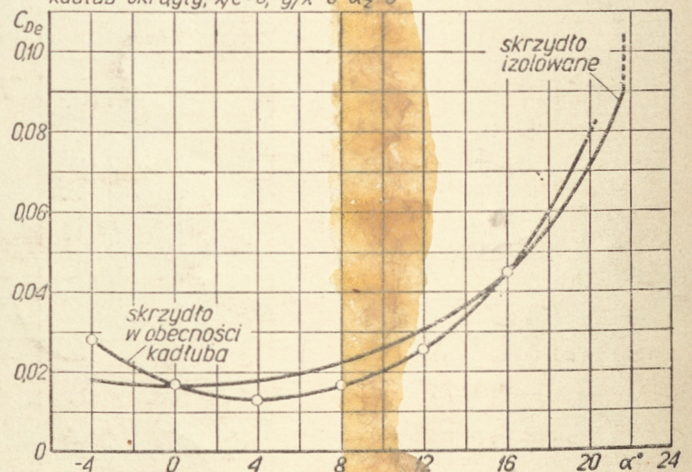


Tabela 2,11

Rodzaj zespołu	$\alpha=0^\circ$	$\alpha=4^\circ$	$\alpha=8^\circ$	$\alpha=12^\circ$	$\alpha=16^\circ$
Kadłub izolowany	0,0041	0,0042	0,0049	0,0062	0,0085
Kadłub w obec. skrzydła komb.32	0,0042	0,0064	—	0,0072	—