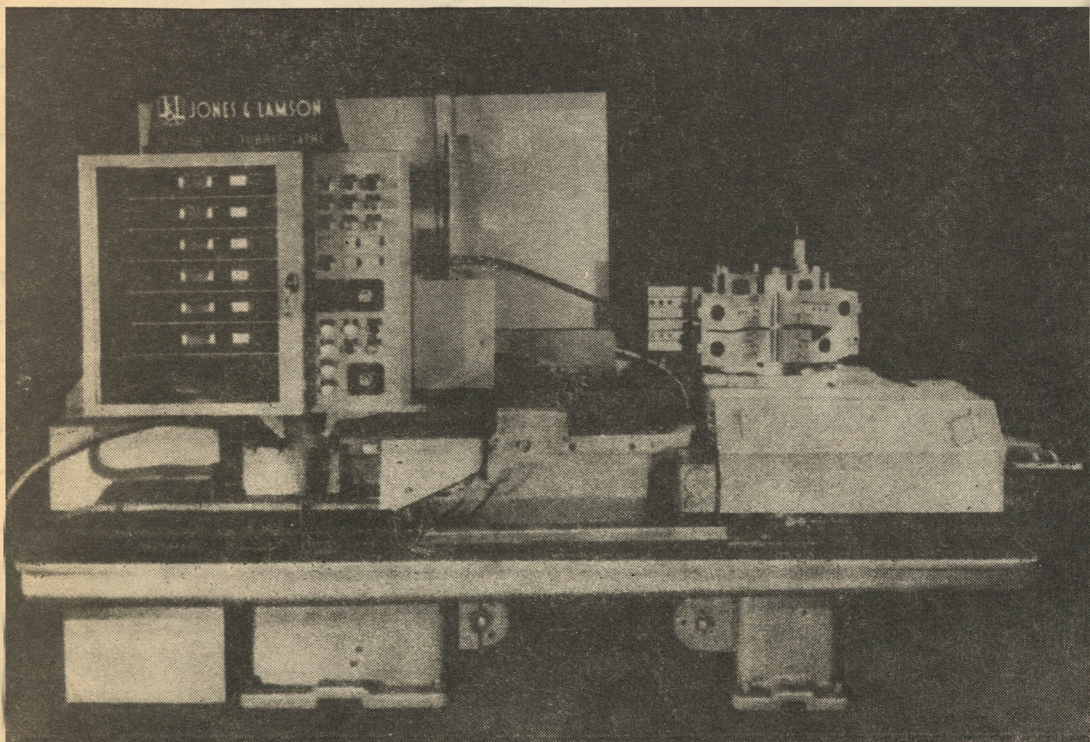
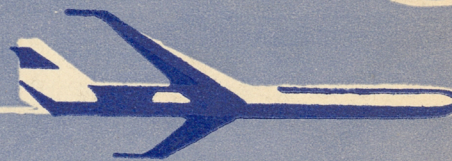


TECHNIKA LOTNICZA



6

1963

WYDAWNICTWA
CZASOPISM
TECHNICZNYCH NOT

POMOCE KONSTRUKTORSKIE „TECHNIKI LOTNICZEJ”

Materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych

Część IV

Opracowali: mgr inż. A. Ciszewski i mgr inż. T. Radomski

Stopy żarowytrzymałe z głównym składnikiem – niklem

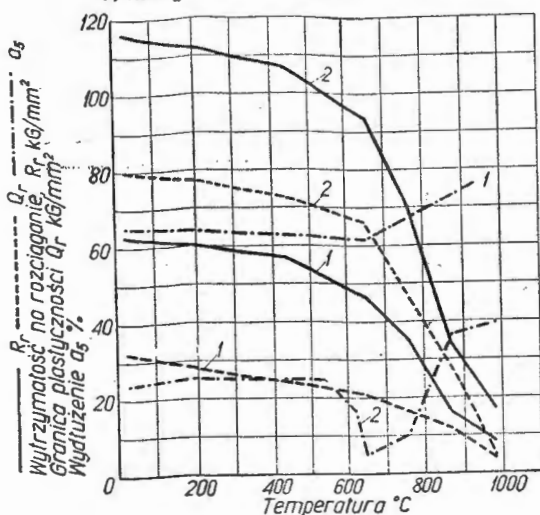
(dokończenie)

W bieżącym zeszyte podano dalszy ciąg danych technicznych dotyczących żarowytrzymałych stopów z głównym składnikiem niklem (według źródeł amerykańskich).
W kolejnej tabeli 9 podano ogólną charakterystykę i zastosowanie ważniejszych stopów z głównym składnikiem niklem, produkowanych w USA, w tabeli 10 – niektóre ich własności

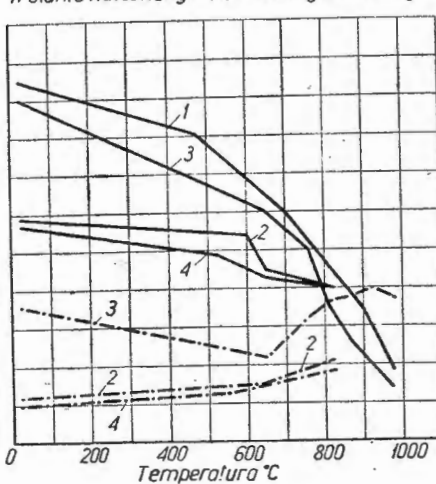
fizyczne i w tabeli 11 – wytrzymałość czasową omawianych stopów.

Niezależnie od tego, na wykresach 16 do 22 podano własności mechaniczne (R_r , Q_r i a_5) w podwyższonych temperaturach typowych amerykańskich stopów niklu w stanie obrobionym cieplnie.

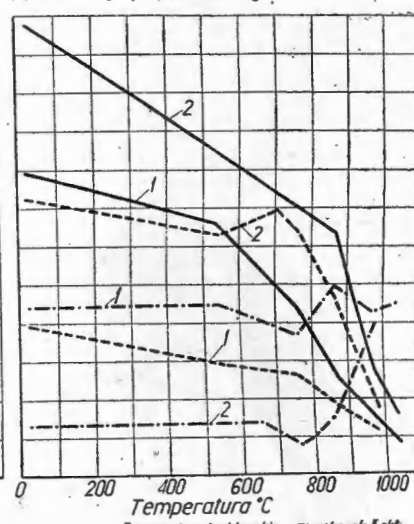
Rys. 16. Własności mech. w podwyższonych temp. stopów z głównym składnikiem niklem: (1) Incoloy T, (2) Incoloy 901.



Rys. 17. Własności mech. w podwyższonych temp. stopów z głównym składnikiem niklem: (1) Hastelloy B w stanie walcowanym, (2) Hastelloy B w stanie litym, (3) Hastelloy C w stanie walcowanym, (4) Hastelloy C w st. litym.



Rys. 18. Własności mech. w podwyższonych temp. stopów z głównym składnikiem niklem: (1) Hastelloy X, (2) Hastelloy R-235.



TREŚĆ ZESZYTU

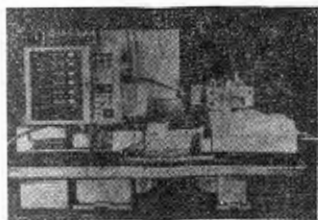
O właściwą rangę technologii lotniczej	133
T. BEDNARSKI — Metody dynamicznego kształtowania metali	134
J. BUĆ, R. ZIELIŃSKI — Rozwój sterowania programowego	143
A. GOŁĘDZINOWSKI — Obróbka elektrochemiczna	148
A. STEFKO — Wyoblanie metali ze stałą i zmienną grubością ścianki	154
Nowości techniczne	161
Na półkach księgarskich	161
Z żałobnej karty	162
Przegląd Dokumentacyjny Lotnictwa	163
Pomocę Konstruktorskie Techniki Lotniczej — A. CISZEWSKI, T. RADOMSKI: Materiały stosowane w konstrukcjach lotniczych, cz. IV — Stopy żarowytrzymałe z głównym składnikiem — niklem	II okł.

CONTENTS

Editorial	133	Page
T. BEDNARSKI — The methods of high energy forming	134	133
J. BUĆ, R. ZIELIŃSKI — Development of numerical controll	143	134
A. GOŁĘDZINOWSKI — Electrochemical machining	148	143
A. STEFKO — Flow forming with constant and variable wall thickness	154	148
Technical News	161	154
On Bookseller's Shelves	161	161
Aviation Documentation Review	163	161
Designer's Data Sheets — A. CISZEWSKI, T. RADOMSKI: Materials used in aircraft structures	II on cover	163

СОДЕРЖАНИЕ

О соответственный ранг авиационной технологии	133	Стр.
T. BEDNARSKI — Методы динамического фасонирования метали	134	133
J. BUĆ, R. ZIELIŃSKI — Развитие программного управления	143	134
A. GOŁĘDZINOWSKI — Электрохимическая обработка	148	143
A. STEFKO — Надавливание метали с постоянной и переменной толщиной стенки	154	148
Технические новости	161	154
На книжных полках	161	161
Из траурной карты	162	161
Документационный обзор авиации	163	162
Конструкторские пособия Авиационной Техники. — A. CISZEWSKI, T. RADOMSKI: Материалы применимые в авиационных конструкциях часть IV. Сплавы жароупорные с главным легирующим элементом — никлем	II обл.	163



Tokarka rewolwerowa wyposażona w układ sterowania sekwencyjnego

Okladkę projektowała Zofia Jurakowska-Nowicka

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



ZESZYT POŚWIĘCONY TECHNOLOGII LOTNICZEJ

O właściwą rangę technologii lotniczej

Pojęcie technologii, w wielu wypadkach, stanowi jeszcze synonim małego warsztatu z majstrem na czele, wykonującego prymitywnymi środkami proste konstrukcje. Zapomina się, że obraz ten jest historycznym wspomnieniem, a burzliwy rozwój techniki nie ominął również technologii, przekształcając ją w potężną gałąź techniki, opartą na szerokich podstawach naukowych, o szerokim zakresie problemów i specjalności, bogato rozbudowanej strukturze własnej i wielostronnych powiązaniach z różnymi dziedzinami wiedzy. Technika lotnicza i raketowa w swym dążeniu do ciągłego zwiększania prędkości, zasięgu, wysokości i innych osiągnięć statków powietrznych i satelitarnych, wytycza kierunki rozwoju i stawia wymagania dla konstrukcji i technologii. I tak, stawiając konstrukcji optymalizację kształtowań konstrukcyjnych, maksymalne wykorzystanie wytrzymałościowe materiału, osiągnięcie maksymalnych mocy i ciągów jednostkowych, stosowanie najwyższych ciśnień, temperatur pracy i koncentracji energii, stawia się przed technologią trudny i obszerny program prac naukowo-badawczych, konstrukcyjnych i właściwych technologicznych.

W celu zagwarantowania postępu w technice lotniczej i raketowej program prac technologicznych musi objąć następujące dziedziny:

1. Opracowanie nowych rodzajów materiałów o wyższych odpornościach cieplnych, zmęczeniowych itp., zgodnych z zapotrzebowaniem.

2. Opracowanie nowych metod wytwarzania i nowych procesów technologicznych.

3. Opracowanie nowych metod łączenia.

Dla uzmysłowienia sobie zakresu tematycznego i ogromu prac kryjących się w poszczególnych punktach, należy pamiętać, że temat 1 składa się z:

a) opracowania składu chemicznego materiału i sposobów jego otrzymania,

b) określenia i zbadania własności konstrukcyjnych nowego materiału,

c) określenia i zbadania własności technologicznych tego materiału,

d) opracowania warunków technicznych odbioru tego materiału w różnych fazach procesu,

e) określenia i zbadania własności eksploatacyjnych i handlowych,

f) wymagań stawianych konstrukcji przez specyfikę nowego materiału,

W punkcie 2 należy widzieć następujące tematy:

a) opracowanie nowej metody,

b) konstrukcja maszyn i stoisk do nowej metody,

c) zbadanie i ustalenie parametrów technologicznych i eksploatacyjnych tych urządzeń,

d) opracowanie nowych procesów technologicznych,

e) określenie przydatności nowych metod, ich wpływu na własności użytkowe produktu, ekonomię wytwarzania i inne,

f) wymagania stawiane konstrukcji przez specyfikę nowego procesu.

Punkt 3 — to znowu zespół problemów:

a) opracowanie samej metody lub jej adaptacja,

b) konstrukcja i budowa urządzeń do jej realizacji,

c) określenie i zbadanie parametrów technologicznych nowego procesu,

d) własności użytkowe nowych złącz,

e) opracowanie warunków technicznych dla nowego procesu oraz wymagań wstępnych dla konstrukcji.

Dotychczasowy stan wygląda w ten sposób, że docenia się i widzi potrzebę prac z zakresu punktu 1a i 1b, natomiast następne punkty są albo całkowicie pomijane, albo przynajmniej poważnie spłycone. Trzeba tymczasem pamiętać, że w chwili obecnej nie ma już możliwości realizacji nowych konstrukcji lotniczych, bez pełnego programu prac technologicznych, gdyż tematyka lotnicza dawno wyszła poza ramy klasycznych materiałów, kształtów konstrukcji, wymagań i rozwiązań. Ażeby konstrukcja uwieńczona była pełnym sukcesem, powstała szybko, pracowała niezawodnie i była w pełni nowoczesna, konieczne jest pełne rozwinięcie frontu prac zarówno badawczych lotniczych, konstrukcyjnych, jak i technologicznych. Należy tu dodać, że w wielu przypadkach badania technologiczne są bardziej pracochłonne od konstrukcyjnych i limitują powstanie nowych rozwiązań lotniczych.

W świetle tych problemów istnieje potrzeba współpracy konstruktora z technologiem już od momentu stawiania założeń nowym konstrukcjom. Wynika to i z drugiego warunku, wzajemnego oddziaływania badań technologicznych i konstrukcyjnych, jak to widać z punktów: 1f, 2f, 3e, wymienionych w tematyce prac.

Dla pełnego powodzenia konstrukcji, poza innymi jej walorami, wymagana jest jej ekonomiczność — rozumiana jako względna w stosunku do innych konstrukcji tego typu. Spełnienie tego warunku jest całkowicie niemożliwe bez współpracy technologa z konstruktorem w okresie powstawania projektu i samej konstrukcji. Ten fragmentaryczny zakres współpracy, w odróżnieniu od pełnego opisanego wcześniej, jest doceniany już i w Polsce, w innych gałęziach techniki, jak na przykład konstrukcja obrabiarek — przynosi olbrzymie efekty ekonomiczne i techniczne.

Są pełne podstawy ku temu, by sądzić, iż współpraca taka w przemyśle lotniczym dałaby wyniki wielokrotnie lepsze. Należałoby tylko życzyć sobie, by współpraca ta znalazła realne ramy organizacyjne i przebiegała sprawnie na co dzień. Poza ekonomicznymi efektami takiego współdziałania, zsynchronizowanie metod technologicznych z rozwiązaniami konstrukcji może znacznie podnieść własności użytkowe, a nawet doskonałość samej konstrukcji, a przede wszystkim:

a) wysoką dokładność elementów i zespołów — przez zastosowanie obrabiarek sterowanych programowo, tłoczenia magnetycznego, obróbki elektrochemicznej, odlewania precyzyjnego itp.,

b) wzrost wytrzymałości materiałów przez odpowiednią obróbkę plastyczną i własnościową,

c) wysoką gładkość powierzchni pracujących i obciążonych,

d) wysoką odporność elementów na ścieranie, zmęczenie i korozję — i wiele innych.

Już samo tylko skrócenie okresu wykonania serii prototypowej oraz mniejsza ilość zmian i poprawek wpro-

wadzanych do wyrobu jest wystarczającą rekompensatą za dodatkowe prace uzgodnień technologa z konstruktorem w okresie projektowania. Wszystkie następne korzyści są czystym zyskiem.

Należy tu jeszcze podkreślić bardzo poważną rolę i wpływ, jaki wywiera technologia lotnicza na postęp w pozostałych gałęziach techniki w całym kraju i na świecie. Technologia lotnicza, będąc niejako zmuszona do szukania rozwiązań problemów stawianych jej przez technikę lotniczą i raketową, przekazuje następnie te rozwiązania innym przemysłom, przysparzając im wiele

korzyści technicznych i ekonomicznych. Przykłady adaptacji metod można by mnożyć w dziesiątki: metody spawania stopów lekkich, spawanie w atmosferach ochronnych, metody zgrzewania, różne metody odlewania precyzyjnego, wszystkie metody kształtowania dynamicznego, obróbki elektryczne, nowoczesne metody zwońek profilowych, wykonania przekładni zębatych, zastosowania obrabiarek sterowanych numerycznie i wiele, wiele innych. W skali ogólnokrajowej przynosi to olbrzymie korzyści i jest dodatkowym, bardzo poważnym argumentem w uznaniu i docenianiu technologii lotniczej.

Mgr inż. TADEUSZ BEDNARSKI
Politechnika Warszawska

621.77 : 621.9

Metody dynamicznego kształtowania metali

W artykule omówiono w sposób systematyczny metody dynamicznego kształtowania przedmiotów cienkościennych z podaniem podstawowych schematów ich realizacji. Opisano zjawiska i podano niektóre parametry towarzyszące tym zjawiskom w procesach kształtowania. Omówiono zasadnicze operacje w konkretnych zastosowaniach oraz podano przykłady.

Niniejszy artykuł opracowany został w celu zapoznania czytelników z nowymi metodami, które stanowią uzupełnienie oraz dalszą fazę rozwoju klasycznych metod obróbki plastycznej metali.

1. Wstęp

Dynamiczne kształtowanie metali za pomocą ładunków wybuchowych znane było i stosowane, choć w bardzo ograniczonym zakresie, już w zeszłym stuleciu. Używane wówczas materiały konstrukcyjne zupełnie dobrze i z dostateczną dokładnością mogły być obrabiane tradycyjnymi metodami przeróbki plastycznej. Dlatego też metoda ta nie znalazła zastosowania przemysłowego i przestano się nią zajmować. Również konieczność zachowania dużych środków ostrożności przy stosowaniu materiałów wybuchowych, jak też niedostateczna znajomość ich możliwości stanowiły drugą, bardzo istotną przyczynę braku zainteresowania w rozwoju tych metod. Czynnikiem bezpieczeństwa pracy z materiałami wybuchowymi odgrywał zawsze ważną rolę i w znacznym stopniu nadal ogranicza możliwości powszechnego stosowania przynajmniej niektórych metod dynamicznego kształtowania. Dopiero liczne badania prowadzone w czasie drugiej wojny światowej nad zachowaniem się płyt pancernych pod działaniem pocisków i materiałów wybuchowych oraz nad samym zjawiskiem wybuchu wykazały, że zachowanie się materiału pancerza w warunkach dynamicznego obciążenia jest zupełnie odmienne od zachowania się tegoż materiału przy obciążeniu quasistatycznym. Gwałtowny rozwój techniki lotniczej w latach powojennych, a szczególnie rozwój techniki raketowej, spowodował zapotrzebowanie na części wykonywane w niewielkich seriach z materiałów o wysokich własnościach mechanicznych, ale trudnoobrabialnych plastycznie. To spowodowało, że w ostatnich latach w krajach o rozwiniętym przemyśle lotniczym i raketowym rozwinęły się na szeroką skalę badania teoretyczne i doświadczalne nad metodami dynamicznego kształtowania części z metali i stopów takich jak: stopy tytanu, stale nierdzewne i żaroodporne itp. oraz części o skomplikowanych kształtach.

Określenie „dynamiczne kształtowanie” obejmuje dwójakiego rodzaju zagadnienia, a mianowicie kształtowanie pod wpływem krótkotrwałych obciążeń typu impulsowego, trwających mili- a nawet mikrosekundy oraz kształtowanie, któremu towarzyszy rozchodzenie się zaburzeń i fal naprężeń oraz odkształceń w ośrodku sprężysto-plastycznym. Obciążenia impulsowe, charakteryzujące się gwałtownym wzrostem nacisków, krótkotrwalnością i wysokimi ciśnieniami, mogą w pewnych warunkach wyraźnie zmieniać własności mechaniczne metali,

na które działają. W wielu przypadkach zmiany te mogą być tak duże, że wykażą istotny wpływ na zachowanie się materiału. Wpływ ten będzie szczególnie wyraźny w przypadkach, kiedy zachodzące zmiany w materiale są nieodwracalne, na przykład występowanie odkształceń trwałych lub pęknięć rozdzielczych. Oczywiście, zmiany własności mechanicznych materiału mogą doprowadzić do zupełnie odmiennego zachowania się przy obciążeniu dynamicznym niż przy zwykłych, prawie statycznych obciążeniach. Oprócz tego w przypadkach, kiedy charakter impulsowy obciążenia nie rozprzestrzenia się na cały przedmiot obrabiany wystąpią różne zmiany własności mechanicznych na różnych obszarach tego samego przedmiotu obrabianego. Przy tym niektóre własności mechaniczne, nie mające żadnego znaczenia przy zwykłych obciążeniach, mogą odgrywać bardzo ważną rolę przy obciążeniach dynamicznych. Do takich własności należą na przykład gęstość materiału oraz prędkość rozchodzenia się zaburzeń sprężystych i plastycznych.

Wzajemne oddziaływanie między obciążeniem dynamicznym, kształtem przedmiotu lub próbki i materiałem powodują, że ich zasadnicze zależności i charakterystyka będą różniły się od tych samych charakterystyk przy obciążeniach quasistatycznych. Wynika to stąd, że:

1) przy obciążeniu dynamicznym samo obciążenie może zażyć w dużym stopniu od reakcji materiału, na które działa,

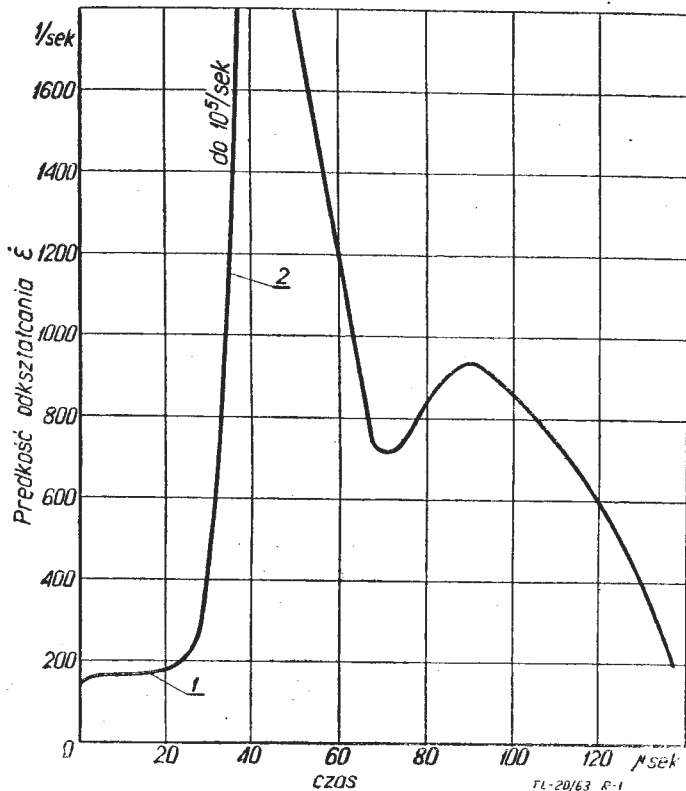
2) naprężenia i odkształcenia wywołane obciążeniem dynamicznym występują z pewną zwłoką czasową i niejednocześnie w całym materiale, lecz rozchodzą się w formie zaburzeń lub fal z określoną prędkością,

3) dynamiczne obciążenia, działające na materiał, wywołują jego przemieszczenia, które mają również charakter dynamiczny, co jest bardzo istotne przy określaniu zachowania się metali [3].

Proces dynamicznego kształtowania wymaga zestawienia zjawisk nie związanych — jak by się wydawało — bezpośrednio ze sobą i sformułowania na podstawie tych zestawień i powiązań pewnych ogólnych zasad, które można by stosować do rozwiązywania niektórych zagadnień fizycznych i technicznych.

Badania przeprowadzone nad jednoosiowym rozciąganiem dynamicznym stali miękkiej [1 i 2] wykazują, że przy impulsie obciążenia trwającym około 100 μ sek granica sprężystości wzrosła prawie 2,5-krotnie w stosunku do granicy sprężystości otrzymywanej przy statycznym rozciąganiu jednoosiowym próbki z tego samego materiału, a później następowało płynięcie materiału prawie

bez umocnienia, aż do zerwania próbki, przy czym na okres sprężysty przypadało tylko 2,5 μ sek (rys. 1). Odmienny charakter zależności $\sigma = f(\epsilon)$ przy quasistatycznym i dynamicznym rozciąganiu jednoosiowym daje podsta-



Rys. 1. Prędkość odkształcania w funkcji czasu przy dynamicznym rozciąganiu — $\epsilon(t)$

wę do wnioskowania, że również przy wieloosiowym stanie naprężeń funkcja opisująca plastyczne płynięcie metali będzie miała inną postać w przypadkach dynamicznego i quasistatycznego obciążenia, występującego przy kształtowaniu. Uwidacznia się tutaj wyraźnie wpływ prędkości odkształcania. Badania wykazują [3], że metale i stopy bardzo różnie reagują na prędkość odkształcania. Największą wrażliwość, wyrażającą się wzrostem granicy plastyczności, wykazują metale i stopy w stanie wyżarzonym, przy czym stal miękka wykazuje stosunkowo największą wrażliwość spośród badanych materiałów. Metale i stopy w stanie utwardzonym i o niskiej tłoczności przejawiają swoją wrażliwość na prędkość odkształcania w postaci zwiększonej tłoczności, tak że wymagają mniej, albo w ogóle nie wymagają — wyżarzania pośredniego między ciągnięciami.

Pomiary prędkości odkształcania przy obciążeniach dynamicznych wykazują, że jest ona stała w zakresie odkształceń sprężystych, lecz zmienia się i jest znacznie wyższa w zakresie odkształceń plastycznych. Różnice te są bardzo duże i tak dla zakresu sprężystego prędkość odkształceń jest rzędu $10^2 \frac{1}{\text{sek}}$, a dla zakresu plastycznego dochodzi nawet do $10^5 \frac{1}{\text{sek}}$ (rys. 1). Prędkości od-

kształcania podane są jako wartości średnie odkształceń z pomiarów prędkości przemieszczeń końców próbki odniesionej do jednostki długości.

Ważną rolę odgrywają tak zwane krytyczne prędkości uderzenia, przy których odkształcenia plastyczne rozprzestrzeniają się wolniej od prędkości narastania obciążenia, co powoduje zerwanie próbki [4]. Ponieważ prędkość rozprzestrzeniania się odkształceń plastycznych określona jest wzorem:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\sigma}{d\epsilon}} \quad [1]$$

gdzie $\frac{d\sigma}{d\epsilon}$ jest pochyleniem krzywej naprężenie-odkształ-

cenie w danym momencie i przy danym odkształceniu, a ρ jest gęstością obciążonego materiału, to prędkość uderzenia v , wywołująca odkształcenie plastyczne ϵ , wyraża się wzorem:

$$v_1 = \int_0^{\epsilon_1} \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\sigma}{d\epsilon}} \cdot d\epsilon \quad [2]$$

Odształcenie osiąga swoją wartość ϵ_u , odpowiadającą granicy wytrzymałości materiału obciążanego, przy prędkości obciążenia v_u , zaś w przypadku kiedy

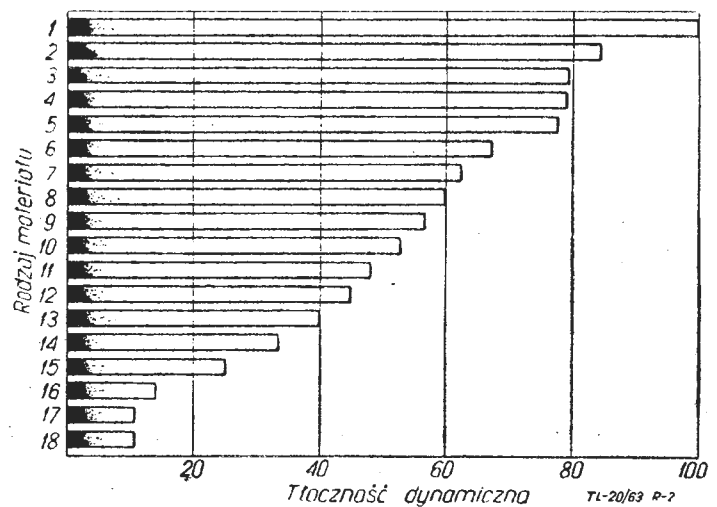
$$v_1 \geq v_u = \int_0^{\epsilon_u} \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\sigma}{d\epsilon}} \cdot d\epsilon \quad [3]$$

nastąpi zerwanie próbki. Prędkości te zależne są od rodzaju materiału i według badań D. S. Clarka i D. S. Wooda zawierają się w granicach 30÷100 m/sek.

2. Tłoczność dynamiczna niektórych metali

Przeprowadzone badania próbne [6, 7, 19] nad określeniem tłoczności dynamicznej niektórych metali i stopów przez firmy du Pont de Nemours and Co oraz Rocketdyne Div. North American Aviation wskazują na potencjalną możliwość praktycznego zastosowania metod dynamicznych do tłoczenia elementów z blach. Przy badaniu tłoczności dynamicznej oparto się na określaniu tłoczności blach metodą Erichsena z tym, że quasistatyczny nacisk tłoczka kształtującego zastąpiono naciskiem ciśnienia fali uderzeniowej, otrzymanej przez wybuch ładunku w wodzie. Do każdej próby używano jednakowych ładunków odpalanych z tej samej odległości. Na próbki używano blachę o grubości 0,8 mm w postaci krążków o średnicy kilkudziesięciu mm. Wszystkie próbki, z wyjątkiem specjalnie zaznaczonych na rysunku, były wyżarzane, sprawdzano również ich własności wytrzymałościowe i strukturę. Wyniki prób, określające względną tłoczność dynamiczną, zestawione są w postaci wykresu na rys. 2.

Dalsze doświadczenia Rocketdyne, uwzględniające wpływ średnicy wytłoczki 2R (średnicy niepodpartej części blachy), ciężar ładunku ω w gramach, granicę plastyczności materiału Q_c , grubość blachy g w calach, odległość h ładunku od blachy w calach, wykazują, że



Rys. 2. Porównanie względnej tłoczności dynamicznej niektórych metali i stopów: 1 — aluminium 1100-0 (całkowicie wyżarzane), 2 — tantal, 3 — miedź, 4 — stal SAE 101, 5 — stop aluminiowy 6061-76 (zahartowany na roztwór stały i sztucznie starzony), 6 — stal nierdzewna 20CB, 7 — stop „Vascojet” 100, 8 — Inconel X, 9 — stal nierdzewna 347, 10 — stal nierdzewna 321, 11 — stop „Redé” 41, 12 — stop Ni-Mo-Fe (kwasoodporny), 13 — stop HP 15-7 MO, 14 — stal SAE 4130, 15 — tytan B 120 VCA, 16 — stop 6 Al-AV na osnowie tytanu, 17 — stop magnezu AZ 31 B, 18 — stal nierdzewna 301 (utwardzona). Oznaczenia wg SAE

łoczność metali o podobnej budowie kryształów, określonej przez głębokość tłoczenia H , może być określona z prostej zależności empirycznej:

$$\left(\frac{H}{R}\right)^2 = 0,4 \frac{\omega}{Q_r \cdot g \cdot h^2} \quad [4]$$

3. Systematyka metod dynamicznego kształtowania

Metody kształtowania dynamicznego usystematyzowano, biorąc jako podstawę rodzaj źródła energii, z którego można otrzymać impulsy ciśnienia wykorzystywane do kształtowania metali. Uzasadnienie wyboru podstawy klasyfikacji wynika również i z tego, że przy różnych źródłach impulsów energii wymagane są odmienne wyposażenia stanowisk roboczych, a nawet różne możliwości ich zastosowania. Do kształtowania dynamicznego jest stosowana:

- 1) energia reakcji chemicznych,
- 2) energia prężności sprężonych lub skroplonych gazów,
- 3) energia elektryczna.

Źródła te zdolne są do wytwarzania impulsów ciśnieniowych o bardzo różnej intensywności, począwszy od bardzo silnych impulsów otrzymywanych z materiałów wybuchowych, kruszących, a skończywszy na skroplonych czy też sprężonych gazach, dających impulsy stosunkowo słabe. Przykładowe dane porównawcze prędkości i mocy niektórych z tych źródeł energii z tradycyjnymi metodami obróbki na młocie i prasie podane są w tab. 1 [9].

Tabela

Porównanie mocy osiąganych w różnych metodach obróbki plastycznej

Ładunek		Czas (sek)	Moc (kGm/sek) × 10 ⁶
Rodzaj	Ilość		
Materiał wybuchowy kruszący RDX	0,12 kG	2,5 × 10 ⁻⁵	600 000
Wyładowania iskrowe w cieczy	150 000 J	4 × 10 ⁻⁴	38,7
Młot napędzany sprężonym gazem	50 000 kGm 30,7 m/sek, 25,4 mm *)	8 × 10 ⁻⁴	19,3
Młot spadowy	4,7 m/sek, 25,4 mm *)	5,6 × 10 ⁻³	2,76
Prasa	660 T 2 m/sek, 25,4 mm *)	0,75	0,002

*) skok

Wyodrębniło się ponadto kilka metod różniących się między sobą czy to prędkością wyzwiania energii reakcji chemicznej, czy też sposobem przekształcania energii elektrycznej na energię mechaniczną. Pełna systematyka tych metod obejmuje:

- 1.1. Kształtowanie za pomocą materiałów wybuchowych kruszących.
- 1.2. Kształtowanie za pomocą materiałów wybuchowych młotających.
- 1.3. Kształtowanie za pomocą szybkiego spalania wybuchowej mieszanki gazowej.
2. Kształtowanie za pomocą sprężonych lub skroplonych gazów.
- 3.1. Kształtowanie za pomocą wyładowań elektrycznych w wodzie.
- 3.2. Kształtowanie za pomocą ciśnienia pola magnetycznego.

4. Możliwości obróbcze za pomocą dynamicznych metod kształtowania

Zastosowanie w przemyśle metod dynamicznego kształtowania wynikało z konieczności przeróbki plastycznej (głównie tłoczenia) części, wykonanych z materiałów o wysokich własnościach wytrzymałościowych: stali nierdzewnych i żaroodpornych, stopów tytanu, stopów aluminiowych i innych materiałów trudnoobrabialnych pla-

stycznie. Tłoczenie tych stopów metodami klasycznymi jest bardzo kłopotliwe i pracochłonne. Wymaga bowiem wielokrotnego wyżarzania międzyoperacyjnego. Przy zastosowaniu kształtowania dynamicznego, części z tych stopów wykonywane są na gotowo, nawet w jednej operacji.

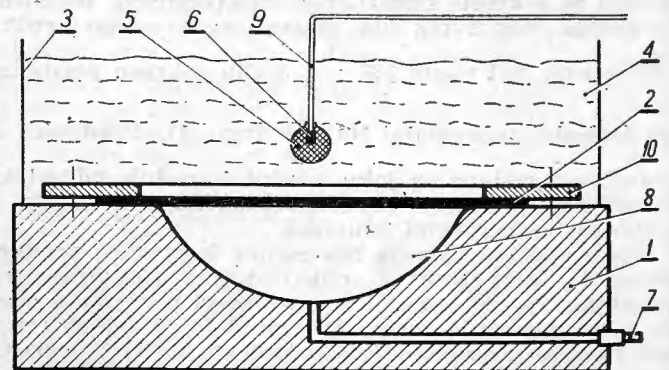
Drugim czynnikiem decydującym o zastosowaniu tych metod jest możliwość tłoczenia w prosty sposób i tanio części o dużych wymiarach lub skomplikowanych kształtach, których wykonanie metodami klasycznymi niekiedy jest wprost niemożliwe. Średnica kształtowanych przedmiotów wahała się w granicach 25÷12 000 mm [6], grubość kształtowanych blach wynosiła od 0,05 mm dla części wykonywanych ze stali nierdzewnych do 76 mm dla części wykonywanych ze stopów aluminiowych. Dokładności uzyskiwane tymi metodami zwykle wynoszą ± 0,8 mm, można je jednak podwyższyć nawet do ± 0,025 mm [7], przez wprowadzenie dodatkowych operacji dynamicznego dotłaczania w matrycach o wyższej sztywności. Wysokie dokładności tłoczenia są możliwe do uzyskania dzięki zmniejszonemu sprężynowaniu materiału. Na dokładność wpływa również odkształcanie się samej matrycy w procesie tłoczenia. Tolerancja grubości ścianki przy grubości blachy (1,5—2,3) ± 0,013 wynosiła po kształtowaniu ± 0,1 mm [20].

Obok różnych operacji tłoczenia, rozciągania i obciągania na zimno i gorąco, można za pomocą tych metod wykonywać wiele innych operacji takich, jak dotłaczanie, prostowanie blach, utwardzanie powierzchniowe zgniotem, zgrzewanie, grawerowanie, kucie, prasowanie proszków i inne.

5. Dynamiczne kształtowanie za pomocą materiałów wybuchowych, kruszących

Istota dynamicznego kształtowania materiałami wybuchowymi kruszącymi polega na wykorzystaniu energii fali uderzeniowej, powstającej podczas wybuchu, do wykonania pracy kształtowania przedmiotów obrabianych. Podstawowy schemat procesu pokazany jest na rys. 3. Proces zapoczątkowuje detonacja materiału wybuchowego 5 (rys. 3), umieszczonego nad przedmiotem obrabianym 2 w ośrodku pośredniczącym 4, którym może być powietrze, ciecz lub materiały sypkie. Podczas detonacji materiału wybuchowego powstaje w otaczającym ośrodku ścisnąca fala uderzeniowa, której kształt zależy od kształtu ładunku wybuchowego. Ciśnienie na czole tej fali może sięgać 200 000 kG/cm² [10]. Prędkość przemieszczania się czoła fali, zależna od rodzaju stanu fizycznego ośrodka, jest równa lub nawet przekracza prędkość rozchodzenia się dźwięku w danym ośrodku.

Powstały po detonacji materiałów wybuchowych pęcherz gazowy, bez względu na bardzo wysokie ciśnienie wewnętrzne, rozprzestrzenia się z prędkością znacznie mniejszą, tak że na przedmiot obrabiany działa najpierw impuls wywołany falą uderzeniową, a następnie, znacznie później, impuls wywołany falą wtórną ciśnienia od rozszerzającego się pęcherza gazowego. Ciśnienie maksymalne fali wtórnej nie przekracza 20% ciśnienia



Rys. 3. Schemat urządzenia do kształtowania za pomocą materiałów wybuchowych, kruszących. Oznaczenia: 1 — matryca, 2 — przedmiot obrabiany, 3 — zbiornik, 4 — ośrodek pośredniczący (woda), 5 — materiał wybuchowy, 6 — detonator, 7 — przewód odpowietrzający, 8 — przestrzeń odpowietrzona, 9 — przewód od inicjatora, 10 — pierścień dociskający

fali uderzeniowej [12], lecz czas jej działania na przedmiot obrabiany jest znacznie dłuższy od czasu działania fali uderzeniowej.

Czoło fali uderzeniowej dobiega do powierzchni przedmiotu obrabianego z prędkością przekraczającą prędkość

R. H. Cole ustalił doświadczalnie zależności między ciśnieniem maksymalnym a rodzajem oraz postacią ładunku i odległością od punktu wybuchu:

$$p_{max} = k \left(\frac{\omega^{\frac{1}{2}}}{h} \right)^{\alpha} \quad [5]$$

Spośród przedstawianych metod dynamicznego kształtowania, kształtowanie za pomocą materiałów wybuchowych kruszących dysponuje najwyższymi ciśnieniami, jakie można uzyskiwać. W dynamicznych metodach kształtowania bardzo ważną — jeśli nie zasadniczą — rolę odgrywa jednak impuls ciśnienia $I = \int p(t)dt$, który według R. H. Cole dla wybuchów materiałów kruszących pod wodą wynosi:

$$I = l \cdot \omega^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\omega^{\frac{1}{3}}}{h} \right)^{\beta} \quad [6]$$

oraz gęstość energii w chwili zbliżenia się fali uderzeniowej do przedmiotu obrabianego

$$q = m \cdot \omega^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{\omega^{\frac{1}{3}}}{h} \right)^{\gamma} \quad [7]$$

gdzie ω — ciężar ładunku,

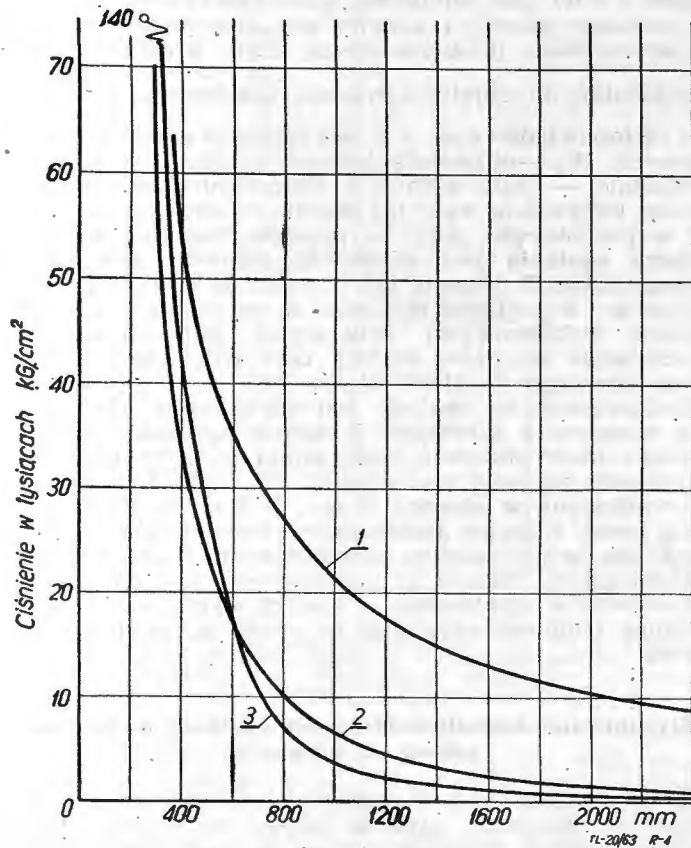
h — odległość ładunku od przedmiotu obrabianego,

$\alpha, \beta, \gamma, k, l, m$ — stałe zależne od materiału wybuchowego.

Szczególnie ważna jest ilość energii, jaką zdolny jest przejąć przedmiot obrabiany od fali uderzeniowej w momencie odbicia się jej od jego powierzchni. Stąd też przyjmuje się nazwa tych metod jako „metod energetycznych”.

W zastosowaniach praktycznych, szczególnie przy kształtowaniu większych przedmiotów, wymagających silniejszych ładunków, zamiast umieszczać zbiornik nad matrycą, zanurza się matrycę wraz z dociśniętą do niej blachą w zbiorniku z wodą. W ten sposób zmniejsza się w pewnym stopniu niszczące działanie ciśnienia fali uderzeniowej na zbiornik. Stanowisko takie widoczne jest na rys. 5 [24].

Możliwości obróbcze metody dynamicznego kształtowania materiałami wybuchowymi kruszącymi są różnorodne. Najszerze zastosowanie znalazła ta metoda w tłoczeniu elementów z blach w postaci czasz lub o kształ-



Rys. 4. Spadek ciśnienia na czole fali uderzeniowej (w zależności od odległości) dla ładunków o różnych kształtach: 1 — ładunek w postaci arkusza (płyty), 2 — ładunek o kształcie walcowym, 3 — ładunek o kształcie kulistym

dźwięku (w wodzie rzędu 1500 m/sek) i odbija się od jego powierzchni, oddając przy tym część energii obrabianemu materiałowi. Materiał, przejmując energię fali uderzeniowej, nabiera bardzo dużego przyspieszenia początkowego i zaczyna płynąć w kierunku nadanym przez falę uderzeniową, uzyskując stosunkowo dużą prędkość płynięcia. W procesie płynięcia materiał przyjmuje postać określoną przez wgiębnienie w matrycy (1, rys. 3). Aby uniknąć tworzenia się poduszki sprężonego powietrza w przestrzeni między materiałem a wyłobieniem w matrycy (8, rys. 4) należy wypompować powietrze z tej przestrzeni. „Próżnia” ta jest konieczna szczególnie przy kształtowaniu cienkich blach. Wielkość stosowanych podciśnień dochodzi nawet do 0,1 mm słupa rtęci [13].

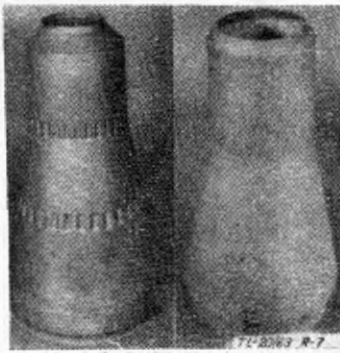
Ciśnienie na czole fali uderzeniowej zmniejsza się w miarę rozprzestrzeniania się fali. Wielkość jego jest zależna nie tylko od wielkości ładunku, ale również od środka przenoszącego, od odległości, od punktu detonacji, jak również od rodzaju i kształtu materiału wybuchowego, który decyduje z kolei o kształcie fali uderzeniowej. Zależność ciśnienia na czole fali od odległości od punktu detonacji ma postać wykładniczą. Na tę wielkość duży wpływ wywiera ściśliwość ośrodka, a mianowicie — im ośrodek jest mniej ściśliwy, tym ciśnienie utrzymuje się wyższe.

Dla ładunków o kształcie kulistym (i zbliżonych), dających również kulisty kształt fali uderzeniowej, spadek ciśnienia przy detonacji w wodzie jest odwrotnie proporcjonalny do sześciątku odległości, zaś przy ładunkach cylindrycznych (sznurowych), dających cylindryczny kształt fali, spadek ten, przy detonacji w tym samym ośrodku, jest odwrotnie proporcjonalny do kwadratu odległości, natomiast przy ładunkach w postaci arkusza (płyty), dających płaską falę uderzeniową, spadek ciśnienia jest odwrotnie proporcjonalny do odległości od ładunku. Pomiarzy doświadczalne [15], zestawione na rys. 4, potwierdzają tę zależność.

Rys. 5. Stanowisko do kształtowania dynamicznego materiałem wybuchowym kruszącym oraz typowe części wykonane z materiałów trudnoobrabialnych plastycznie



Rys. 6. Część kształtowana za pomocą materiałów wybuchowych kruszących, wykonana ze stali nierdzewnej 20CB (wg SAE) o grubości 2,92 mm. Półfabrykat posiadał kształt dwóch stożków zespalanych mniejszymi podstawami



Rys. 7. Części kształtowane za pomocą materiałów wybuchowych kruszących. Z lewej osłona wykonana ze stali nierdzewnej 321, o wymiarach \varnothing 280 w szerszym końcu i \varnothing 152 w węższym, długości 508 mm i grubości ścianki 0,75 mm. Z prawej podobna osłona wykonana ze stopu René 41

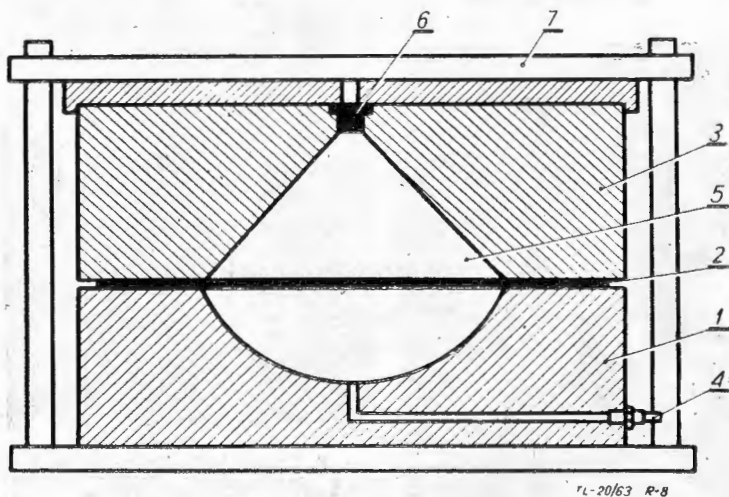
tach zbliżonych do czas, oraz części o kształtach bardziej złożonych (rys. 6). W ten sposób również można wykonywać cienkościennie części obrotowe przez rozłaczanie, przy czym materiałem wyjściowym mogą być rury bez szwu lub też rury lub stożki ścięte, zwiwane i spawane wzdłużnie, jak również różne ich kombinacje łączone poprzecznie szwem spawanym. Szwy poprzeczne i podłużne zupełnie dobrze wytrzymują kształtowanie nawet przy wywijaniu kołnierza. Typowe części pokazano na rys. 5. Istnieje możliwość równoczesnego kształtowania występów na powierzchni. Przykładem może być osłona komory spalania silnika odrzutowego (rys. 7), wykonana ze stali nierdzewnej, która przy klasycznej obróbce wykonywana była z 128 części.

Poza tym można tą metodą prostować blachy stosując ładunki w postaci arkuszy, odpalonych po przyłożeniu do blachy leżącej na płycie. W podobny sposób wykonuje się operacje utwardzania powierzchniowego zgniotem, zgrzewanie i grawerowanie. Przy zastosowaniu omawianej metody doskonale prasują się proszki, na przykład z węglików i tlenków metali.

6. Dynamiczne kształtowanie z zastosowaniem materiałów wybuchowych miotających

Istota kształtowania materiałami wybuchowymi miotającymi polega na wykorzystaniu energii sprężonych gazów powstałych przy ich spalaniu w ograniczonej objętości i w bezpośredniej lub pośredniej styczności z przedmiotem obrabianym. Schemat układu realizującego ten proces pokazany jest na rys. 8. Palący się z prędkością rzędu kilkuset m/sek materiał wybuchowy 6 wytwarza w komorze spalania 5 impuls ciśnienia gazów tworzących się przy spalaniu, który działa bezpośrednio lub pośrednio (przez warstwę cieczy) na materiał obrabiany, tłocząc go według kształtu matrycy. Dla ułatwienia tłoczenia i w celu uzyskania większej dokładności przedmiotów obrabianych przestrzeń między matrycą a przedmiotem obrabianym należy odwietrzyć.

Uzyskiwane ciśnienia maksymalne przy tłoczeniu tą metodą określić można z uproszczonego równania van



Rys. 8. Schemat urządzenia do kształtowania za pomocą materiału wybuchowego, miotającego. Oznaczenia: 1 — matryca, 2 — blacha, 3 — pokrywa, 4 — doprowadzenie gazu obojętnego, 5 — urządzenie zapłonowe, 6 — doprowadzenie O_2 , 7 — doprowadzenie H_2 , 8 — komora spalania, 9 — przedmiot obrabiany, 10 — uszczelki, 11 — przestrzeń odwietrzona, 12 — przewód do pompy próżniowej

der Waalsa, które pokrywa się z doświadczalnym wzorem Abla i Noble'a:

$$p_{max} = \frac{\omega RT}{W_o - a\omega} = \frac{f \Delta}{1 - a\Delta} \quad [8]$$

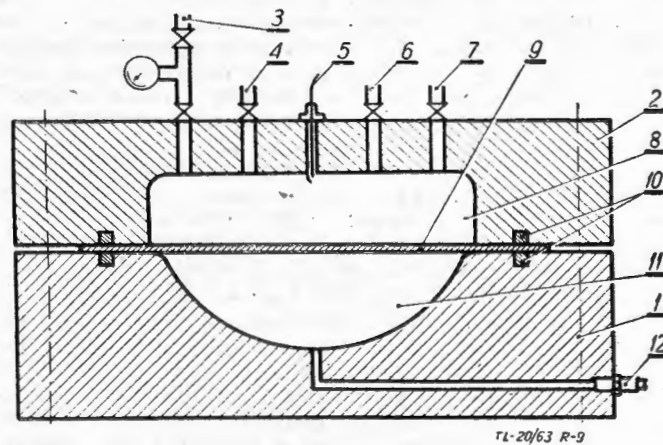
gdzie: $f = RT$ jest wielkością charakteryzującą materiał wybuchowy (proch) i nazywa się „siłą prochu”, a jest współobjętością (kowolumenem), czyli wielkością proporcjonalną do objętości własnej cząsteczek, $\Delta = \frac{\omega}{W_o}$

jest gęstością ładowania, a ω jest ciężarem gazów powybuchowych, W_o — objętością komory spalania. R i T odpowiednio — stała gazowa i temperatura bezwzględna gazów. Oczywiście wzór [8] określa ciśnienie maksymalne w przybliżeniu, gdyż w procesie tłoczenia objętość komory spalania jest wielkością zmienną, zależną od samego ciśnienia i czasu, jak również od materiału przetwarzanego. Narastanie ciśnienia w porównaniu z materiałami wybuchowymi kruszącymi jest łagodniejsze i utrzymuje się przez dłuższy czas, przy czym maksimum jego sięga do 21 000 kG/cm² [8].

Zastosowanie tej metody jest ograniczone koniecznością stosowania zamkniętych komór spalania. Komora spalania może stanowić część samej matrycy przy wykonywaniu operacji rozłaczania, lub może być specjalnie wydrążona w głowicy (3 rys. 8) dla operacji tłoczenia z blach. Głowicę można zaprojektować jako uniwersalną dla grupy matryc przystosowanych do tłoczenia dynamicznego. Metoda ta przeznaczona jest głównie do kształtowania przedmiotów o małych wymiarach i z materiałów trudnoobrabialnych — nawet w produkcji seryjnej.

7. Dynamiczne kształtowanie przez spalanie wybuchowej mieszanki gazowej

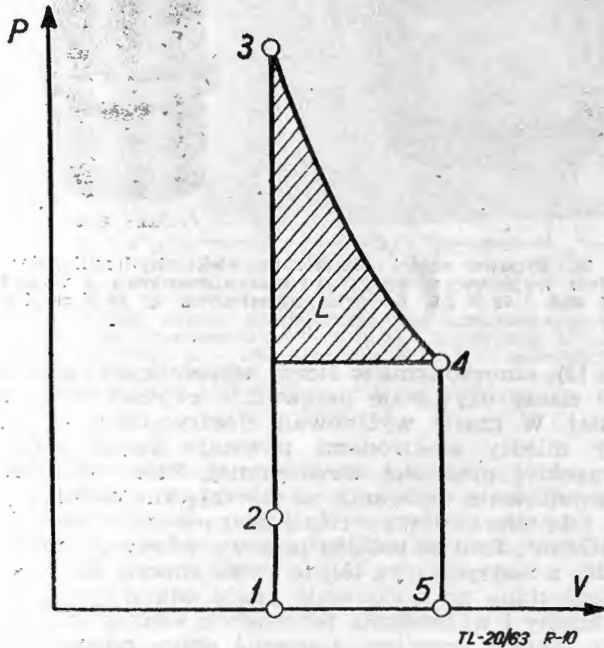
Istota kształtowania dynamicznego przez spalanie wybuchowej mieszanki gazowej polega na wykorzystaniu impulsu energii, wywiązującej się w czasie gwałtownego spalania niektórych mieszanek gazowych, a przejawiającego się w postaci gwałtownego wzrostu prędkości, przy czym spalanie odbywa się w zamkniętej komorze w bezpośredniej styczności z kształtowanym przedmiotem. Schemat stanowiska do tego procesu pokazany jest na rys. 9. Sam proces kształtowania polega na doprowadze-



Rys. 9. Schemat urządzenia do kształtowania przez spalanie wybuchowej mieszanki gazowej. Oznaczenia: 1 — matryca, 2 — głowica, 3 — odprowadzenie gazów, 4 — doprowadzenie gazu obojętnego, 5 — urządzenie zapłonowe, 6 — doprowadzenie O_2 , 7 — doprowadzenie H_2 , 8 — komora spalania, 9 — przedmiot obrabiany, 10 — uszczelki, 11 — przestrzeń odwietrzona, 12 — przewód do pompy próżniowej

niu pod ciśnieniem składników mieszanki wybuchowej i gazów obojętnych, każde z oddzielnych zasobników, do komory spalania 8, zapaleniu mieszanki i wyzwoleniu w ten sposób jej energii wewnętrznej. Pod działaniem energii sprężonej mieszaniny gazów następuje odkształcenie przedmiotu obrabianego 9, który przyjmuje postać określoną zarysem wydrążenia matrycy. Przestrzeń 11 winna być „próżnią”. Utrzymanie podciśnienia ułatwiają zastosowane uszczelki 10. Podobne uszczelki znajdują się

na połączeniu głowicy z materiałem tłoczonym, zapobiegając zbędnemu wypływowi produktów spalania. Komorę spalania stanowić może część matrycy, gdy materia-



Rys. 10. Schemat zmiany ciśnienia przy tłoczeniu wybuchową mieszanek gazowych w układzie $p(v)$: 1—2—napełnianie, 2—3—spalanie izochoryczne, 3—4—rozprężanie politropowe, 4—5—odprowadzenie gazów, L—praca tłoczenia

łem wyjściowym jest rura walcowa lub stożkowa, lub specjalne wydrążenie w głowicy. Głowicę tę można zaprojektować jako uniwersalną przystawkę dla grupy matryc przystosowanych do tłoczenia dynamicznego.

Należy przy tym tak dobrać zapłon mieszanki, aby otrzymać bardzo szybkie spalanie się jej, a nie detonację, ponieważ przy szybkim spalaniu otrzymujemy bardziej równomierny rozkład ciśnienia sprężonych gazów. Dobre wyniki uzyskiwano [21] przy zastosowaniu, jako inicjatora żarzącego się drucika, świecy iskrowej lub specjalnego zapalnika. W porównaniu z materiałami wybuchowymi, kruszącymi i miotającymi, wybuchowe mieszanki gazowe pozwalają na uzyskiwanie znacznie łagodniejszych impulsów energii. Uzyskane ciśnienie maksymalne utrzymuje się stosunkowo długo i może być łatwo mierzone i dobierane, zależnie od warunków kształtowania. Dokonuje się tego przez kontrolę napełnienia komory spalania, zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym.

W przypadku równomiernego spalania przebieg tego procesu we współrzędnych $P-v$ pokazany jest na rys. 10. Uzyskiwane ciśnienie maksymalne można obliczyć z równania izochory:

$$p_{max} = p_3 = \frac{p_2}{T_2} T_3 \quad [9]$$

i równania na przyrost temperatury ($T_3 - T_2$) pod wpływem ciepła spalania mieszanki wybuchowej Q :

$$Q = cv M (T_3 - T_2) \quad [10]$$

gdzie cv jest ciepłem właściwym mieszaniny gazów w komorze spalania, zaś M ich łączną masę. Zakresowane pole wykresu pod krzywą politropy obrazuje energię zużytą na kształtowanie przedmiotu obrabianego. Dużą rolę w regulacji procesu spalania spełnia ciśnienie gazu obojętnego — azotu, helu, argonu lub dwutlenku węgla. Przy tym mieszanka gazowa stanowi idealną postać ładunku, wszędzie dostępną, pozwalającą na szybkie napełnianie komory spalania.

W badaniach, przeprowadzanych w Boeing, używano jako mieszanki wybuchowej mieszaniny wodoru i tlenu [21 i 22]. Doświadczenia przeprowadzane były przy objętościach ładowania w granicach $0,007 \div 2 \text{ m}^3$. Stosowane ciśnienia wstępne wynosiły $1 \div 14$ atmosfer.

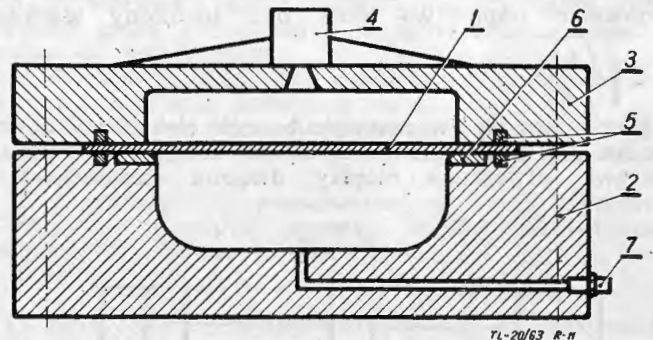
Metoda ta może znaleźć zastosowanie do wykonywania cienkościennych części przez tłoczenie (rys. 9) i rozciąganie z metali trudnoobrabialnych.

8. Dynamiczne kształtowanie za pomocą sprężonych lub skroplonych gazów

Istota procesu kształtowania za pomocą gazów skroplonych polega na tym, że potrzebny impuls ciśnienia uzyskuje się w wyniku szybkiego przejścia gazu ze stanu ciekłego w stan gazowy. Otrzymywany w ten sposób impuls należy do słabszych impulsów, stosowanych do dynamicznego kształtowania.

Schemat urządzenia stosowanego do realizacji tego procesu (rys. 11) jest bardzo prosty. Wymaga tylko matrycy, wykonanej z łatwoobrabialnego tworzywa (cementu, gipsu, drewna) o krawędzi wzmocnionej za pomocą stalowego pierścienia, oraz głowicy ciśnieniowej, którą dociskamy blachą do matrycy i mocujemy za pomocą zamków szybkoomocujących. Głowica ciśnieniowa wyposażona jest w urządzenie dozujące i rozpylające skroploną substancję. Jako substancję szybko odparowującą używano [25] skroplony azot.

Przejście azotu ze stanu ciekłego w stan gazowy w temperaturze pokojowej następuje momentalnie i jeśli odbywać się to będzie w zamkniętej komorze, to powstanie impuls ciśnienia, który wykona pracę odkształcania blachy według zadanych kształtów matrycy. Wielkość tego ciśnienia zależy od wypełnienia komory głowicy ciśnieniowej, wyrażającego się stosunkiem objętości ciekłego gazu do objętości komory. Zależność ta jest liniowa. Po wykonaniu pracy tłoczenia ciśnienie w komorze obniża się wskutek wypływu gazu z komory przez zawór wylotowy, a głowicę odłącza się od matrycy. W metodzie tej parujący azot działa bezpośrednio na przedmiot obrabiany, bez jakiegokolwiek ogniwa pośredniczącego. Przeprowadzone doświadczenia [25] wykazały, że uszczelnienie między przedmiotem obrabianym a głowicą ciśnieniową nie ma dużego znaczenia, gdyż wypływ gazu przez szczeliny między nimi jest nie-



Rys. 11. Schemat urządzenia do tłoczenia skroplonym gazem. Oznaczenia: 1 — półfabrykat, 2 — matryca, 3 — głowica, 4 — urządzenie doprowadzające, dozujące i rozpylające gaz, 5 — uszczelnienia, 6 — pierścień wzmocniający krawędzie matrycy, 7 — odpowietrzenie przestrzeni między materiałami obrabianymi a matrycą

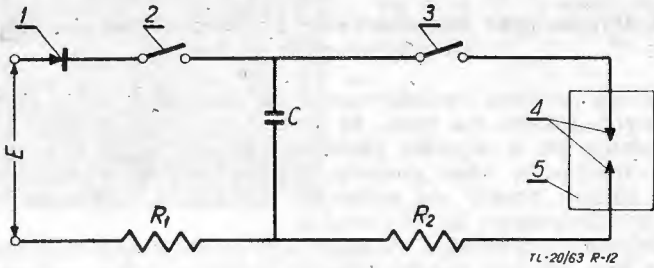
znaczny w porównaniu z prędkością narastania ciśnienia.

Metoda ta, ze względu na stosunkowo duże bezpieczeństwo pracy, może znaleźć zastosowanie przy wykonywaniu dużych części tłoczonych z blach, pojedynczo i w seriach prototypowych, gdyż oprzyrządowanie, jak i całe wyposażenie jest proste i tanie.

9. Dynamiczne kształtowanie za pomocą wyładowań elektrycznych w wodzie — kształtowanie elektrohydrauliczne

Istota kształtowania elektrohydraulicznego polega na wykorzystaniu impulsów ciśnienia hydrodynamicznego, powstającego podczas elektrycznych wyładowań iskrowych w cieczy, do wykonania pracy odkształcania metali w procesie tłoczenia. Postać tych impulsów zależy głównie od postaci impulsów prądu i w pewnych warunkach przybiera charakter fali uderzeniowej. Wytwa-

rzanie impulsów wyładowań prądowych odbywa się za pomocą prostego układu elektrycznego (rys. 12), składającego się z dwóch obwodów, zasilającego i rozładowa-



Rys. 12. Schemat układu elektrycznego do wytwarzania wyładowań elektrycznych w cieczy. Oznaczenia: E — napięcie na zaciskach wzmacniacza, C — bateria kondensatorów, R_1 — oporności, 1 — prostownik, 2 — przełącznik wysokiego napięcia obwodu zasilającego, 3 — włącznik iskriernikowy lub ignitronowy, 4 — elektrody, 5 — zbiornik z cieczą

nia. Charakterystycznymi parametrami tego obwodu są: wysokie napięcie robocze rzędu kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu kilowoltów, potrzebne do przebicia odcinka iskrowego — i stosunkowo duża energia ($A = \frac{1}{2} CU^2$)

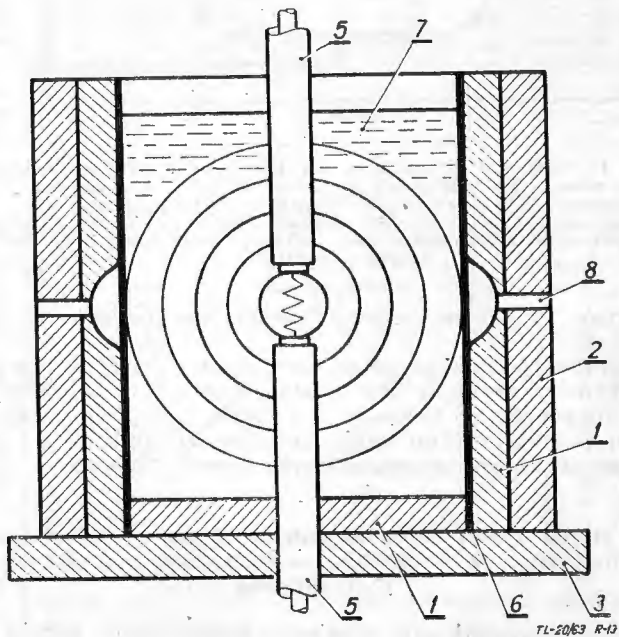
rzędu tysięcy, a nawet dziesiątek tysięcy dżuli, potrzebna do wytworzenia fali uderzeniowej o dużym natężeniu. Właściwy dobór tych parametrów decyduje o efekcie elektrohydraulicznego kształtowania.

Zasilanie może odbywać się z sieci 220 V przez wzmacniacz wysokiego napięcia, prostownik i opór R, ograniczający natężenie prądu. Po naładowaniu kondensatora C, wysokonapięciowy wyłącznik 2 (rys. 12) odłącza go od źródła zasilania.

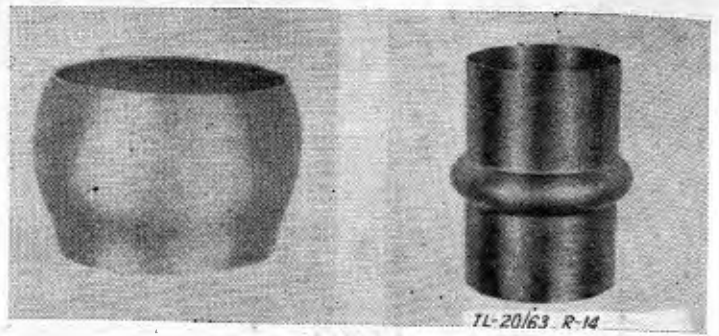
Obwód rozładowania zwierany jest za pomocą iskriernika lub lampy ignitronowej. Obwód ten winna cechować duża prędkość rozładowania w postaci krótkotrwałego impulsu. Największy wpływ na prędkość wywiera indukcyjność obwodu rozładowania. Aby otrzymać wyładowanie impulsowe musi być spełniony warunek

$$R < \sqrt{\frac{4L}{C}}$$

Elementem przetwarzającym energię elektryczną obwodu na energię mechaniczną ciśnienia fali jest przerwa iskrowa utworzona między dwiema elektrodami 4



Rys. 13. Schemat urządzenia do kształtowania elektrohydraulicznego. Oznaczenia: 1 — matryca dwudzielna, 2 — obejma matrycy, 3 — płyta z pleksiglasu, 4 — uszczelka z teflonu, 5 — elektrody, 6 — przedmiot obrabiany, 7 — ciecz pośrednicząca, 8 — odpowietrzenie



Rys. 14. Typowe części rozciągane elektrohydraulicznie; materiałem wyjściowym były: a) rurka aluminiowa o wymiarach $\varnothing 62,5 \times 50 \times 1,5$, b) rurka aluminiowa $\varnothing 31 \times 50 \times 0,9$

(rys. 12), zanurzonymi w cieczy wypełniającej zbiornik 5. Jako cieczy używa się przeważnie zwykłej wody technicznej. W czasie wyładowań elektrycznych w postaci iskry między elektrodami powstaje kanał plazmowy o wysokiej prędkości wewnętrznej, który rozszerzając się gwałtownie wytwarza w otaczającym ośrodku ciekłym falę uderzeniową z ciśnieniem na czole rzędu tysięcy kG/cm^2 . Jeśli w pobliżu przerwy iskrowej umieścimy blachę z matrycą (rys. 13), to część energii fali zostanie wykorzystana na wykonanie pracy odkształcania arkusza blachy i wyłoczenia przedmiotu według zarysu matrycy. Należy przedtem zapewnić dobre odpowietrzenie przestrzeni między blachą a wyżłobieniem matrycy, aby zapobiec tworzeniu się poduszki sprężonego powietrza, uniemożliwiającej otrzymanie prawidłowego kształtu i założonych wymiarów przedmiotu.

Stosowane parametry układu elektrycznego w różnych ośrodkach badawczych [30, 31 i 35] wskazują na to, że napięcie na zaciskach baterii kondensatorów winno wynosić 10–100 kV, zaś energia 1000–50 000 dżuli — w zależności od wielkości przedmiotu kształtowanego, grubości jego ścianki i rodzaju materiału. Wysokie napięcia konieczne są ze względu na potrzebę gwałtownego przebicia przerwy iskrowej, wypełnionej wodą. Obniżenie tego napięcia można uzyskać przez połączenie elektrod przewodem, który inicjuje przepływ prądu, a sam topi się i wyparowuje, tworząc początkowy kanał plazmowy w kształcie cylindra. Dalej zjawisko przebiega podobnie jak bez stosowania przewodu inicjującego.

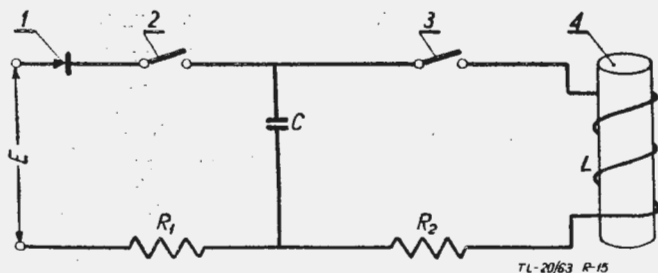
Badania wykazują, że przy zastosowaniu przewodu inicjującego wystarcza napięcie rzędu 5 kV. Drugą zaletą stosowania przewodu inicjującego jest możliwość uzyskania fali uderzeniowej o różnej postaci, zależnie od kształtu przedmiotu tłoczonego, przez wygięcie go do odpowiedniego kształtu. Natomiast wadą jest konieczność każdorazowego zakładania przewodu między elektrody. Metoda kształtowania elektrohydraulicznego może znaleźć zastosowanie przy wykonywaniu przedmiotów o niewielkich wymiarach z blach i rur przez tłoczenie i rozciąganie, do wykonywania operacji dotłaczania, jak również operacji utwardzania powierzchniowego zgniotem powierzchni płaskich, walcowych zewnętrznych, jak i wewnętrznych. Na rys. 14 pokazane są przedmioty rozciągane, wykonane tą metodą.

10. Dynamiczne kształtowanie polem magnetycznym — kształtowanie magnetyczne

Istota kształtowania dynamicznego polem magnetycznym, nazywanego krótko kształtowaniem magnetycznym, polega na wykorzystaniu ciśnienia skoncentrowanego impulsu pola magnetycznego do wykonania pracy odkształcania. Silny impuls pola magnetycznego uzyskuje się w wyniku krótkotrwałego przepływu silnego impulsu prądu elektrycznego przez zwojnicę roboczą. Impuls ten winna cechować duża energia potencjalna i odpowiednia postać (kształt). Te dwie cechy uzyskuje się przez zastosowanie układu elektrycznego (rys. 15), w którym istnieją dwa, bezpośrednio ze sobą związane obwody: obwód zasilający i obwód rozładowania, kształtujące impuls prądu i impuls pola magnetycznego.

Układ może być zasilany z sieci 220 V prądu zmiennego przez wzmacniacz i prostownik o napięciu szczytowym rzędu 30 kV, zaś samo napięcie na zaciskach bate-

rii kondensatorów C, ze względu na wytrzymałość izolacji zwojniczy na przebicie, jest niższe i wynosi około 10 kV [37]. Po osiągnięciu tego potencjału na zacis-



Rys. 15. Schemat układu elektrycznego do kształtowania polem magnetycznym. Oznaczenia: E — napięcie ładowania, C — bateria kondensatorów, L — zwojnica robocza, R — oporności, 1 — prostownik, 2 — przełącznik wysokiego napięcia obwodu zasilającego, 3 — włącznik iskriernikowy lub ignitronowy, 4 — przedmiot obrabiany

kach kondensatora przerywa się ładowanie przez rozłączenie obwodu za pomocą przełącznika wysokiego napięcia (2, rys. 15). Ilość energii zgromadzonej w baterii kondensatorów, potrzebnej do kształtowania magnetycznego, zależna od pojemności i różnicy potencjałów baterii ($A = \frac{1}{2}CU^2$), jest rzędu kilku, a nawet kilkudziesięciu tysięcy dżuli. Energia ta zamieniana jest na energię pola magnetycznego, wytwarzanego przez zwojnicę roboczą L w czasie przepływu impulsu prądu rozładowania. Ilość energii, zawarta w obszarze D o indukcji pola B, określona jest wzorem:

$$A_c = \int (D) 10^{-7} \frac{B^2}{8\pi} dv \quad [11]$$

gdzie v jest objętością w cm^3 .

Powstaje w ten sposób impuls pola magnetycznego, którego indukcja, zależnie od parametrów, może dochodzić do 1 000 000 gausów. Pole o tej wielkości indukcji zdolne jest do wytworzenia ciśnienia do 35 000 kg/cm^2 [38]. Tak przekształconą energię pola magnetycznego wykorzystuje się do wykonywania różnych operacji kształtowania przedmiotów z rur i blach.

Głównym elementem kształtującym pole magnetyczne, a tym samym i rozkład ciśnienia wywieranego na przedmiot kształtowany, jest zwojnica. Kształt jej dobierany jest nie tylko zależnie od wielkości przedmiotu kształtowanego, ale też i od rodzaju wykonywanej operacji. Zasada kształtowania magnetycznego wykorzystuje fakt,

że wytworzone przez zwojnicę pole magnetyczne posiada największą indukcję wewnątrz zwojniczy. Ponieważ energia pola jest proporcjonalna do kwadratu indukcji, to największa koncentracja energii pola znajduje się w obszarze obejmowanym zwojnicą. Jeśli wewnątrz zwojniczy umieścimy rurę z materiału o cechach przewodnika (np. z metalu), to prądy wirowe, powstające na powierzchni tej rury podczas wyładowań, koncentrują pole magnetyczne w przestrzeni między zwojnicą a wstawioną rurą. Przy braku pola magnetycznego w przestrzeni wewnątrz cylindra, ciśnienie zewnętrzne — zależne od gęstości pola — obciska rurę. W czasie obciskania cylindra pole magnetyczne oddaje część swojej energii na wykonanie pracy odkształcenia. Ponieważ nie ma metali o idealnej przewodności w temperaturze pokojowej, ciśnienie magnetyczne nie może być utrzymane przez dłuższy okres czasu, gdyż linie pola przenikają przez metalową rurę z prędkością zależną od oporności właściwej danego materiału i po pewnym czasie ciśnienie zewnętrzne pola jest zrównoważone ciśnieniem pola, jakie zdążyło wytworzyć się wewnątrz rury, a siły działające na rurę redukują się do zera. Proces ten powoduje duże straty energii, która zamienia się w ciepło. W celu uzyskania większej efektywności procesu stosuje się krótkie impulsy, aby przenikanie pola w metal ograniczyć do cienkiej warstwy powierzchniowej. Dla praktycznych zastosowań długość impulsu w granicach 10–20 mikrosekund jest wystarczająca.

W celu uzyskania podwyższonego ciśnienia magnetycznego tylko w pewnych obszarach przedmiotu obrabianego, stosuje się różnego rodzaju proste w konstrukcji wkładki metalowe, służące do koncentracji energii magnetycznej i ciśnienia w wybranych obszarach (rys. 16).

Oczywiście różnorodność możliwości w konstrukcji samych zwojnic prowadzi do możliwości rozwiązywania procesu w różnych wariantach.

Kształtowanie magnetyczne, jako proces należący do grupy procesów dynamicznych, lecz o charakterze znacznie łagodniejszym niż kształtowanie materiałami wybuchowymi, może znaleźć zastosowanie przy wykonywaniu wielu operacji w sposób szybszy, prostszy, a niekiedy jedynie możliwy i ekonomiczny. Typowe operacje wykonywane przez kształtowanie magnetyczne sprowadzić można do trzech grup:

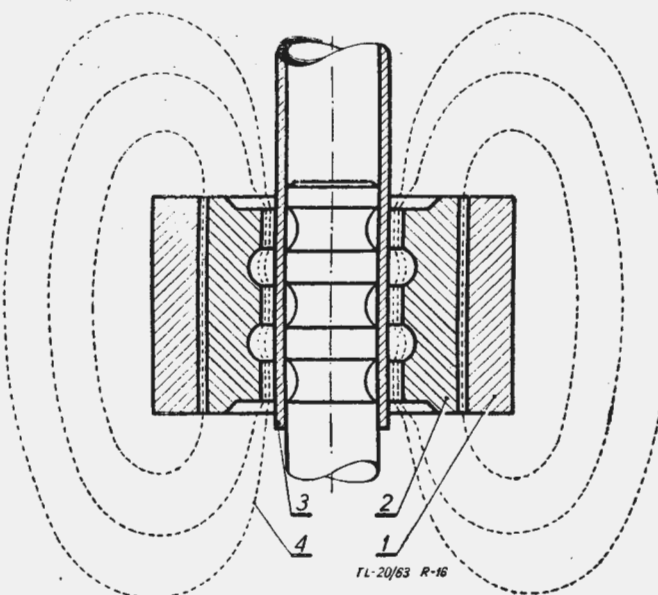
1. Kształtowanie różnych profili przez obciskanie — zwojnica obejmuje przedmiot obrabiany.
2. Rozszerzanie rur i kształtowanie lokalnych wypukłości — zwojnica umieszczona wewnątrz przedmiotu obrabianego.
3. Kształtowanie, prostowanie, cięcie i wycinanie z blach — zwojnica tarczowa (młotek magnetyczny) przylega do przedmiotu obrabianego.

11. Zalety i wady metod kształtowania dynamicznego

Przeprowadzone prace doświadczalne w zakresie przemysłowego zastosowania metod dynamicznego kształtowania pozwalają na zestawienie niektórych czynników, przemawiających za ich stosowaniem oraz czynników ograniczających ich stosowalność.

Do zalet procesu należy zaliczyć:

1. Możliwość obróbki plastycznej metali i stopów o wysokich własnościach wytrzymałościowych, trudnoobrabialnych, których nie można przerabiać plastycznie w sposób konwencjonalny.
2. Możliwość uzyskania większych wydłużeń pozwala na zmniejszenie ilości międzyoperacyjnych wyzarzeń.
3. Niewielka zmiana własności po obróbce pozwala na kształtowanie niektórych materiałów obrobionych cieplnie, bez wydatnej zmiany twardości.
4. Możliwość uzyskania za pomocą tych metod przedmiotów o większej dokładności wymiarów i kształtu w wyniku minimalnego sprężynowania materiału po obróbce.
5. Możliwość tłoczenia przedmiotów bez uszkodzeń powierzchniowych i bez lokalnych zmniejszeń grubości materiału jako wynik bardzo równomiernego rozłożenia nacisków na przedmiot obrabiany.
6. Możliwość kształtowania przedmiotów o bardzo dużych wymiarach.



Rys. 16. Schemat urządzenia do kształtowania magnetycznego. Oznaczenia: 1 — zwojnica robocza, 2 — wkładka skupiająca pole magnetyczne, 3 — przedmiot obrabiany, 4 — linie sił pola

7. Możliwość tłoczenia przedmiotów o kształtach, które trudno lub wprost niemożliwe jest otrzymać przy zastosowaniu tradycyjnych metod obróbki.

8. Stosunkowo proste oprzyrządowanie — wystarcza tylko matryca, gdyż rolę tłoczniaka spełnia ciśnienie ośrodka pośredniczącego.

9. Krótki impuls ciśnienia, który pozwala zastosować na matryce stopy niskotopliwe, żywice fenolowe i epoksydowe, żelazobeton, a nawet gips (do wykonywania pojedynczych części).

Z analizy tych czynników wynikają nie tylko nowe możliwości obróbki, ale również i korzyści ekonomiczne szczególnie przy wykonywaniu części pojedynczych i w małych seriach.

Do wad procesu należy zaliczyć:

1. Możliwość wykonywania tylko niektórych operacji kształtowania.

2. Przeznaczenie ich do wykonywania części pojedynczych lub w małych seriach (z wyjątkiem metod elektrycznych, które mogą być stosowane nawet w linii produkcyjnej).

3. Ostre warunki bezpieczeństwa pracy, wynikające z konieczności przechowywania i korzystania z materiałów wybuchowych, a także ze stosowania urządzeń pod wysokim napięciem.

Możliwości wykonawcze poszczególnych metod dynamicznego kształtowania wskazują na to, że nie zastąpią one klasycznych metod przeróbki plastycznej, lecz jedynie mogą stanowić ich uzupełnienie.

LITERATURA

1. „The mechanics of explosive forming”, Metalworking Production, 1960, vol. 104, nr 46, str. 75—77
2. W. S. Hollis — „The process of explosive forming of metal”, Aircraft Production, 1960, vol. 22, nr 12, str. 447—451
3. John S. Rinehart i Hohn Pearson — „Behavior of metals under impulsive loads”, Cleveland, Ohio, 1954. Przetłumaczone na język rosyjski i wydane pod tytułem „Powiedzenie metaliów pri impulsywnych nagruzkach”, Moskwa, 1958
4. T.A.B. „Explosive forming”, Aircraft Production, 1960, vol. 22, nr 2, str. 62—65
5. Stefan Mazurek — „Przeróbka plastyczna przy zastosowaniu wysokich energii dynamicznych wywołanych detonacją ładunków wybuchowych”, Przegląd Techniki Specjalnej, 1960, nr 11—12, str. 50—72
6. „High-energy-rate metalworking to day”, The Tool and Manufacturing Engineer, 1962, vol. 48, nr 1, str. 61—68
7. Vernon H. Monteil — „How to Design for Explosive Forming”, Metal Progress, August 1961, str. 60—70
8. C. P. Williams — „Evaluating explosive metal forming”, Journal of Metals, 1960, vol. 19, nr 1, str. 33—36
9. F. W. Boulger — „Metal Forming problems? try High-Energy-Rate techniques”, Mechanical Engineering, 1962, vol. 84, nr 4, str. 38—43
10. J. L. Remmerswaal, P. J. M. Boes — „Einige Möglichkeiten und Anwendungsarten der explosiven, Formgebaung”, Microtechnic, 1961, vol. 15, nr 3, str. 139—145
11. H. Thomas, S. Peterson — „Explosive in metalworking”, Metalworking Production, February 22, 1961, str. 47—50
12. Frank A. Watts, Dorsie C. Harleman — „Why form explosively?”, The Tool Engineer, 1960, vol. 44, nr 4, str. 109—112
13. „Forming Sheet Metal with Explosives” Machinery, 1959, vol. 95, December 16, str. 1287—1290
14. Robert A. Cooley — „The theory and practice of explosive metal forming” American Machinist, 1959, June 15, str. 127—130
15. George H. De Groat — „Explosive forming... the plane makers newest, hottest tool”, American Machinist, 1959, June 15, str. 131—134
16. Jacob Savitt — „Explosives form tubes with and without dies”, American Machinist, 1959, June 15, str. 131—134
17. John Pearson — „Metal working with explosives”, Journal of Metals, 1960, vol. 19, nr 9, str. 673—681
18. E. W. Feddersen — „High energy rate... its application to metal forming”, Journal of Metals, 1960, vol. 19, nr 9, str. 682—686
19. J. B. Ottestad — „The Possibilities of High Energy Rate Plastic Deformation”, Machinery, 1959, vol. 95, August 12, str. 228—230
20. T. C. Du Mond — „Forming Metals at High Velocities”, Metal Progress, November 1958, str. 68—76
21. John Miller, Philip Kruse — „Explosive Forming With Combustible Gas Mixtures”, Metal Progress, August 1961, str. 76—78
22. „Recent and advances in high-energy-rate forming”, Machinery (USA), 1961, vol. 68, nr 3, str. 132—135
23. „High-Energy-Rate Forming”, Aircraft Production, August 1962, str. 268—269
24. „Explosive forming”, Aircraft Production, 1960, vol. 22, nr 3, str. 82—85
25. A. P. Barsukow — „O wozmożnosti osuszczestwienija listowej wytiażki pri pomoszczii szizennogo gaza”, Kuzniecno Sztampowocznoje Proizwodstwo, 1959, nr 11, str. 23—24
26. „High-Energy-Rate Forming Machine”, Metal Treatment, August 1962
27. „Controlled impact forges metals at light speeds”, Product Engineering, 1962, March 5, str. 68—70
28. L. A. Jutkin — „Elektrograwliczeskij efekt”, Maszgin, Moskwa—Leningrad, 1955
29. H. J. Wagner, J. G. Dunleavy — „Hydropark forming... evolution of the process”, The Tool Engineer, 1960, vol. 44, nr 3, str. 83—86
30. L. W. Herchenroeder — „Elektrohydraulic forming”, Aircraft Production, 1960, vol. 22, nr 8, str. 302—303
31. Robert Felts — „Elektro-hydraulic metal forming”, SAE Journal, 1962, vol. 70, nr 2, str. 50—51
32. Gil C. Cadwell — „Electric discharge forming in the production line”, Metalworking Production, 1962, vol. 106, nr 6, str. 49—51
33. „High-energy working”, Aircraft Production, 1961, nr 9, str. 312—315
34. J. Frederick Parr — „Hydropark forming shapes space-age metals”, The Tool Engineer, 1960, vol. 44, nr 3, str. 81—82
35. „The spark-forming moves into production”, Metalworking Production 1961, May 3, str. 49—50
36. Rupert Le Grand — „Shock-wave from sparks shapes sheet metal”, Metalworking Production, 1960, February 17, str. 299—300
37. „Magnetic-Pulse Metal-Forming Machine”, The Engineer, 1962, vol. 213, nr 5535, str. 388—389
38. „Magnetic-Pulse Forming”, Aircraft Production, 1962, vol. 24, nr 4, str. 112—114
39. „Magnetic Forming”, Aircraft Production, 1962, vol. 42, nr 8, str. 264—267
40. „Magnetic Forming”, Metalworking Production, 1961, vol. 105, nr 23, str. 65—70
41. H. P. Furth, R. W. Waniek — „New ideas on magnetic forming”, Metalworking Production, 1962, vol. 106, nr 18, str. 50—53
42. „Forming sheet metal by use of explosives under water”, Sheet Metal Industries, May 1955, str. 361 i 364
43. „Explosive forming of Wing-tip Tanks”, Machinery, 1958, vol. 94, May 27, str. 1198
44. „An Explosive Sheet Material for Hardening and Forming Metals”, Machinery, vol. 95, 1959, October 7, str. 697—698
45. J. H. Cook — „Working metals by detonating explosives”, Sheet Metal Industries, 1960, April, str. 253—258
46. Thomas A. Dickinson — „Explosive working”, Aircraft Production, 1959, vol. 21, nr 10, str. 346—348
47. H. P. Tardif — „Forming cones by Metal Garthering” Metal Progress, 1959, nr 9, str. 84—85
48. E. W. La Rocca — „Marking Compacts by Explosive Forming”, Metal Progress, 1959, nr 9, str. 85—86
49. Alan Cross — „Try Hot Explosive-Compacting for Sintered Powder Products”, The Iron Age, 1959, December 24, str. 48—50
50. H. P. Tardif — „Explosive Forming in Canada”, Metal Progress, 1960, nr 1, str. 128—130
51. Thomas A. Dickinson — „Report on explosive forming”, Light Metals, 1959, nr 5, str. 136—137
52. E. A. Green — „High-energy methods”, Aircraft Production, 1959, vol. 21, nr 6, str. 204—205
53. Dionizy Smoleński — „Teoria materiałów wybuchowych”, Wydawnictwo MON, 1954
54. M. Sierebriakow — „Balistyka wewnętrzna”, Wydawnictwo MON, 1955
55. „Application de L'elektromagnetisme on formage des Métaux”, La Machine Modern, 1961, vol. 55, nr 633, str. 44—46
56. W. F. Courtis — „Electrical Discharge Metal Forming”, Mechanical Engineering, 1962, vol. 84, nr 10, str. 46—49
57. Floyd A. Cox — „Ryans Experience in Explosive Forming”, Metal Progress, 1961, vol. 80, nr 2, str. 71—73.

PRZYPOMINAMY

czas odnowić prenumeratę
„Techniki Lotniczej“

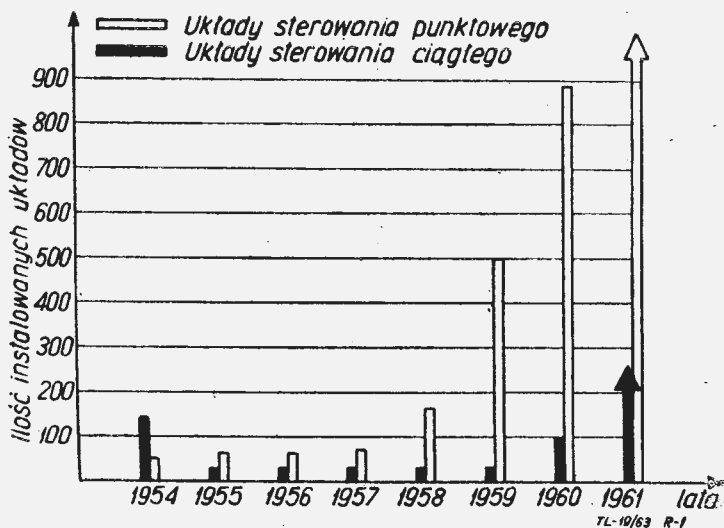
na II półrocze br.

Rozwój sterowania programowego

Kierunki rozwoju sterowania ciągłego i punktowego

Na przestrzeni kilku ostatnich lat metody sterowania numerycznego zdobyły sobie rangę podstawowych w różnych gałęziach produkcji. Sterowanie programowe procesów obróbki skrawaniem jest jedną z dziedzin, w których według opinii fachowców dokonuje się dzięki niemu rewolucja w zakresie wytwarzania i organizacji produkcji. Pomimo niewątpliwych zalet i korzyści, jakie cechują obrabiarki szczególnie ze sterowaniem ciągłym, obserwowano się do 1961 r. stosunkowo małe ich zapotrzebowanie przez przemysły takich krajów jak USA, ZSRR i Anglia. Tak na przykład w Stanach Zjednoczonych przemysł lotniczy w 1954 r. zainstalował w fabrykach ponad 100 różnego typu frezarek ze sterowaniem ciągłym, natomiast w 1959 r. już tylko około 20 frezarek. Natomiast jeśli chodzi o układy ze sterowaniem punktowym, to obserwuje się stały wzrost zapotrzebowania, który w 1961 r. przybrał formę niemal lawinową. Dla zobrazowania tego stanu na rysunku 1 pokazano graficznie wzrost ilości układów obydwu rodzajów w funkcji czasu.

Od 1961 roku zaznaczył się również bardzo duży wzrost zapotrzebowania na układy ciągłe. W związku z tym narzuca się pytanie: po pierwsze — dlaczego nastąpił dość długi „zastój” zainteresowań odbiorców od 1954 r., po drugie — dlaczego 1960 rok był rokiem przełomowym? Aby odpowiedzieć na te pytania należy zdać sobie spr-



Rys. 1. Wykres obrazujący wzrost zastosowania obrabiarek wyposażonych w układy sterowania ciągłego i punktowego w poszczególnych latach

wę z charakteru sterowania ciągłego, z trudności związanych z asymilacją tego typu urządzeń w zakładzie produkcyjnym oraz porównać go z o wiele prostszymi układami, jakimi są układy ze sterowaniem punktowym.

1. Sterowanie ciągłe

W początkowym rozwiązaniu układy sterowania ciągłego oparte były o znaną i produkcyjnie opanowaną technikę lamp elektronowych. W następnym stadium, w miarę rozwoju elementów półprzewodnikowych, konstruktorzy układów zastosowali tranzystory. Zmiana ta miała jednak charakter tylko konstrukcyjny, a nie koncepcyjny. Jak wiadomo, koncepcja tych pierwszych układów, zwanych impulsowymi, oparta była na czysto cyfrowym rozwiązaniu. Przygotowanie programów odbywać się mogło tylko przy użyciu maszyny cyfrowej i to w czasie stosunkowo długim, a więc tym samym było kosztowne. W następnej fazie, aby odciążać maszynę cy-

frową, skonstruowano interpolator pracujący na zasadzie liniowej. Pomimo to przygotowanie programów wymagało dużego wkładu pracy przez użytkownika.

Z drugiej strony, przy niskiej jeszcze technice półprzewodników, a przy dużym stosunkowo stopniu skomplikowania układu, był on mało pewny w pracy, wymagał ciągłej konserwacji, częstych napraw i specjalnych warunków eksploatacji, jak na przykład oddzielenia maszyny od pomieszczeń zanieczyszczonych, stabilizacji temperatury, napięcia itp.

Wszystkie powyższe przyczyny złożyły się na to, że użytkownicy — pomimo poprawnego rozeznania w zaletach maszyny — woleli metody, które stwarzały mniej kłopotów produkcyjnych.

Dlatego też wysiłki firm produkujących układy sterujące poszły w kierunku ich uproszczenia przy jednoczesnym maksymalnym wyeliminowaniu pracy maszyny cyfrowej.

W chwili obecnej konstrukcja nowego typu układu weszła już w stadium produkcji seryjnej. Dla zorientowania się w różnicy systemów nowych i dotychczasowych trzeba podać cechy charakterystyczne, odróżniające je.

Pierwszą, główną cechą jest uproszczenie programowania, które ująć można w trzech zasadniczych punktach:

- zdolność generowania krzywej drugiego stopnia na podstawie jednego kadru informacji;
- zastosowanie kodu w układzie dwójkowo-dziesiętnym, co pozwala używać normalnej dziurkarki dalekopisowej do przygotowania taśmy;
- opracowanie prostej systematyki kodowania wymiarów i szybkości posuwów.

Wynika z tego wniosek, iż mimo niewątpliwych korzyści w sensie zaoszczędzenia czasu, jakie dałoby użycie maszyny cyfrowej, można przygotować program bez jej udziału. Z punktu widzenia użytkownika, który nie dysponuje bezpośrednio maszyną, jest to argument pierwszorzędnej wagi.

Następną cechą, która dała — między innymi — początek punktowi pierwszemu (a), jest rozwiązanie układu z interpolacją kołową.

Niektóre z dotychczasowych systemów posiadały układy interpolujące liniowe. Układy te mogły z jednego kadru informacji wyprodukować tylko prostą. W przypadku konieczności zaprogramowania drogi narzędzia po krzywej drugiego stopnia, trzeba ją było zastąpić szeregiem cięciw o długości odpowiedniej do wielkości krzywizny i żądanej dokładności. Każda z tych cięciw musiała więc być osobno zaprogramowana z jednego kadru. Można sobie wyobrazić pracochłonność takiego przygotowania programu w sposób ręczny.

Interpolacja kołowa, oprócz umożliwienia ręcznego przygotowania taśmy, posiada jeszcze jeden zasadniczy aspekt; mianowicie może wyeliminować taśmę magnetyczną w przypadku, jeśli układ interpolujący stanowi część systemu sterującego obrabiarką. W takim przypadku odpada nie tylko koszt urządzenia nagrywającego, koszt taśmy i precyzyjnego mechanizmu jej przesuwu, ale odpada całe urządzenie stanowiące same w sobie układy elektrony. Urządzenie to stanowi dotychczas komplikację konstrukcyjną, a oprócz tego jest niedogodne w użytkowaniu.

Następną w kolejności, również konstrukcyjną cechą układu jest możliwość kompensacji średnicy freza. Dane początkowo przygotowane na taśmie dotyczą zawsze punktów charakterystycznych konturu przedmiotu obrabianego. Przy obróbce frezowaniem oś narzędzia zakreśliła drogę, która jest krzywą równoległą do konturu, położoną w odległości równej połowie średnicy freza. Aby tę drogę uzyskać, należało dotychczas do programu maszyny cyfrowej wprowadzić wielkość odpowiadającą średnicy freza, na podstawie której maszyna obliczała poszczególne punkty drogi osi narzędzia. Obecnie dla

ominięcia konieczności obliczania (a więc użycia maszyny cyfrowej), układ zaprojektowano w ten sposób, że taśma sterująca odpowiada konturowi przedmiotu obrabianego, natomiast drogę osi freza ustala się wprowadzając wielkość średnicy freza ręcznie za pomocą przełączników dekadowych. Oprócz wymienionej zalety ominienia dodatkowych przeliczeń, system ten pozwala na użycie przy tym samym programie narzędzi przeostrzanych. Jak wiemy, w dotychczasowych układach wymiana narzędzia i przeostrzenie wymagało przygotowania nowej taśmy magnetycznej. Jest to znowu własność, którą najbardziej odczuje użytkownik w sensie lepszego i łatwiejszego wykorzystania obrabiarki.

Wreszcie ostatnia z cech wynikających ze zmian konstrukcji, tak zwane dowolne usytuowanie początku układu współrzędnych. Jest to szczególnie istotne przy produkcji jednostkowej i częstych zmianach konstrukcyjnych wyrobu. Dotychczasowe układy posiadały tak zwane stałe „zero”, stałą bazę, w stosunku do której należało mocować półfabrykat. Obecnie przedmiot można mocować w dowolnym miejscu stołu, na przykład frezarki. Oprócz wygody w eksploatacji, pociąga to za sobą zmniejszenie kosztów specjalnego oprzyrządowania.

Na zakończenie należy wspomnieć o unifikacji elementów układu, zdolności do przystosowywania go do różnych rodzajów maszyn oraz o jego technologiczności.

Na obecnym etapie rozwojowym układy oparte są o technikę tranzystorową, wykonane na obwodach drukowanych i w ten sposób skonstruowane, że istnieje całkowita wymiennieść elementów podstawowych. Ma to szczególne znaczenie w przypadku awarii w czasie trwania produkcji, gdzie czas przestoju na odnalezienie uszkodzenia i jego usunięcie musi być sprowadzony do minimum. Konstrukcja układów pomyślana jest w ten sposób, że może on być adaptowany do dowolnych maszyn, a jego elementy podstawowe (tzw. pakiety) są identyczne nie tylko dla układów sterowania ciągłego, ale również dla sterowania punktowego. Dzięki temu układy te znajdują coraz szersze zastosowanie tak z racji przydatności, jak i ceny.

Dla przykładu można podać, że obecnie cena układu sterowania ciągłego jest co najwyżej dwukrotnie wyższa od układu sterowania punktowego w porównaniu z około czterokrotną różnicą sprzed kilku lat.

2. Sterowanie punktowe

Zapotrzebowanie na układy sterowania punktowego, jak wspomniano już na początku niniejszego artykułu, jest o wiele większe w stosunku do ciągłych. Wynika to przede wszystkim z ich ceny oraz łatwości eksploatacji.

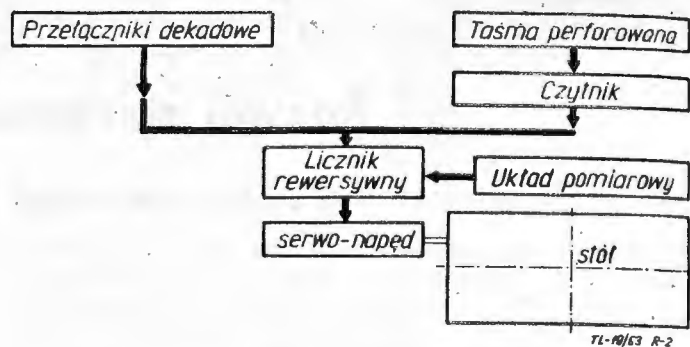
Zasadniczą różnicą z punktu widzenia pracy pomiędzy układami ciągłymi i punktowymi jest to, że w tych ostatnich kontrolowane jest tylko końcowe położenie narzędzia, natomiast droga, po której narzędzie dochodzi do tego punktu, jest dowolna i przeważnie dyktowana prowadnicami. Wynikają z tego również niższe wymagania techniczne na serwonapęd.

W obecnej chwili istnieje na świecie około 50 różnych systemów sterowania. Różnią się one pomiędzy sobą dokładnością, rodzajem napędu i układu pomiarowego oraz układami wejściowymi, na przykład na karty, taśmę, przełączniki itp. Pod kątem dokładności są one podzielone na cztery klasy:

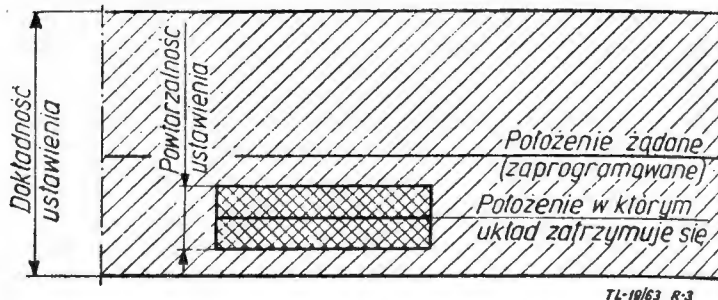
- 1 kl. dokł. do 0,01 mm,
- 2 „ „ 0,01 do 0,02 mm,
- 3 „ „ 0,02 do 0,07 mm,
- 4 „ „ od 0,07 mm.

Na rys. 2 pokazano uproszczony schemat blokowy układu. Funkcjonalnie podzielić go można na następujące zespoły: zespół wejścia, to znaczy wprowadzenia danych, zespół przetwarzania, zespół pomiaru położenia i zespół napędowy.

Zespół wprowadzania danych przeważnie wykonywany jest jako podwójny; mianowicie można program wprowadzić z taśmy dziurkowanej lub też za pomocą ręcznych przełączników. Jest to wygodne w użytkowaniu w przypadkach obróbki różnych ilości tych samych części. Na ogół taśma jest opłacalna począwszy od 4÷5 sztuk części o ilości otworów wierconych 10 do 15.



Rys. 2. Schemat blokowy układu sterowania punktowego



Rys. 3. Rozkład pól dokładności i powtarzalności położenia stołu krzyżowego, wyposażonego w układ sterowania punktowego

Zespół przetwarzania jest ściśle związany z zespołem pomiaru i zwykle jest realizowany w technice tranzystorowo-przełącznikowej. W przypadku podanego schematu, oznaczono go jako licznik rewersyjny, który pracując w pętli zamkniętej otrzymuje impulsy (odpowiadające przyrostom przesunięć) z układu pomiarowego i odejmuje je od swego stanu. Zawartość licznika równa zero oznacza osiągnięcie przez stół zadanego położenia i zatrzymanie go wobec braku napięcia zasilającego (proporcjonalnego zawsze do zawartości licznika).

Serwonapęd najczęściej realizowany jest za pomocą silników prądu stałego z ciągłym sterowaniem prędkości, na przykład przez tyratrony, wzmacniacze itp.

Od strony konstrukcji mechanicznej, oprócz problemu dokładności, działanie układu narzuca konieczność wyeliminowania zmienności oporów tarcia na prowadnicach i śrubach, zastosowania bezluzowych łańcuchów napędowych oraz ograniczenia ciężaru własnego przy jednoczesnym zachowaniu dużej sztywności. Należy tu wspomnieć, że cechą układów sterowania punktowego jest duża powtarzalność tych samych położenia stołu, nie-

Rys. 4. Stół krzyżowy typu „Atlantic”, wyposażony w układ sterowania punktowego

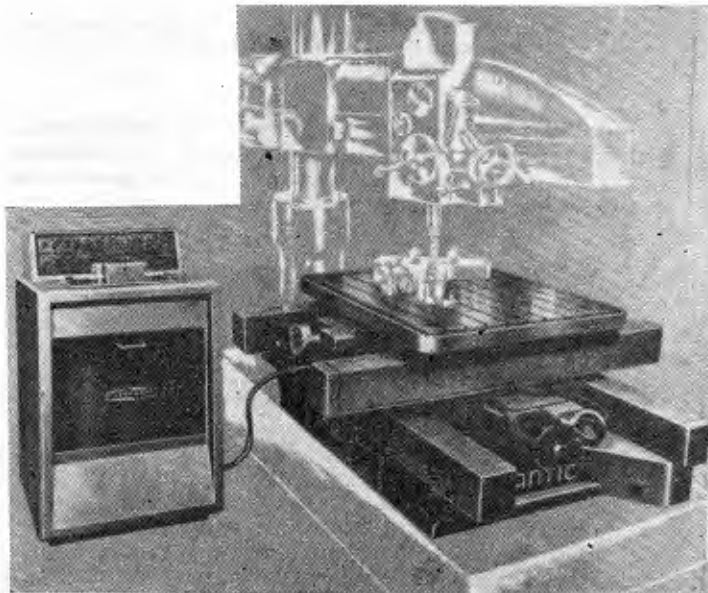


Tabela 1

Zestawienie przykładowych systemów sterowania z podaniem ich cech charakterystycznych

Wytwórca	Orientacyjny koszt układu	Dokł. mm	Rodzaj układu pomiarowego	Uwagi
Hillyer Instr. Co	\$ 6000	$\pm 0,01$	tarcze kodowe	Koszt układu obejmuje dwie osie
Pratt Whitney Co	\$ 60 000	$\pm 0,002$	tarcze kodowe	Koszt obejmuje koordynatkę i układ ster. w 2 osiach
The British Thompson-Houston Co	\$ 20 000	$\pm 0,008$	listwa pomiarowa magnetyczna + tarcze kodowe	Koszt obejmuje wiertarkę wraz ze stołem ster. w 2 osiach
V. L. Schwartzkopff	\$ 65 000	$\pm 0,004$	przymiary + tarcze kodowe	Koszt obejmuje koordynatkę, ster. stołu w 2 osiach i ster. posuwem narzędzia
Ferranti Ltd.	\$ 3000 na jedną oś	$\pm 0,002$	listwy pomiarowe optyczne	Koszt nie obejmuje obrabiarki, czytelnika taśmy i urządzeń napędowych
Electronic Control Systems Ltd.	\$ 20 000	$\pm 0,004$	tarcze kodowe	Koszt obejmuje stół
Cleveland Instr. Co	\$ 15 000	± 3 sek.	induktosyn	Koszt obejmuje układ sterow. stołem obrotowym
Fuji Tsushinki Manufacturing Co	\$ 4500	$\pm 0,07$	tarcza z otworami	Koszt obejmuje układ ster. ruchów ustawczych stołu prasy do przebijania otworów
Advance Industries Inc.	\$ 30 000	$\pm 0,02$	selsyny sprzężone ze śrubami pociągowymi	Koszt obejmuje wiertarkę i układ ster. stołu i głowicy

zależna od dokładności układu. Schematycznie pokazano rozkład pól dokładności i powtarzalności na rys. 3.

Najczęściej spotykanym mechanicznym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest stół krzyżowy sterowany w dwóch osiach, który może współpracować z dowolną, odpowiednio dobraną wiertarką promieniową lub kolumnową. Stół taki wraz z pulpitem sterującym widoczny jest na rys. 4. W tym konkretnym przypadku automatyka ogranicza się tylko do ruchów ustawczych stołu, natomiast wszystkie czynności pomocnicze wraz z posuwem roboczym wrzeczona wykonywane są przez obsługującego ręcznie. Oczywiście równie rozpowszechnione są rozwiązania z pełną automatyką, wymagają one jednak poważnie, specjalnie do tego celu zaprojektowanej, obrabiarki i bardziej rozbudowanego układu sterującego.

W tabeli 1 zestawiono część systemów sterowania produkowanych na świecie z podaniem ich cech charakterystycznych.

3. Sterowanie odcinkowe i sekwencyjne

Od sterowania punktowego niewiele różni się sterowanie odcinkowe, stosowane np. we frezach pionowych przy obróbce powierzchni bocznych leżących wzdłuż osi x i y, nazywane czasem sterowaniem w cyklu prostokątnym. W porównaniu ze sterowaniem punktowym występuje tu jednak zasadnicza różnica polegająca na tym, że kolejne przesunięcia narzędzia odbywają się zawsze wzdłuż tylko jednej osi oraz, że przesunięcia te muszą się odbywać przy posuwie roboczym, ponieważ w tym właśnie czasie ma miejsce obróbka przedmiotu. To z kolei narzuca warunek, że zakończenie posuwu wzdłuż każdego odcinka musi się odbywać w tym samym zwrocie, bez jakichkolwiek ruchów oscylacyjnych.

Pod względem rozwiązań konstrukcyjnych układu sterującego oraz serwonapędowego, sterowanie odcinkowe nie różni się w zasadzie od punktowego. Jedynie ze względu na charakter pracy obrabiarek wyposażonych w układy sterowania punktowego, wymaga się od nich większej dokładności niż od układów sterowania odcinkowego. Nie można jednak tego traktować jako reguły, ponieważ sterowanie odcinkowe wiertarko-frezarką będzie musiało być dokładniejsze niż sterowanie punktowe stołu krzyżowego zwykłej wiertarki kolumnowej.

Zarówno układy sterowania punktowego (rzadziej), jak i odcinkowego (najczęściej) są rozwiązywane przy użyciu odpowiedniego zestawu zderzaków, bez zapisywania współrzędnych punktów charakterystycznych. W tych

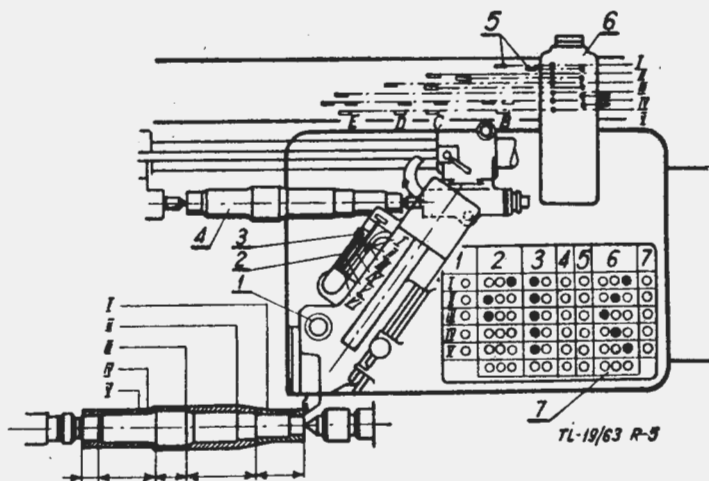
przypadkach określa się je odpowiednio, jako sterowanie sekwencyjne punktowe i sterowanie sekwencyjne odcinkowe.

W przypadku, gdy ustalenie programu w funkcji drogi polega na ustawieniu i regulowaniu zderzaków na obrabiarce, sterowanie automatyczne powinno przynajmniej zapewniać praktycznie nieograniczoną możliwość zmiany kolejności czynności, aby mogło być zaliczone do sterowania programowego. Cały więc ciężar gatunkowy tego rodzaju sterowania będzie polegał na ustaleniu (zapisie) przewidywanych czynności oraz ich wzajemnej kolejności, a następnie sterowanie w tej zaprogramowanej kolejności. Z tego względu takie sterowanie będzie nazwane sterowaniem programowym sekwencyjnym lub krótkosekwencyjnym.

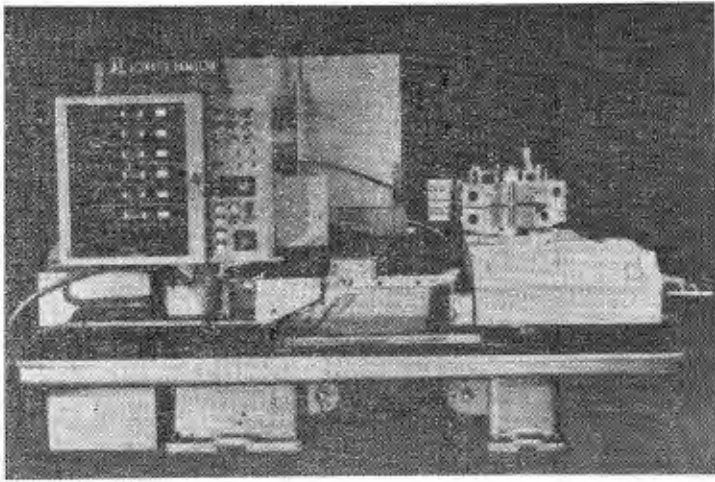
Układy sterowania sekwencyjnego są dosyć proste. Konstrukcja ich opiera się głównie na przekaźnikach miniaturowych i wybierakach 10-położeniowych.

Na rys. 5 przedstawiono schemat suportu hydraulicznego tokarki-kopiarki wyposażonej w układ sterowania sekwencyjnego. Tokarka podobnego typu, firmy „Magdeburg”, została zakupiona przez Zakłady im. M. Nowotki w Warszawie.

Na tokarce tej można obrabiać detal podczas pięciu przejść, przy czym ostatnie dopiero wykonywane jest według kopiału. Przy wstępnej obróbce przedmiotu ruch poprzeczny suportu hydraulicznego 1 ograniczony jest



Rys. 5. Schemat suportu hydraulicznego tokarki-kopiarki, wyposażonej w układ sterowania sekwencyjnego



Rys. 6. Tokarka rewolwerowa wyposażona w układ sterowania sekwencyjnego

zderzakami 3, umieszczonymi na obrotowym bębnie 2. Po zakończeniu kolejnego przejścia bębenek 2 obraca się o jedną działkę, a w robocze położenie ustawiony jest następny zderzak, określający położenie noża w czasie danego przejścia.

Wzdłużnymi przemieszczeniami suportu sterują zderzaki 5. Zderzaków tych jest 5 grup, z których każda podaje sygnał tylko w czasie jednego przejścia. Zderzaki 5 naciskają na wyłączniki krańcowe, umieszczone na skrzynce 6. Przy wykonywaniu kolejnego przejścia w obwód elektryczny włączone są tylko te wyłączniki krańcowe, które odpowiadają danemu przejściu. Zatem zderzaki 5 mogą mieć pozostałe wyłączniki nie powodując żadnych przełączeń.

Grupa zderzaków A, B, C, D i E steruje przełączaniem prędkości obrotowej wrzeciona, dla każdego przejścia. Obroty wrzeciona są podzielone na sześć grup, a każda z nich składa się z trzech ilości. Grupa obrotów włączana jest ręcznie, natomiast prędkość w danej grupie wg programu, przy pomocy zderzaków A, B.... Podobnie jest rozwiązane włączanie posuwów.

Program kolejności przełączania ruchów suportu kopiującego, obrotów wrzeciona, posuwów oraz suportu poprzecznego (nie widocznego na schemacie) może być ustalony przy pomocy tablicy wtykowej, bądź specjalnego bębna — w zależności od zastosowanego rozwiązania.

Na rys. 5 przedstawiono taką uproszczoną tablicę wtykową 7, składającą się z siedmiu rzędów pionowych. W rzędzie pierwszym oznaczono kolejność przejść. W kolumnie 2 każdy rząd otworów poziomych odpowiada grupie obrotów włączanej ręcznie, natomiast otwór w rzędzie — obrotem w danej grupie. Np. na rysunku pokazano, że pierwsze przejście realizowane jest przy trzeciej prędkości. Gniazda wtykowe w kolumnie 3 służą dla ustalenia posuwu. Kolumna 5 służy dla ustalenia numeru przejścia, w którym zakańczą się cykl automatycznej pracy obrabiarki. Gniazda w kolumnie 6 przeznaczone są dla ustalenia obrotów wrzeciona na odcinkach między zderzakami A, B, C, D i E w czasie przejścia kopiującego. Wybór prędkości taki sam, jak w kolumnie 2.

Przełączanie od jednego wiersza programu do drugiego realizowane jest za pomocą elektrycznego przełącznika związanego z obrotowym bębniem 2, ustawiającym zderzaki przesuwu poprzecznego.

Na rys. 5 pokazano przykład ustawiania obrabiarki dla obróbki wałka odstopniowanego. Celem skrócenia czasu niezbędnego dla ustalenia programu na tablicy wtykowej lub bębnie, przy obróbce powtarzających się często partii przedmiotów, można stosować karty dziurkowane.

Bardzo ekonomiczne jest zastosowanie sterowania sekwencyjnego do automatyzacji cyklu pracy tokarki rewolwerowej.

Na zdjęciu, rys. 6, przedstawiona jest tokarka rewolwerowa ATL, firmy Jones and Lamson Machine Co. Zastosowany układ sterujący pozwala na programowanie (a zatem zautomatyzowanie) pełnego cyklu obróbki w różnych wariantach, bądź tylko pewnych sekwencji cyklu.

Programowanie obejmuje: przesuw pręta obrabianego, zaciśnięcie lub zwolnienie pręta, indeksowanie głowicy rewolwerowej, ruchy suportu poprzecznego i sań, zmianę kierunku obrotów wrzeciona, zmianę prędkości obrotowej wrzeciona, zmianę posuwu suportów i sań, stop pośredni oraz włączenie chłodziwa. Ponadto wymienione poprzednio czynności można programować oddzielnie dla każdego z sześciu położań głowicy rewolwerowej. Raz ustawiony cykl pracy może być wielokrotnie powtarzany.

Programowanie pracy ATL odbywa się przez odpowiednie ustawienie przełączników na tablicy sterowniczej dla każdego położenia głowicy rewolwerowej. Poza tym przewidziana jest możliwość przerywania pracy obrabiarki przy dowolnym położeniu narzędzia.

Podobnie, jak ATL, rozwiązana jest tokarka rewolwerowa produkcji ZSRR typu 1P326.

Sterowanie sekwencyjne (na ogół są to układy mieszane, „odcinkowo-sekwencyjne”) znalazło największe zastosowanie w automatyzacji cyklu pracy tokarek uniwersalnych, tokarek kopiarek, tokarek rewolwerowych, a rzadziej frezarek pionowych, bądź poziomych. Według danych radzieckich, w samych tylko zakładach produkcyjnych w Leningradzie pracuje ponad 200 różnego typu tokarek ze sterowaniem programowym. Wynika to prawdopodobnie stąd, że tokarki stanowią znaczną większość parku obrabiarkowego, a poza tym, przy stosowanych obecnie bardzo wysokich prędkościach skrawania, czas tracony na ruchy jałowe i czynności pomocnicze jest znacznie większy od czasu niezbędnego na samo skrawanie. Ten czas tracony można zmniejszyć tylko przez taką maksymalną automatyzację cyklu obróbki, która będzie mogła być dostosowana do obrabianego przedmiotu, ze względu na małoseryjność produkcji. Warunkom takiej „elastycznej automatyzacji” odpowiada obecnie tylko sterowanie programowe.

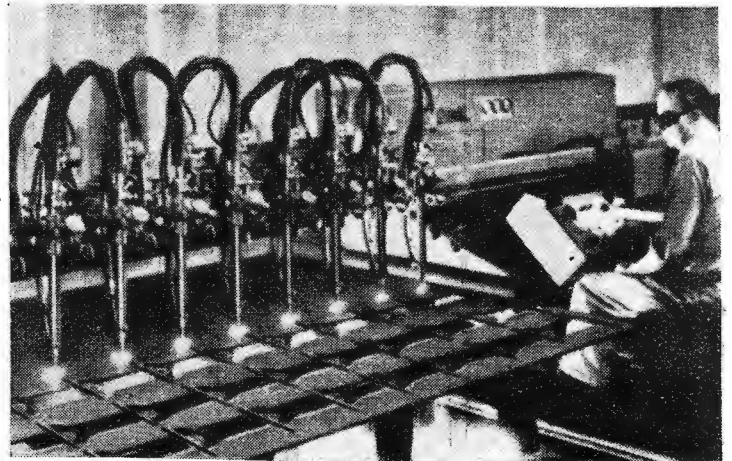
4. Sterowanie programowe innych urządzeń

Omówione powyżej sterowanie programowe nie ogranicza się bynajmniej do obrabiarek. Istnieje cały szereg jego zastosowań w innych gałęziach produkcji, w których zdobywa sobie ono coraz większe uznanie.

W przemyśle okrętowym zastosowano je w maszynie do cięcia acetylenowego blach kadłubowych. Dotychczasowa technika polegała na ręcznym przygotowywaniu szablonów, trasowaniu i cięciu. Obecnie proces liczenia punktów konturu wykonuje maszyna cyfrowa i przygotowuje taśmę sterującą. Oprócz sterowania ciągłego w dwóch osiach urządzenie posiada automatyczne ustawianie na odpowiednią wysokość palników, dobór ciśnienia acetylenu itp. Zastosowanie tego urządzenia obniżyło koszt produkcji, według danych British Oxygen Co., o około 40%. Rys. 7 przedstawia omówione urządzenie.

Firma Convair Division zaopatrzyła w układ sterowania punktowego zgrzewarkę punktową do długich wycinków blach.

Brytyjskie towarzystwo British Iron and Steel Research Ass. zastosowało system sterowania programowe-



Rys. 7. Maszyna do cięcia kształtowego blach okrętowych

go przy walcowaniu cienkich blach. Ponieważ w tym procesie bezpośredni pomiar grubości blachy za wałcami wprowadzał zbyt duże błędy, układ pomiarowy oparto na pomiarze nacisku wałców i krzywej plastyczności materiału.

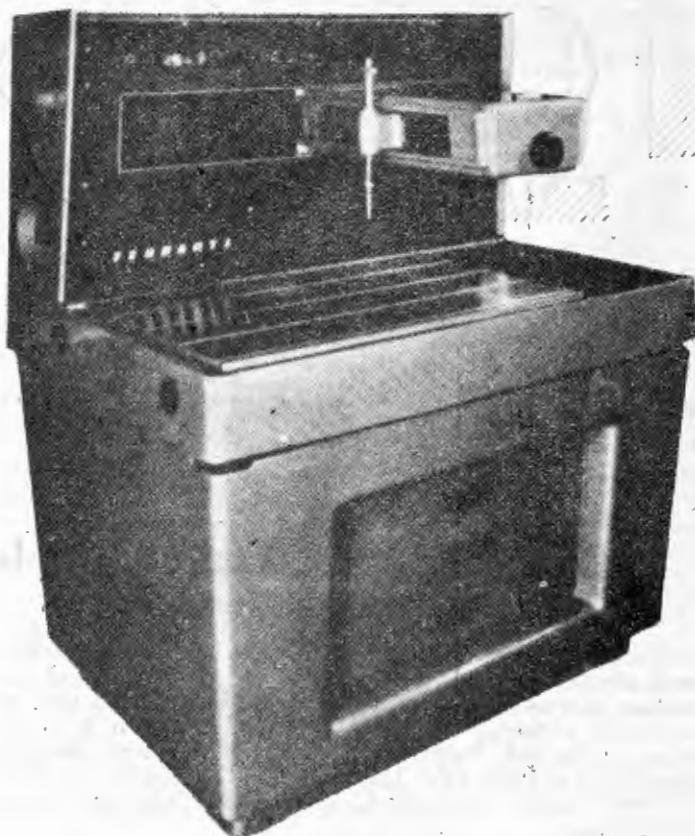
Firma Ferranti produkująca układy sterowania programowego do obrabiarek wykonała na tej zasadzie urządzenie do pomiaru długościowego (rys. 8). Układ wyjściowy pozwala na uzyskanie wyników pomiaru na taśmie dziurkowanej lub w postaci zapalonych lampek licznika dekadowego. Pomiar odbywa się na zasadzie przesuwu względem siebie siatek dypolacyjnych i wyzyskaniu efektu Moora.

W ZSRR wykonano wyważarkę do dynamicznego wyważania, pracującą w linii automatycznej produkującej silniki elektryczne. Wyważarka ta zaopatrzona została w układ sterowania programowego działający w następujący sposób: określenie ilości wagowej i położenia materiału, który ma być z elementu wyważanego usunięty, odbywa się zwykłą metodą. Dane te przesyłane są do przelicznika, który oblicza miejsca i średnice do wiercenia, ładując je do pamięci układu sterującego specjalną jednostką wiertarską.

Firma amerykańska wykonała sterowany programowo automat do gięcia rur. Układ sterujący dobiera odpowiedni promień gięcia, kąt gięcia, załadowuje i rozładowuje maszynę. Urządzenie to pracuje w linii automatycznej, w której około 50% jednostek sterowanych jest automatycznie z taśmy dziurkowanej.

W ZSRR układ cyfrowy z przesunięciem fazy zastosowano w przyrządzie do kontroli profilu łopatek turbinowych i sprężarkowych. Łopátka mocowana jest w specjalnym uchwycie na ruchomym stole krzyżowym przyrządu, którego układ napędowy sterowany jest z taśmy magnetycznej. Na taśmie tej zapisane są współrzędne punktów profilu łopátki względem stałego punktu odniesienia — czujnika pomiarowego. Odchyłka profilu rzeczywistego od zadanego mierzona jest czujnikiem indukcyjnym, który za pomocą dodatkowego układu — sterowanego także z taśmy magnetycznej — utrzymywany jest w pozycji prostopadłej do krzywizny sprawdza-

nego profilu łopátki. W tym celu czujnik ma możliwość obracania się o 360° dookoła punktu styku jego końcówki pomiarowej z mierzoną powierzchnią. Wskazania czujnika mogą być zapisywane na taśmie magnetycznej, bądź odczytywane w wielkościach bezwzględnych za po-



Rys. 8. Urządzenie do pomiaru długości

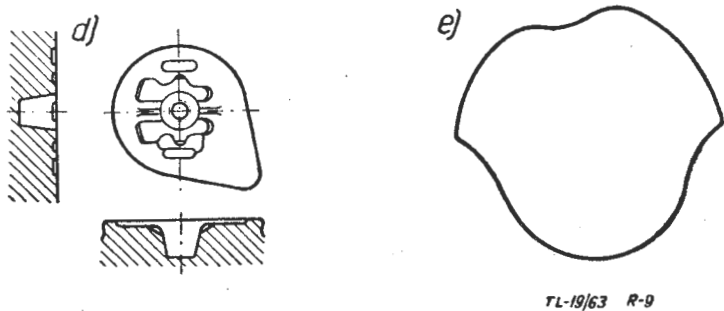
Tabela 2

Zestawienie analizy kosztów wykonania wybranych części przy obróbce na obrabiarkach konwencjonalnych, sterowanych programowo

a. Nazwa części b. Rys. części c. Operacja d. Materiał e. Ilość sztuk w partii	PRZYKŁAD 13				PRZYKŁAD 14			
	Matryca d Obróbka całkowita matrycy z bloku Stal matryc. węgl.-chrom. 1				Krzywka e Obróbka całkowita krzywki Stal matryc. CCr 1			
f. Typ obrabiarki	Elektronowa Hayes Tapemaster (Ferranti Mark IV) wypos. elektr.	Konwencjonalna wiertarko-frezarka	Elektronowa Hayes Tapemaster (Ferranti Mark IV)	Konwencjonalna wiertarko-frezarka				
g. Koszt partii	£ 66 1 6	£ 31 14 6	£ 34 3 11	£ 125 12 8				
h. Koszt 1 szt.	£ S D £ S D	£ S D £ S D	£ S D £ S D	£ S D £ S D				
Biuro konstrukc. narzędzia, przrz. pomiar. Koszty przygot. praca koszty zakończ.	60 6 6 1 13 4 4 1 8	— — —	31 6 5 — —	104 0 0 — —				
Suma	66 1 0	31 14 6	34 3 11	125 12 8				
i. Procent oszczęd. koszt.	-108%	—	73%	—				
k. Czas masz. dla partii	4 godz.	27 godz.	2 godz.	18 godz.				
l. Procent oszczęd. na cz. masz.	85%	—	89%	—				
m. Roczny czas pracy obrab. (godz.)	2 016	2 016	2 016	2 016				
n. Ilość partii prod. w roku ($\frac{M}{K}$)	504	74 5	1 008	112				
p. Ilość części prod. w roku (N x e)	504	74	1 008	112				
q. Koszt pracy obrab. w roku (P x h)	£ 33 302	£ 2 348	£ 34 469	£ 14 071				
r. Koszt produkcji ilości części w roku obrabiarką ster. program. P x h	£ 33 302	£ 15 989	£ 34 469	£ 126 638				
s. Oszczęd. w prod. w roku przez wprov. obr. ster. (Różn. R)	£ 19 313	—	£ 92 169	—				
t. Przyrost prod. w roku przez wprov. obr. ster. (Różn. P)	+430	—	+896	—				
u. Przyrost % prod. w roku	581%	—	800+	—				
w. Wartość dodatkowa produkcji w roku (T x h)	£ 13 642	—	£ 112 567	—				

mocą specjalnego miernika. Dokładność pomiaru — 0,1 mm. Maksymalna prędkość pracy układu — 30 mm/min., zatem czas potrzebny na kontrolę jednego profilu wyno-

si około 3 min. Przyrząd ten został zastosowany do kontroli łopatek w produkcji doświadczalnej.



Rys. 9. Rysunki części: d) matryca; e) krzywka

5. Ekonomia przy zastosowaniu obrabiarek sterowanych programowo

Na zakończenie, celem krótkiego zilustrowania ekonomiki produkcji przy zastosowaniu obrabiarek sterowanych programowo, zostaną przytoczone dwa przykłady, oparte na danych angielskich. Przykłady te są fragmentem szerokiej ankiety przeprowadzonej przez Komitet Obrabiarkowy w Anglii. W ankietowaniu wzięły udział na przykład takie firmy jak: Ltd-Aviation Division, EMI — Electronics Ltd. Engine Division itd.

Na rys. 9 przedstawiono przykładowe elementy, a w tabeli 2 analizę ich kosztów wykonania. Wyrażone w angielskim układzie monetarnym (£ — funty, S — szylingi, D — pence), nie wymagają komentarzy.

Mgr inż. ANTONI GOŁĘDZINOWSKI

62134

-621.9.018.3 : 621.794

Obróbka elektrochemiczna

Procesem obróbki elektrochemicznej zaczęto interesować się około roku 1950. W tym czasie przeprowadzone zostały pierwsze próby laboratoryjne w zastosowaniu do ostrzenia narzędzi jednoostrzowych z płytkami z węglików spiekanych. Pierwszych zastosowań przemysłowych dokonano w roku 1955. Od tego czasu wyłoniło się wiele różnych grup zastosowań, charakterystycznych swoją specyfiką:

1. Ostrzenie narzędzi jednoostrzowych z węglików spiekanych.
2. Ostrzenie narzędzi wielostrzowych z węglików spiekanych.
3. Obróbka elektrochemiczna elementów konstrukcyjnych.
4. Ostrzenie narzędzi ze stali szybko tnących.
5. Drażnienie otworów.

Wszystkie trzy metody ostrzenia narzędzi (pkt 1, 2 i 4) mają w produkcji części przede wszystkim znaczenie ekonomiczne, zapewniając głównie duże oszczędności tarcz diamentowych, mniejszą ilość pęknięć ostrzy, itp. Stanowią więc bardzo ciekawą dziedzinę dla gospodarki narzędziowej. W dalszych rozważaniach zastosowania te nie będą rozpatrywane. Pozostaną więc do omówienia: obróbka elektrochemiczna i drażnienie elektrochemiczne. Oba te procesy nie różnią się podstawami fizycznymi, a jedynie sposobem rozwiązań konstrukcyjnych, głównie narzędzi oraz parametrami.

Proces obróbki elektrochemicznej opiera się na znanym prawie Faradaya — masa m substancji wydzielonej na elektrodzie podczas elektrolizy jest proporcjonalna do ilości Q przepuszczonej elektryczności.

$$m = k \cdot Q = k \cdot I \cdot t$$

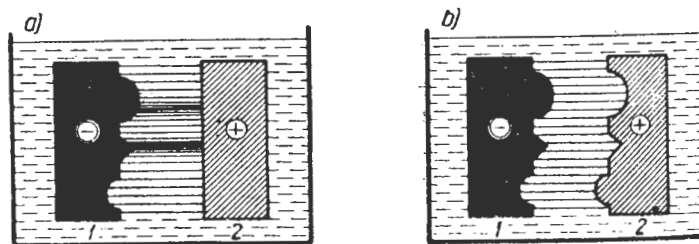
gdzie: k — równoważnik elektrochemiczny danej substancji, I — natężenie prądu, t — czas przepływu prądu.

Prawo to wykorzystywane jest w „dwu kierunkach”: a) do nanoszenia pokryć galwanicznych, b) do polerowania elektrolitycznego i pokrewnej mu obróbki elektrochemicznej, a więc do zdejmowania warstwy materiału. Obróbka elektrochemiczna — poza wspólnotą podstaw fizycznych — różni się znacznie od polerowania elektrolitycznego intensywnością procesu i przeznaczeniem. Parametrem, określającym intensywność procesów elektrochemicznych, jest gęstość prądu. Dla polerowania elektrolitycznego wynosi ona od 0,3 do 0,5 A/cm², natomiast dla obróbki elektrochemicznej sięga od 30 do 80 A/cm², a nawet do 230 A/cm². Ten potężny wzrost ilościowy musiał pociągnąć za sobą zmiany w realizacji procesu i rozwiązywaniu konstrukcyjnym urządzeń. Przeznaczeniem polerowania elektrolitycznego jest uzyskanie odpowiedniej klasy gładkości powierzchni obrabianego przedmiotu, a niekiedy również usunięcie zadziorów

i ogradowanie. Celem obróbki elektrochemicznej jest w pierwszym rzędzie odtworzenie kształtów narzędzia w przedmiocie obrabianym. Istotę odwzorowywania kształtów narzędzia w przedmiocie przy obróbce elektrochemicznej obrazuje rys. 1. W fazie początkowej odległości między poszczególnymi punktami elektrod są różne, a stąd i różne lokalne gęstości prądu (zaznaczone schematycznie zgęszczeniem linii). To z kolei powoduje nierównomierne usuwanie materiału z elektrody. Proces ten trwa aż do osiągnięcia równomiernego natężenia na całej powierzchni, co odpowiada osiągnięciu równomiernej szczeliny, a więc i odwzorowaniu kształtu katody (rys. 1b).

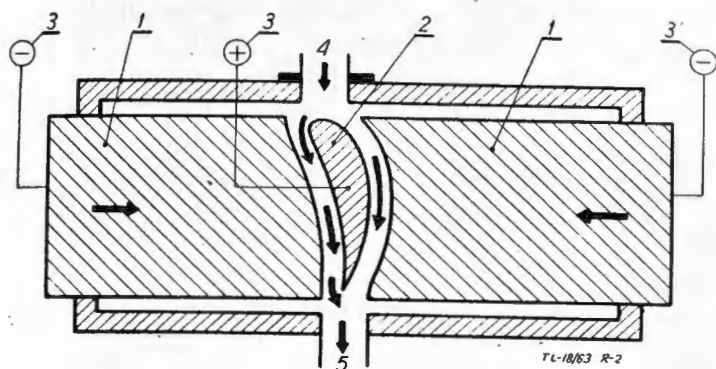
Wprowadzenie omawianego procesu do przemysłu wymagało nadania mu odpowiedniej wydajności. Zrealizowano to drogą olbrzymiego zwiększenia gęstości prądu (wzrost kilkasetkrotny), co z kolei było możliwe przy zachowaniu niskich napięć — rzędu 3—12 V, przez zmniejszenie odległości elektrod do wartości około 0,12 mm. Przy tak wąskiej szczelinie poważnie pogorszył się swobodny przepływ elektrolitu, a jednocześnie kilkasetkrotnie wzrosła ilość rozpuszczonego metalu anody, który wymaga odprowadzenia. Pociągnęło to za sobą konieczność wprowadzenia wymuszonego przepływu elektrolitu i to z bardzo dużymi prędkościami. Jest to również konieczne z uwagi na czystość samego elektrolitu, ażeby elektroliza mogła zachodzić w sposób nie zaburzony. Zasadę procesu elektrochemicznej obróbki części obrazuje rysunek 2. W czasie procesu następuje stopniowe zbliżanie anody do przedmiotu w miarę rozpuszczania się katody tak, ażeby zachowana została stała wartość szczeliny między anodą i katodą¹⁾.

¹⁾ Rozpuszczaniem katody nazywamy proces usuwania zewnętrznej warstwy materiału drogą elektrolizy.



Rys. 1. Zasada odwzorowania kształtów przy obróbce elektrochemicznej. 1. Katoda-narzędzie, 2. Anoda-przedmiot; a) faza początkowa; b) faza końcowa

Na omawianym schemacie występuje proces dwustronnej obróbki, stosowanej bardzo często do przedmiotów profilowych, stosunkowo wiotkich. Anoda w części ro-



Rys. 2. Zasada obróbki elektrochemicznej. 1. Katoda-narzędzie, 2. Anoda-przedmiot, 3. Źródło prądu stałego, 4. Dopływ elektrolitu z pompy, 5. Odpływ elektrolitu do zbiornika

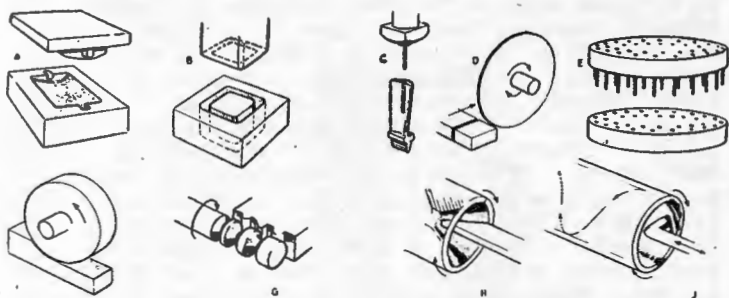
boczej stanowi negatyw profilu gotowego przedmiotu. Omawiany proces różni się znacznie od znanych dotychczas metod obróbki elektrycznej, jak: elektroiskrowa, elektroimpulsowa, elektroiskrowa wysokiej częstotliwości i inne. Podstawową różnicą jest temperatura pracy: przy elektrochemicznej — rzędu kilkunastu do kilkudziesięciu stopni, przy elektroiskrowej lokalnie — rzędu kilku tysięcy. Powoduje to skrajnie różne efekty w strukturze powierzchni obrabianej i w warstwie podpowierzchniowej. Drugą, zasadniczą różnicą — w pewnym stopniu pochodną, jest zużycie elektrody-narzędzia. Wynika to z istoty procesu: przy elektroiskrowej — usuwanie materiału następuje poprzez potężne zgrupowanie punktowej energii, kończące się wyładowaniem-iskrą, która wytwarza lokalnie temperaturę wyższą od topliwości metalu i stąd następuje stopnienie wierzchołka w miejscu wystąpienia iskry, natomiast przy obróbce elektrochemicznej, na skutek różnoimiennego naładowania elektrod prądem, stałym w obecności elektrolitu, następuje zachwianie równowagi atomowej cząsteczek, przyciąganie i odprowadzanie przez elektrolit zewnętrznych atomów metalu anody. Rozpuszczone cząsteczki anody unoszone są przez szybki strumień elektrolitu, nie mogą więc osadzić się na katodzie.

Oba opisy procesów, podane powyżej, zawierają wiele uproszczeń i odstępstw od procesu rzeczywistego (nie uwzględniają lokalnych stanów energetycznych, miejsc bezpośredniej akcji, ani stosunków sił elektrostatycznych, bezwładnościowych i dynamicznych), jednakże wypuklają dostatecznie różnice istoty zachodzących zjawisk. Dla lepszego zrozumienia procesu obróbki elektrochemicznej należałoby go przyrównać do elektrolytycznego nanoszenia pokryć tylko z zamianą kierunku działania i intensywnym przepływem elektrolitu, unoszącym produkty rozpuszczania.

Z istoty procesu, w którym narzędzie nigdy nie styka się z przedmiotem, wynika trwałość katody-narzędzia, które praktycznie nie ulega zużyciu. Jest to jedna z podstawowych zalet procesu.

Początkowe założenia procesu obróbki elektrochemicznej zakładały przede wszystkim obróbkę profilową stopów trudnoskrawalnych i nieskrawalnych, głównie łopatek turbin ze stopów żaroodpornych. Obróbkę profilu łopatki wykonuje się bądź z pełnego klocka, bądź z odkuwki półprecyzyjnej, zdejmując naddatek rzędu od 1 do 2 mm. Istniały poważne obawy, oparte na wnioskach z obserwacji polerowania elektrolytycznego, że proces ten da się zastosować jedynie do niektórych typów łopatek, a to z uwagi na niekorzystny stan naprężeń powierzchniowych w przedmiocie oraz odkrywanie różnego rodzaju wad powierzchniowych, będących następnie źródłem koncentracji naprężeń, szczególnie przy pracy zmęczeniowej. Wyniki osiągnięte w dotychczasowych doświadczeniach z łopatkami przekreślają te obawy, a umiejętne sterowanie parametrami obróbki i naddatkami pozwala na zastosowanie przedmiotów wykonanych obróbką elektrochemiczną, niemal w każdych wa-

runkach pracy. Poza tym zakres zastosowania rozszerzył się nie tylko na inne elementy lotnicze, ale również do wykonywania matryc, renowacji ich oraz na szereg



Rys. 3. Możliwości zastosowania obróbki elektrochemicznej; A. Drażenie matryc, B. Wycinanie, C. Głębokie wiercenie, D. Cięcie, E. Wiercenie zespołowe, F. Frezowanie lub szlifowanie, G. Toczenie kształtowe, H. Szlifowanie wewnętrzne, I. Nacinanie kanałów

innych przemysłów. W chwili obecnej trudno określić ramy zastosowania nowego procesu, a obecne wyniki rokują mu wielką przyszłość, szczególnie tam, gdzie stosuje się materiały trudno skrawalne. Rysunek 3 ilustruje obecne możliwości obróbki elektrochemicznej.

Pierwszym stoiskiem do obróbki łopatek było urządzenie Sifco²⁾, pokazane na rys. 4.

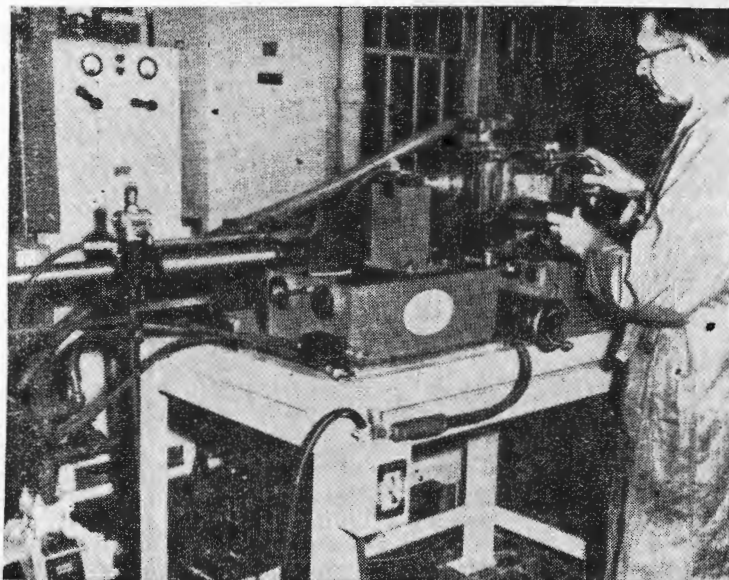
Pracuje ono przy prądzie stałym o napięciu 3—12 V. Stosowane gęstości prądu od 30 do 80 A/cm², a maksymalne nawet do 250 A/cm². Wielkość szczeliny roboczej 0,25 mm, chociaż bywa stosowana również i 0,12 mm. Przyjmując wydajność charakterystyczną³⁾ równą 0,0131 G/A/min i znając wielkość powierzchni roboczej, można określić wydajność całkowitą procesu.

Przy przeciętnych parametrach procesu wydajność całkowita obecnie osiągnąć można od 0,6 cm³/min do 2,5 cm³/min. W chwili obecnej ograniczona jest wielkością mocy dysponowanej w urządzeniach zasilających. Przy tych wydajnościach istnieje konieczność przepływu du-

²⁾ Nazwa Sifco jest skrótem od firmy, w której powstała — Steel Improvement and Forge Company, Cleveland, Ohio, USA.

³⁾ Wydajność charakterystyczną należy rozumieć jako ilość rozpuszczonego materiału wyrażoną w gramach, przy przepływie prądu 1 A w odniesieniu do 1 min. Jest ona różna dla różnych materiałów i zależy nieznacznie również od składu elektrolitu i innych parametrów.

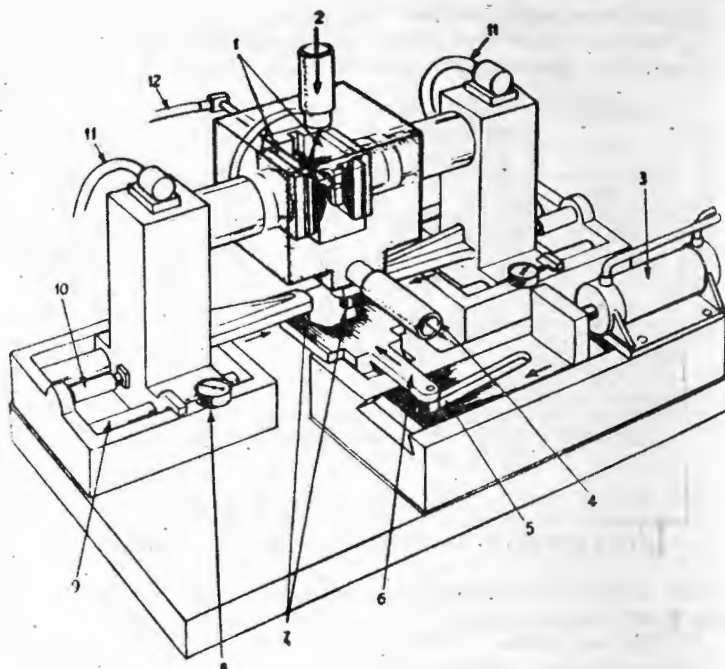
Rys. 4. Załadowywanie odkuwki łopatki turbinowej do jednej z mniejszych maszyn Sifco. Łopatki utrzymywane są w specjalnym uchwycie wsuwanym do komory wykonanej z mas plastycznych



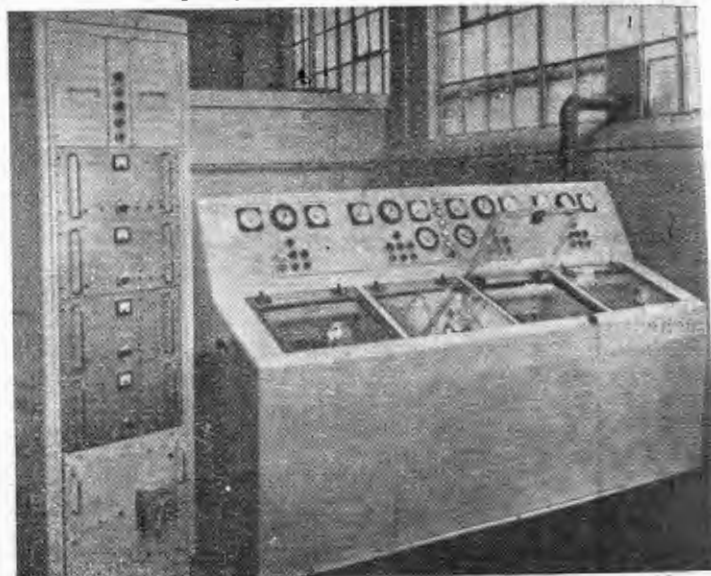
żej ilości elektrolitu przez szczelinę roboczą. Osiągnięte jest to przez zastosowanie dużych prędkości przepływu rzędu 30 do 55 m/sek, co z kolei pociąga za sobą stosowanie dużych ciśnień do tłoczenia elektrolitu. Ciśnienia te wynoszą około 15 kG/cm². Osiągalna dokładność wykonania części wynosi 0,02 mm, a gładkość — $Ra = 0,12 + 0,25 \mu$, co odpowiada 9 klasie. Na rys. 5 pokazano schemat stoiska Sifco. Poza zespołami składowymi łatwo również rozszyfrować funkcjonalne powiązania i sposób działania. Łopátka jest dwustronnie obrabiana dzięki równoczesnemu zbliżaniu się elektrod 1. Źródłem napędu jest siłownik hydrauliczny 3, z regulowaną prędkością przemieszczenia tłoka, który poprzez układ krzywek i rolek 5, 6, 7 wywołuje ruch dosuwowy elektrod. Prędkość dosuwu w czasie obróbki jest stała i wynosi zależnie od nastawienia wstępnego od 0,15 do 0,50 mm/min. Warto zauważyć, że pomiar przesuwności narzędzi odbywa się poprzez czujniki zegarowe, które podają również aktualne położenie katod. Ten pośredni sposób pomiaru służy jednocześnie do określania wymiarów przedmiotu w czasie obróbki. Należy pamiętać, że omawiany schemat odnosi się do urządzenia prototypowego.

Ostatnim osiągnięciem w dziedzinie obróbki bezwiórowej jest stoisko, skonstruowane w firmie Rolls-Royce, pokazane na rys. 6. Jest to urządzenie czterokomorowe, gdzie każda komora może pracować niezależnie lub równocześnie z innymi. Urządzenie pracuje w cyklu automatycznym, a również sam proces obróbki sterowany jest automatycznie. Na rys. 6 po lewej stronie w szafie sterowniczej widać 4 panele, z których każdy steruje procesem jednej komory roboczej. Na rys. 7 pokazano schemat jednej komory omawianego urządzenia o nazwie Barmax. Zasada procesu w urządzeniu Barmax jest oczywiście identyczna, jak w urządzeniu Sifco. Istotnymi odchyleniami są parametry pracy oraz automatyzacja procesu. W urządzeniu Barmax zastosowano oryginalne sterowanie samym przebiegiem procesu, które można sprowadzić do rozwiązania trzech zagadnień: a) określenie wymiaru przedmiotu w czasie procesu, co pozwala na przerwanie pracy w momencie uzyskania żądanych wymiarów, b) zachowanie stałych parametrów pracy i c) usuwanie wszelkich produktów ubocznych, powstających w procesie. Jak wykazała praktyka, bezpośrednie pomiary przedmiotu w czasie obróbki byłyby szalenie trudne, a niekiedy wręcz niemożliwe, dlatego tę możliwość odrzucono. Ogólnie stosuje się pomiary pośrednie przez określanie położenia narzędzia. Ażeby pomiar taki możliwie dokładnie oceniał wymiary przedmiotu muszą być zachowane dwa warunki: niezmiennosc wymiarów narzędzia oraz stała i określona wartość szczeliny roboczej. Jak stwierdzono, katoda jest praktycznie niezniszczalna i pierwszy warunek jest spełniony. Dla spełnienia drugiego opracowano układ sterowania dosuwem narzędzia, który — posiadając sprzężenie zwrotne — pozwala na automatyczne utrzymywanie szczeliny w założonych granicach. Do układu sterowania doprowadza się wszystkie parametry mające wpływ na zmianę szczeliny, jak: zmiana temperatury i przewodności elektrolitu oraz zmiany parametrów prądowych w obwodzie roboczym. Wszystkie sygnały otrzymane stąd, po wzmocnieniu, przekazane są sprzężeniem zwrotnym do serwowzmacniacza i następnie do silnika sterującego dosuwem katod. Ciekawie rozwiązano również sprawę usuwania zanieczyszczeń, a szczególnie dużych ilości wodoru wydzielonego w czasie elektrolizy. Zrealizowano to poprzez przepompowywanie dużych objętości powietrza przez komory robocze oraz zastosowanie wyciągów w zbiornikach elektrolitu. To pociągnęło za sobą wprowadzenie kilku instalacji ochraniających niektóre urządzenia sterujące. Poza wymienionymi istnieją inne obwody, służące do oczyszczania elektrolitu i odprowadzania produktów odpadu. Poza automatyzacją czynności samego procesu wymienionych powyżej, istnieje również automatyzacja cyklu pracy sterująca czynnościami pomocniczymi, jak również prędkościami dosuwu i odsuwu przyspieszonego, włączaniem i wyłączaniem elektrolitu, opróżnianiem komory roboczej itp.

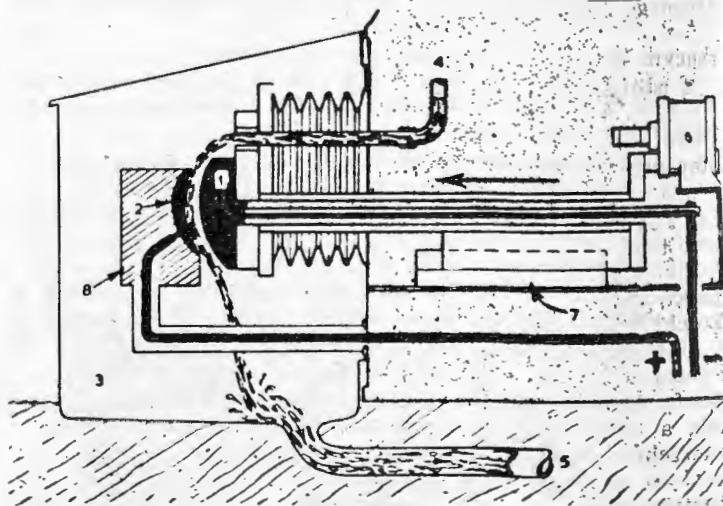
Drugą, specyficzną cechą urządzenia Barmax jest wielkość stosowanej szczeliny roboczej, a mianowicie zamiast powszechnie stosowanej 0,12 do 0,25 mm, stosuje się 0,25 do 0,76 mm, pozwala to na większe „obciążenie” elektrolitu, a jednocześnie zmniejszenie ciśnień robo-



Rys. 5. Schemat prototypowej maszyny Sifco; 1. Katody-narzędzia, 2. Dopływ elektrolitu, 3. Hydrauliczno-pneumatyczny mechanizm posuwowy, 4. Odpływ elektrolitu, 5. Główna krzywka posuwu, 6. Dźwignia poprzeczna, 7. Rolka posuwu, 8. Czujnik zegarowy położenia elektrod, 9. Prowadnice okrągłe, 10. Sprężyna powrotna, 11. Przewód podłączenia katody, 12. Przewód podłączenia anody (przedmiotu)



Rys. 6. Czterokomorowe urządzenie do obróbki elektrochemicznej z automatycznym sterowaniem procesu oraz cyklu, skonstruowane w firmie Rolls-Royce



Rys. 7. Uproszczony schemat jednej komory urządzenia Barmax: 1. Katoda-narzędzie, 2. Anoda-przedmiot obrabiany, 3. Komora robocza, 4. Dopływ elektrolitu, 5. Odpływ elektrolitu, 6. Serwomotor, 7. Prowadnice ruchu posuwowego, 8. Uchwyt z mas plastycznych

czych. Przy dokładnym sterowaniu szczeliną nie zmniejsza to dokładności wykonania przedmiotu. Sam dobór elektrolitu jest również bardzo istotną pozycją. Określenie cech „idealnego” elektrolitu jest łatwiejsze niż ich spełnienie. Podstawowe cechy to: długa żywotność, niska korozyjność, wysoka przewodność elektryczna, minimalna skłonność do parowania i niska cena. Najmniej korozyjne są słabe roztwory solne, poza tym są tanie, ale obciążone wadą tworzenia kryształów przy odparowaniu, co może zakłócić normalny cykl pracy, a poza tym mają nieco niższą wydajność (niska przewodność). Istnieje ogólna tendencja przy elektrolizie do tworzenia błonki na katodzie z rozpuszczonego metalu anody. Obniża ona dokładność wykończenia przedmiotu i dlatego musi być dokładnie kontrolowana. Duży wpływ na nią ma skład elektrolitu. Stosowanie elektrolitów silnie aktywnych chemicznie przyspiesza sam proces rozpuszczania metalu (działanie elektrolityczne i chemiczne), jednakże wymaga zwiększenia naddatków na obróbkę, gdyż przy tym samym zagłębieniu elektrod odtworzenie kształtu katody jest mniejsze dla elektrolitów silnie aktywnych (zwiększa się udział trawienia chemicznego) niż dla elektrolitów słabych.

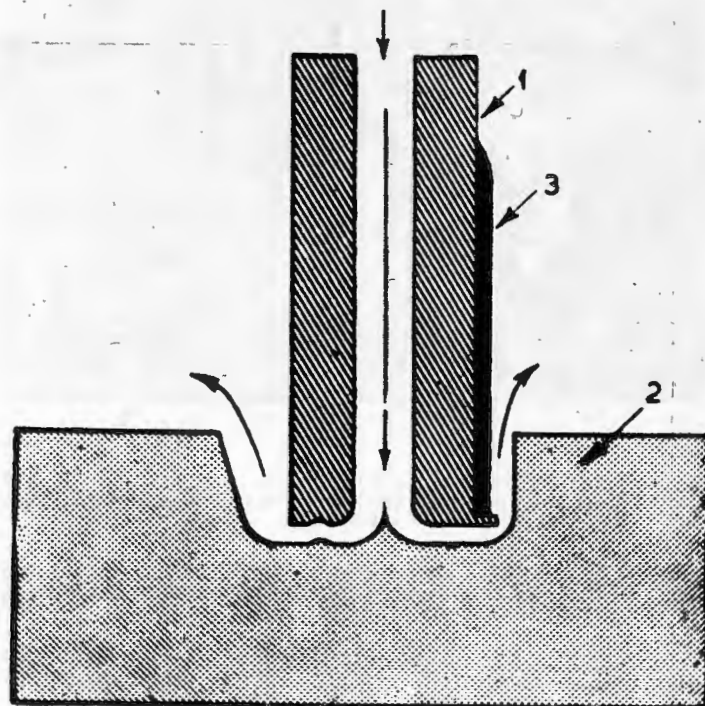
Bez względu jednak na aktywność elektrolitu, wszystkie elementy stykające się z nim muszą być wykonane z materiałów odpornych na korozję. Katody wykonuje się zasadniczo ze stali nierdzewnej, chociaż czasami stosuje się również brązowe i miedziane. Takie elementy jak: pompy, zawory, filtry, przewody wykonuje się ze stali nierdzewnej lub innych materiałów odpornych na korozję. Zawory, zwykle typu przeponowego, wykonane są z żeliwa i pokryte szkłem wodnym. Zbiornik elektrolitu wykonany ze zwykłej stali, pokryty jest warstwą żywicy epoksydowej, na którą nałożono płytki z polichlorku winylu. Sam uchwyt do mocowania przedmiotu wykonany jest z tworzyw sztucznych, mocowany następnie na kółkach komory roboczej. Należy tu zwrócić uwagę na konieczność osłaniania wszystkich powierzchni, na których nie powinna zachodzić elektroliza. Powierzchnię tę osłania się zwykle przez naniesienie warstwy żywicy epoksydowej. Do pełnego obrazu urządzenia Barmax należy jeszcze podać kilka parametrów konstrukcyjnych i technologicznych. W urządzeniu tym zastosowano pompę odśrodkową, pracującą przy ciśnieniu 4,9 do 5,6 kG/cm² i wydatku 455 l/min. Maksymalny prąd w jednej komorze dochodzi do 1000 A. Zakładając średnią wydajność charakterystyczną 0,00131 G/min, gęstość prądu 7,7 A/cm² i powierzchnię roboczą 129 cm², uzyskuje się wydajność w jednej komorze 1,64 cm³/min.

W zakładach Rolls-Royce obróbkę elektrochemiczną przeprowadza się na odkuwkach półprecyzyjnych przy naddatkach około 1 mm. W tym układzie dwie komory obrabiają stronę wklęsłą, a dwie wypukłą. W ten sposób obróbka pełnego profilu łopaty trwa około 5 min. (2 cykle, po 10 minut — dają 4 gotowe łopaty).

Gładkość obrobionej powierzchni $Ra=0,12-0,25 \mu$. Na powierzchni przedmiotu pozostaje czarna błonka łatwo usuwalna przez przetarcie sukniem. Dla łopatek bandażowych obróbkę profilu wykonuje się w dwu zabiegach: a) obróbka profilu właściwego — zostawiając około 3 mm od zamka i od bandaża i b) pozostałe odcinki profilu i powierzchnie przejść. Producenci i użytkownicy nie stwierdzili żadnych kłopotów z utrzymaniem dokładności. Jedynie dla dokładnych profili wprowadzono korektę kształtu katody z uwagi na charakter przepływu elektrolitu. Przepływ ten dla powierzchni aerodynamicznych jest laminarny i wymaga niewielkiej korekty katody. Natomiast przy występowaniu gwałtowniejszych zmian kształtu korekta jest znacząca. Wprowadza się ją przez zastosowanie obróbki elektrochemicznej do wykonania matryc-elektrod z łopaty wzorcowej. Zabieg ten wykonuje się na mniejszym stoisku. Stoisko Barmax nadaje się również do wykonywania otworów o dowolnych kształtach, jak również do wycinania (trepanowania) dowolnych elementów. Przy pracy czterech komór pozwala to na wydajność do 50 G/min.

Drugą obszerną dziedziną zastosowania obróbki elektrochemicznej jest drażnienie i wycinanie otworów. Zasada procesu pokazana jest na rys. 8. Strzałki pokazują kierunek przepływu elektrolitu. Z rysunku widać rolę i potrzebę osłony dielektrycznej. Dzięki zastosowaniu osłon możliwe jest wykonanie otworów okrągłych i kształtowych z powierzchniami równoległymi do osi (rys. 9).

Z kąta prostego u podstawy widać, że nie występuje zużycie katody. Dzięki tej technice istnieje chyba jedyna, technicznie uzasadniona możliwość wykonania otworów w materiałach trudnoskrawalnych lub całkowicie nie-



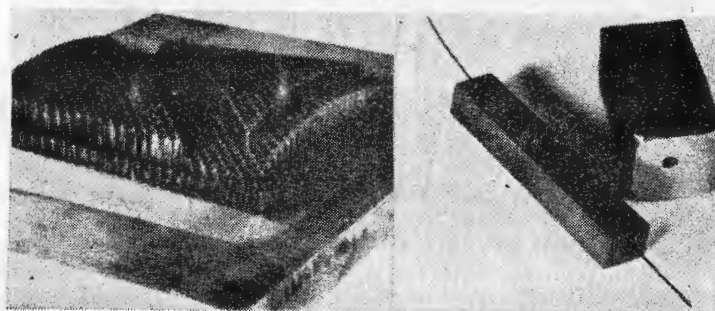
Rys. 8. Podstawowe elementy przy drażnieniu elektrolitycznym; 1. Narzędzie-katoda, 2. Przedmiot-anoda, 3. Ciśniona-dielektryk

skrawalnych. Przykłady takich prac podaje rys. 10; jeden przykład, to technicznie trudny do wykonania otwór, gdzie stosunek długości do średnicy otworu jest bardzo duży, a drugi — to pracochłonny przedmiot o wielu kształtowych otworach z potrzebą ich dokładnego ogra-



Rys. 9. Okrągłe i sześciokątne otwory wykonane drogą drażnienia elektrochemicznego

Rys. 10. Przykłady wyników obróbki elektrochemicznej, trudnej lub wręcz niemożliwej do wykonania inną techniką; a. Przykład wiercenia głębokiego. Średnica otworu 0,5 mm, a — długość 25 mm. W otworze tkwi elektroda-rurka, b. Ułownica wykonana w stali nierdzewnej drogą drażnienia elektrochemicznego



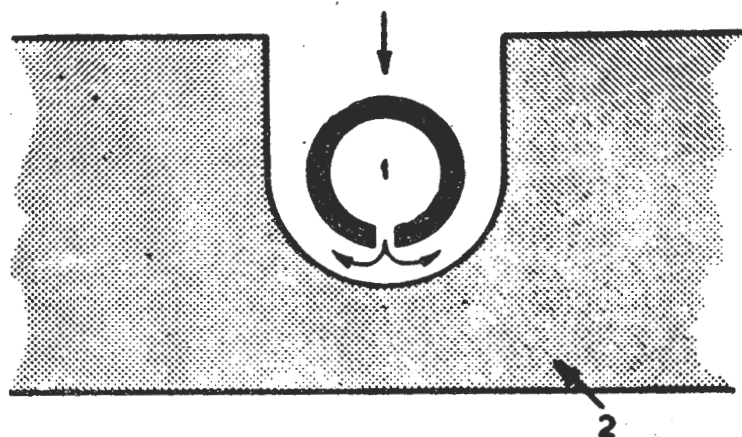
dowania. Do wiercenia otworów stosuje się zwykle rurki, przez które doprowadza się pod ciśnieniem elektrolitu, wypływający następnie kanałem pierścieniowym, utworzonym między zewnętrzną powierzchnią rurki

cieplnej). Jednostkowa wydajność objętościowa zmienia się w stosunkowo niewielkich granicach, jak to informuje tabela, a poza tym „obrabiwalność” elektrochemiczna nie pokrywa się zupełnie z obrabiwalnością mechaniczną.

Tabela 1

Elektrochemiczny równoważnik obrabiwalności metali wchodzących najczęściej do stopów jako składniki, wyrażony w cm^3/min przy $I = 1000 \text{ A}$

Pierwiastek	Symbol	Teoretyczna wydajność objętościowa cm^3/min przy $I = 1000 \text{ A}$
Beryl	Be	1,5404
Chrom	Cr	2,2450
Cyrkon	Zr	2,1795
Glin	Al	2,0975
Kobalt	Co	2,0484
Miedź	Cu	2,1959
Molibden	Mo	1,9501
Nikiel	Ni	2,0484
Niob	Nb	3,3593
Tantal	Ta	1,6879
Tytan	Ti	2,1795
Wolfram	W	1,9828
Żelazo	Fe	2,1959



Rys. 11. Zasada przecinania i wykrawania elektrolitycznego za pomocą przeciętej rurki. Wnętrzem rurki doprowadzany jest elektrolit

i powierzchnią otworu. Tą techniką wykonuje się nawet otwory poniżej 0,5 mm średnicy. Prostoliniowość otworów zależna jest tylko od prostoliniowości samej rurki.

Różnica między średnicą zewnętrzną rurki i średnicą otworu jest funkcją napięcia. Prędkość zagłębiania w większości przypadków sterowana jest przepływem elektrolitu. Przy wierceniu otworów 0,5 mm średnicy natężenie prądu wynosi od 1–2 A. Dla większości przypadków możliwe jest utrzymanie prędkości zagłębiania 0,15 do 0,20 mm/min dla otworów do średnicy 0,75 mm. Dla średnic powyżej 1,5 mm prędkość zagłębiania sięga 0,75 mm/min. Z uwagi na uniwersalność stoisk obróbki elektrochemicznej zarówno do obróbki profilowej, jak i do wiercenia, zakres dysponowanej prędkości dosuwu katody wynosi od 0–1500 mm/godz. Do wycinania kształtów stosuje się zwykle rury o potrzebnym zarysie. W niektórych przypadkach korzystniej jest użyć metody podaną ideowo na rys. 11. Przez przeciętą rurkę (katoda-narzędzie) doprowadza się elektrolit, wypływający szczeliną i opływający rurkę po powierzchni zewnętrznej. Rurka w miarę rozpuszczania przedmiotu zagłębia się z odpowiednią prędkością. Sposób ten można stosować zarówno do wycinania, jak i przecinania.

Zastosowania obu procesów obróbki elektrochemicznej są bardzo obszerne już w chwili obecnej, a perspektywy ich ciągle rosną. Obecnie najpoważniejszą dziedziną zastosowań jest obróbka profilowa powierzchni kształtowych z materiałów trudnoobrabialnych. Jednakże w pewnych przypadkach jest ona również opłacalna dla innych rodzajów materiałów. Konkretne zastosowanie to obróbka piór łopatek turbinowych z materiałów trudnoobrabialnych, obróbka matryc i ich renowacja itp. W wielu przypadkach uzyskuje się bardzo dobre efekty ekonomiczne na przykład wykonanie grawiury matrycy łopatkowej z pełnego klocka w stanie zahartowanym, przy maksymalnym zagłębieniu 15 mm wynosi 55 minut, podczas gdy metodami tradycyjnymi około 5 godzin. Należy tu jeszcze uwzględnić wyeliminowanie obróbek ręcznych, jak gradowanie, polerowanie itp. Przy renowacji matryc zyski są znacznie większe, gdyż całą obróbkę przeprowadza się w stanie zahartowanym.

Inne szerokie zastosowanie, to wszelkiego rodzaju drążenia i wykrawania przy materiałach trudnoobrabialnych, a nawet dla normalnie skrawalnych. Potrzeba stworzenia tej metody była koniecznością wypełnienia luki w możliwościach technologicznych w odniesieniu do niektórych typów materiałów i niektórych typów przedmiotów. Jednakże obecne możliwości znacznie przerosły założenia. Dla wyrobienia sobie lepszego poglądu należałoby przeprowadzić krótką analizę techniczną i ekonomiczną obróbki elektrochemicznej na tle konwencjonalnych sposobów obróbki.

Obróbka elektrochemiczna jest całkowicie niezależna od twardości i wytrzymałości materiału oraz od jego stanu strukturalnego (od rodzaju zastosowanej obróbki

na. Jak widać z tabeli, „obrabiwalność” elektrochemiczna chromu, kobaltu, miedzi, żelaza, aluminium i innych jest niemal identyczna. Wydajność całkowita jest zależna wprost proporcjonalnie od gęstości prądu. Stąd już prosty wniosek, że dla materiałów trudnoskrawalnych opłacalność obróbki elektrochemicznej rośnie. Jednakże nawet dla materiałów dobrze skrawalnych w pewnych przypadkach obróbki kształtowej opłaca się stosować nową metodę, z uwagi na jej inne zalety. Należy jeszcze pamiętać, że wydajność obróbki elektrochemicznej dla stopów powstałych z pierwiastków według tabeli nie różni się wiele od podanej w tabeli dla pierwiastków (składników) oraz że sprawność całkowita procesu w praktyce wynosi od 80 do 90%, a niekiedy i wyżej.

Największe korzyści ekonomiczne uzyskuje się przy małych seriach produkcyjnych rzędu 15–20 szt. Trzeba tylko pamiętać o możliwości stosowania elektrod łączonych, to jest sam kształt wykonany z miedzi lub brązu, a pozostałe elementy, jako trwałe wymienne — ze stali nierdzewnej. Ekonomiczne uzasadnienie stosowania obróbki elektrochemicznej również w produkcji wielkoseryjnej wiąże się z innymi zaletami tego procesu, a mianowicie:

- niezależność wydajności od stanu materiału i jego twardości,
- proces odbywa się w niskiej temperaturze, bez iskry i łuku elektrycznego, co oczywiście likwiduje niebezpieczeństwo zmian strukturalnych materiału (szczególnie powierzchniowych) oraz pęknięć,
- niewystępowanie żadnych sił skrawania (poza ciśnieniem elektrolitu — stosunkowo niskim i równomiernie rozłożonym), co eliminuje niebezpieczeństwo wprowadzenia naprężeń powierzchniowych, a więc i odkształceń — możliwość wykonywania przedmiotów wiotkich w jednej operacji na gotowo,
- obróbka jest bezgradowa,
- obróbka gwarantuje wysoką gładkość rzędu $Ra = 0,7-1 \mu (\Delta 7)$, a dla stopów na bazie niklu $0,12-0,25 \mu (\Delta 9)$ i to przy maksymalnej wydajności (w przeciwieństwie do obróbki elektroiskrowej i mechanicznej),
- narzędzie jest niezniszczalne,
- proces nadaje się do pełnej automatyzacji,
- wysoka dokładność — normalnie 0,02–0,05 mm, a przy zwiększonej uwadze 0,01 mm.

Dzięki tym zaletom, jedna operacja obróbki elektrochemicznej może zastąpić nawet cały proces, składający

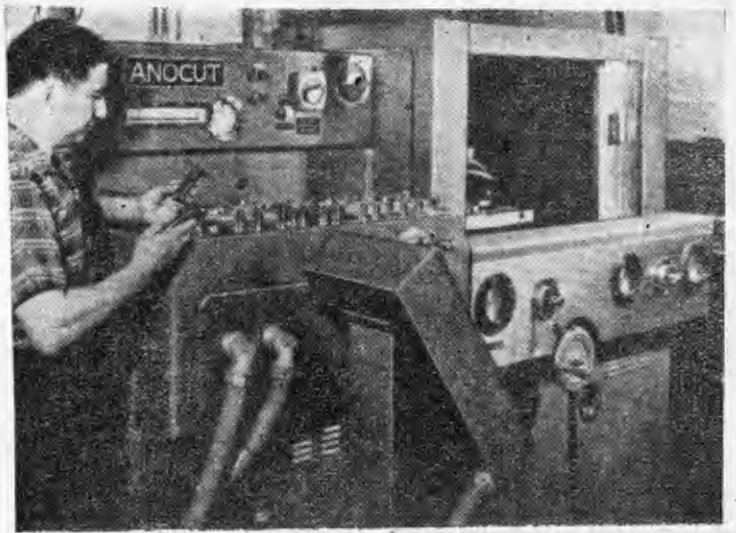
się z kucia, dwukrotnego frezowania, szlifowania, gradowania i polerowania. Do wad tej metody należą: konieczność instalowania potężnych źródeł prądu stałego, drogie elementy konstrukcyjne stoisk (stale nierdzewne, pokrycia z mas plastycznych i żywic epoksydowych na elementach metalowych, trwałe elektrody, złożone instalacje hydraulicznego i elektronicznego sterowania szczeliną), a przynajmniej zabezpieczające przed zwarciem.

Mimo tych wad metodę należy uznać w pewnych przypadkach produkcji za jedyną, a w innych za najbardziej ekonomiczną i elastyczną w zastosowaniu.

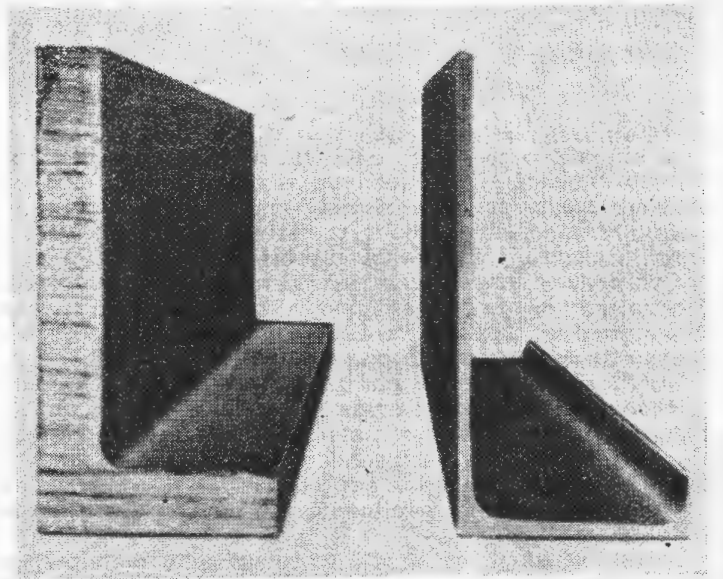
Dla uzupełnienia obrazu stanu obróbki elektrochemicznej należy wspomnieć o osiągnięciach amerykańskiej firmy „The Anocut Engineering Co.” w Chicago. Wykonuje ona maszyny trzech typów: a) do drążenia profilowego, b) tokarki do obróbki elektrochemicznej, c) szlifierki.

Drążarki elektrochemiczne (do wykonania elementów kształtowych, otworów i wycinania), jak pokazano na rys. 12, wykonuje się z regulacją prądu 50 do 10 000 A oraz zabezpieczeniem przeciw zwarciom i układem elektronicznym, utrzymującym zadany stan napięcia prądu roboczego. W firmie tej stwierdzono, że optymalna prędkość zagłębienia wynosi 6,4 do 7,7 mm/min, chociaż w warunkach laboratoryjnych uzyskano nawet 25 mm/min przy dobrej sprawności. Firma w tej dziedzinie ma duże doświadczenie i wykonuje szereg różnorodnych prac. Jedną z takich nietypowych jest elektrolityczne wyciskanie, pokazane na rys. 13. Inny przykład to obróbka wielopozycyjna i wieloelektrodowa, potrzebna dla wykorzystania mocy stoiska przy pracy na optymalnych prędkościach zagłębienia. Drugi typ maszyn reprezentują tokarki, służące do obróbki symetrycznych kształtów złożonych o ciasnych tolerancjach. Można również toczyć, wycinać i wiercić. Działa ona na identycznej zasadzie co i drążarka elektrochemiczna. W przypadku wyłączenia obrotów wrzeczona staje się drążarką. Chwilowo dostępny jest jeden typ tej maszyny o maksymalnym natężeniu 3000 A. Obróbka średnic do 495 mm i przesuw do 100 mm.

Trzeci rodzaj to szlifierki elektrochemiczne. Tego typu maszyn istnieje cały szereg odmian. Konstrukcyjnie, od normalnych szlifierek, różnią się poza materiałem odpornym na korozję, również rodzajem narzędzia. Tarcze stanowi metalowy krążek, pokryty cienką, rzadką warstwą ziarna ściernego. Wrzeczono tarczy, osadzone w izolowanych łożyskach, podłączone jest do ujemnego bieguna prądu stałego i tworzy katodę. Stół i pozostałe elementy, łącznie z przedmiotem szlifowanym, podłączone do bieguna dodatniego stanowią anodę. Elektrolit doprowadzany jest specjalną dyszą z instalacji, normalnie służącej do dostarczania chłodziwa. Stałość szczeliny gwarantuje warstwa ścierna, a przestrzenie między ziarnami stanowią kanały przepływowe elektrolitu. Maszyna taka pracuje jak normalna szlifierka, z tym, że występuje jednocześnie ściernie mechaniczne (normalne szlifowanie) i rozpuszczanie elektrolityczne. Przy prawidłowych parametrach udział pracy elektrolitycznej wynosi 90% i więcej, co czyni proces ten bardzo przydatnym do ostrzenia narzędzi z węglików i stali szybko tnącej oraz dokładnych powierzchni profilowych. Stwierdzono, że optymalne warunki pracy panują przy dużej powierzchni styku. Tam, gdzie nie można doprowadzić do dużego kontaktu, stosuje się zwiększenie napięcia, aż do stanu nieco poniżej występowania łuku. Trzeba tu bowiem pamiętać, że w warunkach pracy elektrolitycznej obowiązuje również prawo Ohma. Wielkość posuwu przy szlifowaniu płaszczyzn zależy od głębokości skrawania w stosunku odwrotnie proporcjonalnym i wynosi dla $g=0,025$ mm — 25 mm/sek, a dla $g=0,25$ mm — 2,5 mm/sek. Optymalna prędkość obwodowa tarczy wynosi 25 m/sek. Dla usuwania cząstek metalu z tarczy stosuje się odwrócenie procesu przez zmianę bieguności. Szlifierkę do ostrzenia głowic z ostrzami z węglików spiekanych przedstawia rys. 14. Zastosowano tu stół magnetyczny do mocowania przedmiotów. W jednym przejściu zdejmuje się 0,13 do 0,2 mm. W stosunku do szlifowania konwencjonalnego zmniejszono zużycie ścierniwa ponad 80% i zlikwidowano uszkodzenia i pęk-

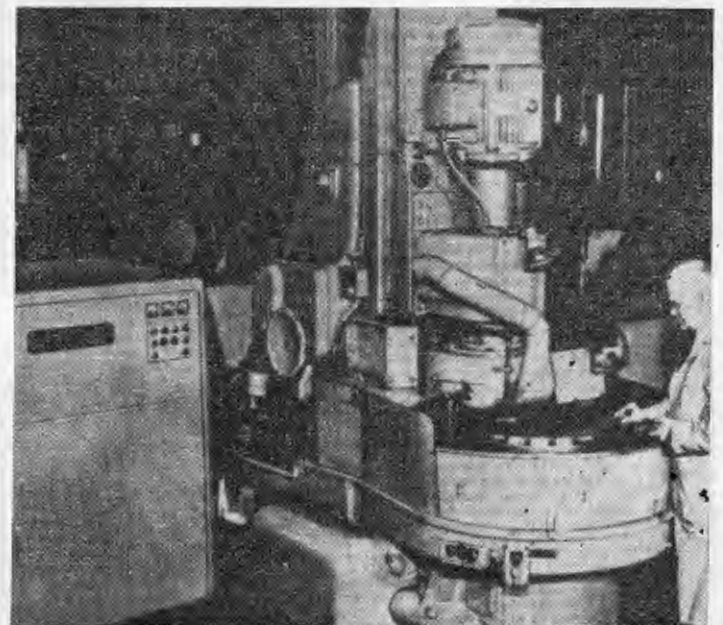


Rys. 12. Obrabiarka elektrochemiczna firmy Anocut. Pokazano wyrób łopatek turbinowych typu bandażowego. Cała łopataka wykonana jest w ciągu 12 minut w porównaniu z 3—4 godzinami przy metodach konwencjonalnych. Wykonanie wieluset łopatek nie wymagało zmiany narzędzia (kształtowej katody)



Rys. 13. Przykład przedmiotu „wyciskanego” elektrolitycznie. Po lewej stronie materiał wyjściowy. Po prawej — gotowy profil, doprowadzony do grubości 0,75 mm z tolerancją 0,025 mm. Prędkość przesuwu w czasie procesu wynosiła 12,7 mm/min

Rys. 14. Adaptacja szlifierki karuzelowej do elektrochemicznego ostrzenia głowic frezarskich z nożykami z węglików spiekanych. Dopływ elektrolitu — widoczna na zdjęciu dysza



nięcia ostrzy przy szlifowaniu. Uwzględniając tylko przedstawiony fragmentarycznie asortyment urządzeń oraz kilkuletni zaledwie okres rozwoju tej metody, wiadać burzliwy wzrost zapotrzebowań i opracowań. Odnosi to się szczególnie do przemysłów stosujących nowe, trudnoobrabialne materiały, integralne konstrukcje oraz wysokie dokładności. Nic też dziwnego, że w tej bezwzględnej metodzie, w najwyższym stopniu partycypuje przemysł lotniczy.

1. Barmax fully-automatic electrochemical metal forming machine, Machinery, Nov. 28/1962
2. Electrochemical machining, Aircraft Production 2/1961
3. Electrochemical machining, Aircraft Production 12/1962
4. Electrochemical profiling, Aircraft Production 1/1963
5. Electrolytic machining, Aircraft Production 7/1962
6. Electroshaping, Aircraft Production 3/1961
7. Steer A. T. Electromachining and superfinishing as production tool, Electroplating 7/1954
8. Williams L. A. Electrolytic machining, Aircraft Production 10/1960.

Mgr inż. ANDRZEJ STEFKO
Politechnika Warszawska

621.984.33

Wyoblanie metali ze stałą i zmienną grubością ścianki

W artykule omówiono unowocześniony proces konwencjonalnego wyoblania i zastosowanie w przemyśle. Omówiono podstawy teoretyczne wyoblania ze zmianą grubości materiału, wpływ na własności materiału, maszyny stosowane przy tym procesie, podano przykłady zastosowania i łączenie wyoblania z innymi procesami obróbki.

Wyoblanie, jako proces nadawania kształtu brył obrotowych blachom, było jednym z pierwszych procesów obróbki plastycznej na zimno. Proces ten polegał na zmianie kształtu bez zmiany grubości materiału wyjściowego, z cienkiej płaskiej blachy do kształtu drewnianego wzornika, umocowanego we wrzecionie wyoblarki lub tokarni. Krążki blachy, dociśnięte konikiem do wzornika, przybierają jego kształt na skutek układania się materiału we wzorniku pod działaniem stalowego narzędzia, przy ciągłych obrotach wrzeciona. Narzędzie prowadzone jest ręcznie przez robotnika. Wymaga to dużego doświadczenia, gdyż materiał swobodnie obracający się jest niestateczny i ma tendencję do fałdowania obwodu w czasie wyoblania. Proces ten wymaga również przyłożenia znacznej siły, co jest wyczerpujące dla robotnika.

Liczne udoskonalenia, jak wprowadzenie metalowych wzorników, pozwoliły zwiększyć gładkość materiału od strony wzornika, a zastąpienie wyoblarki rolką w oprawce zmniejszyło siłę przesuwu i zredukowało poważnie tarcie w punkcie styku narzędzia z blachą. Wyoblanie to przetrwało do dziś i jest stosowane w małych warsztatach oraz w produkcji prototypowej.

Zakłady przemysłowe zastąpiły ten proces w produkcji seryjnej przez tłoczenie blach na prasach, co znacznie skróciło czas obróbki.

Szybki rozwój techniki spowodował wprowadzenie nowych konstrukcji o wyższych wymaganiach, szczególnie w przemyśle lotniczym. Elementy konstrukcji typu stożków okazały się technologiczne dla zmodyfikowanego procesu wyoblania mechanicznego. Wymagania wyższych własności mechanicznych również zapewnia ten proces, przez umocnienie materiału wskutek zgniotu. Wysokie wymagania geometryczne powierzchni zapewniono przez dokładność wzorników i mechaniczne sterowanie rolki kształtującej.

Dla konwencjonalnego wyoblania ze stałą grubością wprowadzono automaty o wydajności ekonomicznej dla dużych serii. Przykłady części wykonywanych automatycznie pokazano na rys. 1. Wydajność godzinowa wynosi 150÷800 szt/godz., co jest ekonomiczne dla serii od kilku do kilkuset tysięcy części o wymiarach do 100 mm. Duże części o wymiarach do 1500 mm wyobla się na specjalnych pionowych wyoblarkach (rys. 2) z hydraulicznym dociskiem rolki. Maszyny te przeznaczone są do wyoblania czasz, den kotłowych, elementów zbiorników i podobnych urządzeń. Zbiorniki z tytanu mogą być kształtowane w stanie podgrzanym, gdyż materiał umożliwia duże odkształcenia. Proces ten jest coraz częściej zastępowany podobnym procesem, przy którym zachodzi zmiana grubości.

Wyoblanie ze zmianą grubości określane jest w literaturze wieloma nazwami, jak „power spinning”, „hydrospinning”, „flow-turning”, „flow-forming”, „roll-flowing”, „roll-forming”, określającymi ten sam proces.

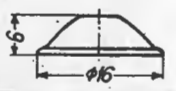
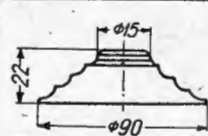
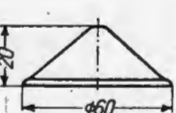
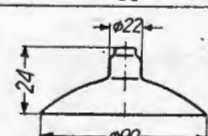
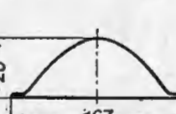
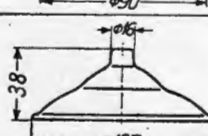
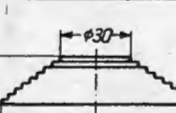
Ten rodzaj wyoblania charakteryzuje się zamierzoną i z góry określoną zmianą grubości ścianki, przy niezmiennym średnicy materiału przed i po obróbce. Zasady te nie obowiązują przy zwykłym wyoblaniu.

Końcowa grubość ścianki przy wykonywaniu stożków jest zależna jedynie od grubości materiału wyjściowego i od kąta wierzchołkowego stożka α . Zmiana kształtu i grubości przebiega według zasady pokazanej na rys. 3. Element materiału wyjściowego (gęsto zakreskowany) zostaje rzutowany na powierzchnię stożka ruchem równoległym do osi obrotu wzornika. Zmiana grubości z g_0 na g_1 zachodzi zgodnie z równaniem (rys. 3b):

$$g_1 = g_0 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \quad [1]$$

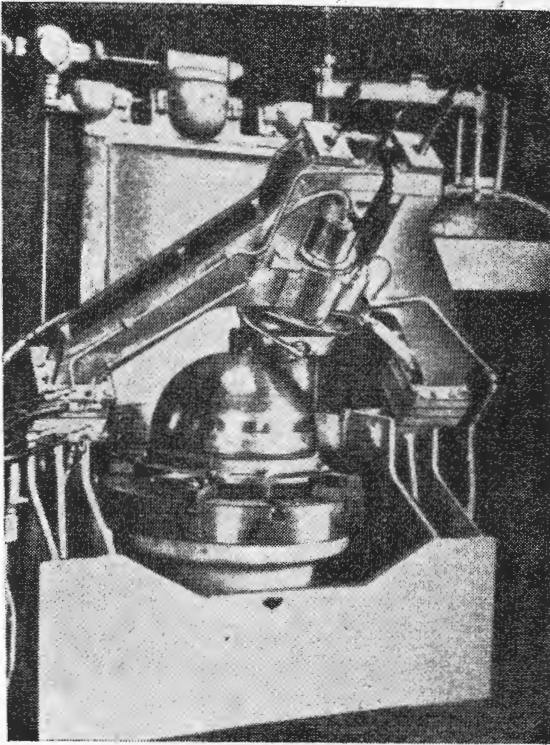
gdzie: g_0 — grubość materiału wyjściowego,
 g_1 — grubość ścianki po procesie.

Średnica materiału wyjściowego D pozostaje stała i jest równa największej średnicy gotowej części. Zasa-

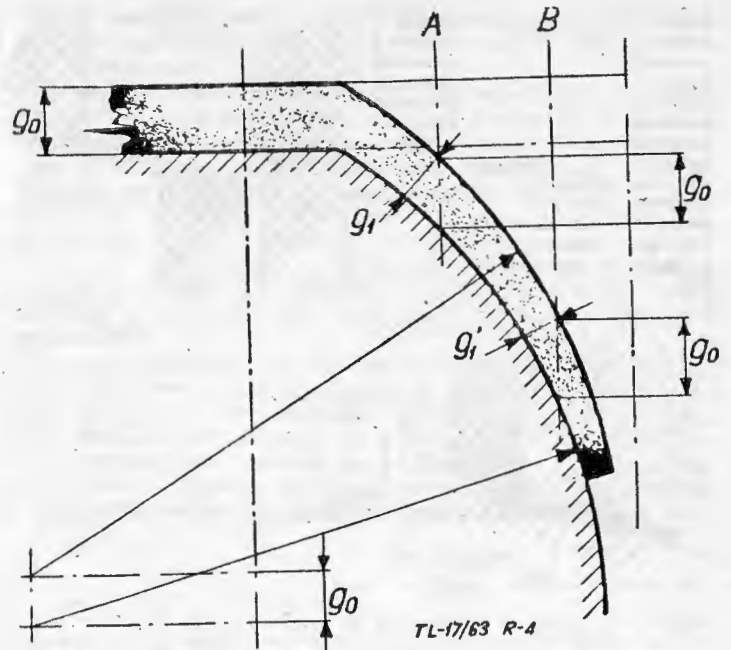
Kształt przedmiotu	szt/godz.	seria	Kształt przedmiotu	szt/godz.	seria
	800	200 000		200	20 000
	500	300 000		200	5 000
	400	20 000		150	5 000
	300	35 000			

Rys. 1. Tabela wydajności i wielkości wykonywanych serii

da niezmienną wielkość g_0 jest słuszna również dla figur obrotowych stożkowych o tworzącej krzywoliniowej. Wówczas, przy zmiennym kącie α zmienia się końcowa



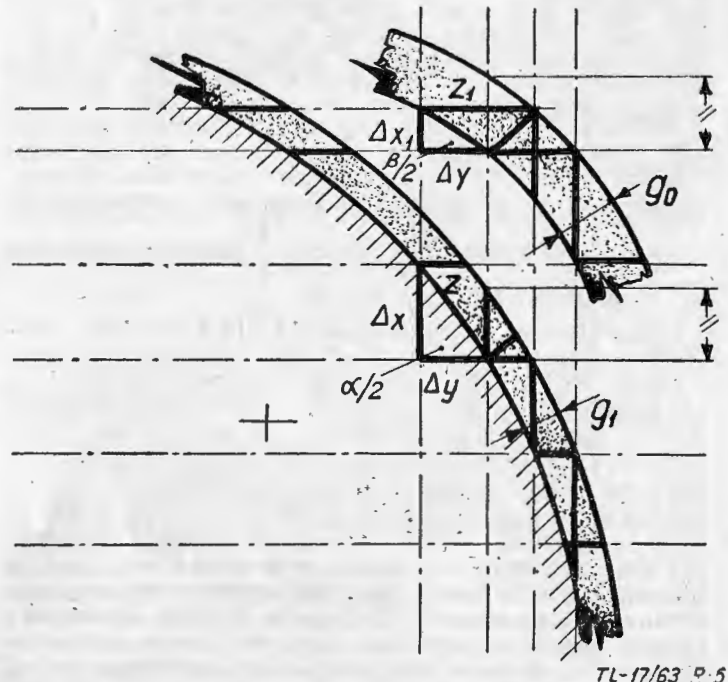
Rys. 2. Pionowa wyoblarka z hydraulicznym sterowaniem i dociskiem rolki



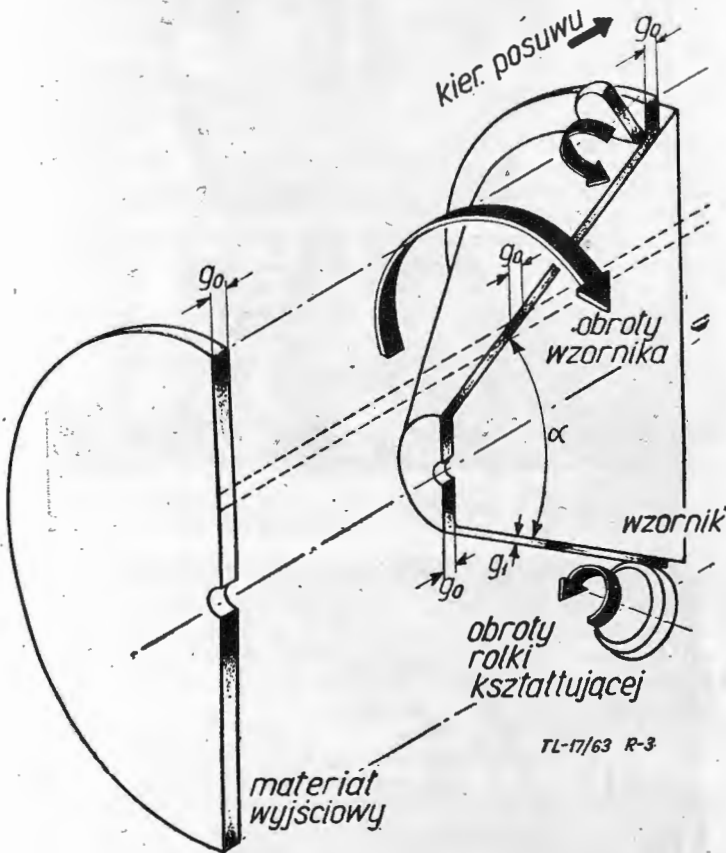
Rys. 4. Beczkowaty kształt wykonany z płaskiego materiału wyjściowego o zmiennej grubości ścianki wzdłuż osi

przez odpowiednie przygotowanie materiału wyjściowego na drodze odkucia i obróbki skrawaniem, wytłoczenia na prasie lub odlewu. Dla parabolicznych części o nieprostoliniowej tworzącej i stałej grubości, materiałem wyjściowym może być wytłoczona czasza. W procesie tłoczenia blacha nie zmienia grubości ścianki, jednak zmienia się wielkość przekroju płaszczyzną równoległą do osi, co jest korzystne dla półfabrykatu do wyoblania. Sposób ten pokazany jest na rys. 5. Zależności geometryczne między wytłoczką a częścią gotową wyrażają się zależnościami:

$$g_1 = \frac{g_0 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\beta}{2}} \sin \frac{\beta}{2} = \frac{g_0}{g_1} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

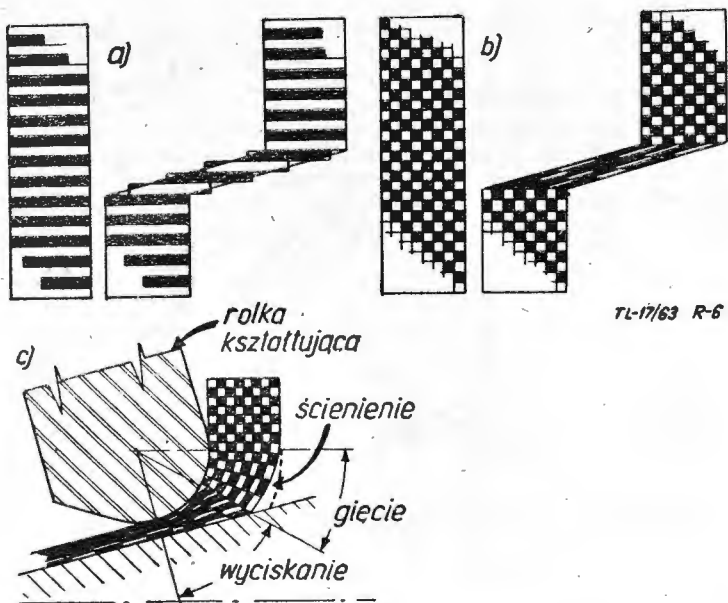


Rys. 5. Sposób wykonania części beczkowatej o stałej grubości ścianki w każdym miejscu. Jako półfabrykat zastosowano część tłoczona na prasie



Rys. 3. Zasada wyoblania ze zmianą grubości ścianki

grubość g_1 . Taki przypadek przedstawiony jest na rys. 4, gdzie rzuty A i B grubości g_0 dają różne grubości końcowe g_1 , a więc zmienia się grubość ścianki przedmiotu wzdłuż osi. W wielu przypadkach konstrukcja nie zezwala na różną grubość ścianek. W takich przypadkach warunek stałej grubości ścianki może być spełniony



Rys. 6. a. Model odkształcenia w warstwie wyoblanej ze zmianą grubości, zakładający osiowe przesunięcia cylindrycznych pierścieni wzdłuż osi; b. Obserwowany obraz płynięcia równoległe do osi stożka, podtrzymujący koncepcję wyciskania; c. Model najbardziej prawdopodobny uwzględniający gięcie i wyciskanie

$$\frac{\Delta Y}{Z_1} = \frac{g_0}{g_1} \cdot \frac{\Delta Y}{Z}$$

$$Z_1 = \frac{g_1}{g_0} \cdot Z$$

$$\Delta X_1 = \sqrt{Z_1^2 - \Delta Y^2}$$

Pocieniecie ścianek drogą odkształcenia plastycznego na zimno wywołuje efekt zgniotu i związaną z tym utratę własności plastycznych materiału. Redukcja grubości ścianki dla stożka o kącie wierzchołkowym 60° wynosi

50% , a dla stożka o kącie 30° ($\frac{\alpha}{2} = 15^\circ$) około 75% . Prak-

tycznie jest to największe ścienienie ścianki w jednym przejściu. Jeżeli wymagane są stożki o kącie wierzchołkowym poniżej 30° , to proces należy prowadzić dwu lub więcej stopniowo. Jako pierwszy stopień procesu możliwe jest wykonanie wstępnego stożka przez wytłoczenie lub przez wyoblanie ze zmianą grubości na stożek

o kącie $\frac{\alpha}{2} = 15^\circ$.

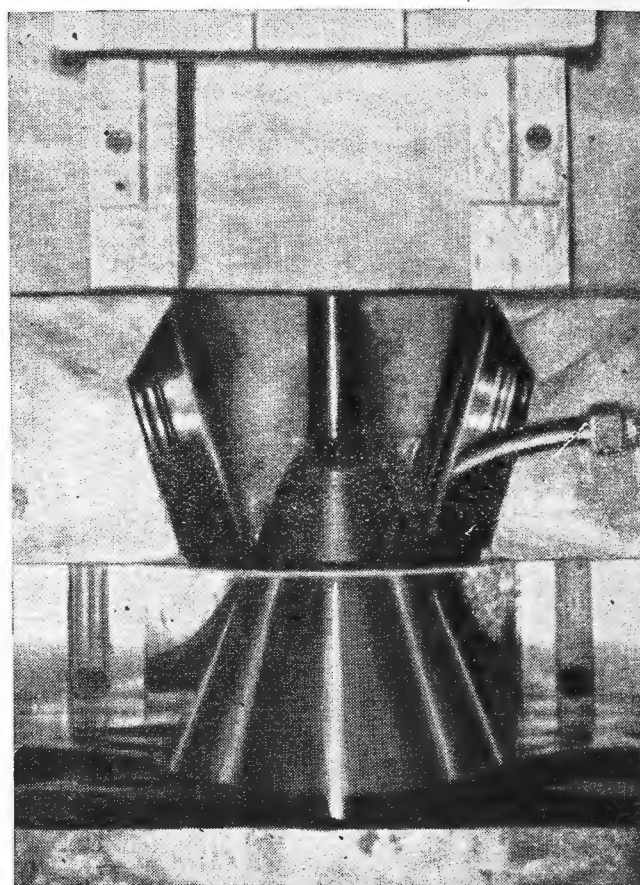
Drogą wyoblania ze zmianą grubości w kilku operacjach można otrzymać stożki o kącie wierzchołkowym 6° , przy czym w każdej operacji kąt $\frac{\alpha}{2}$ może być zmieniany co najmniej o 5° .

Odształcenia w procesie wyoblania ze zmianą grubości wykazują wiele analogii do wyciskania, ścinania i gięcia. Model odkształcenia (rys. 6a) przyjmuje ścinanie i przesunięcia osiowe cylindrów równoległych do osi. Jednak badania metalograficzne nie potwierdzają tego modelu. Orientacja krystalograficzna ziarn jest równoległa do ścianki stożka, a nie do osi obrotu, co nie jest zgodne z koncepcją osiowego ścinania. Tekstura ta wskazuje, że odkształcenie odbywa się przy udziale wyciskania metalu między płaszczyzną wzornika i rolki kształtującej. Model wyobrażający koncepcję wyciskania pokazany jest na rys. 6b. Koncepcja czystego wyciskania metalu również upada po zbadaniu strefy materiału przed rolką, która wykazuje ścienienie charakterystyczne dla gięcia. Uwzględniając gięcie otrzymuje się dostatecznie prawdopodobny model odkształcenia metalu podczas wyoblania ze zmianą grubości (rys. 6c). Odkształcenia obwodowe występują wskutek toczenia się

rolki po obwodzie. Siła obwodowa wynika z tarcia rolki o materiał oraz z przesuwania nieodkształconego jeszcze kołnierza wskutek posuwu rolki. Objawia się to jako skrócenie linii promieniowej o niewielki kąt. Nie ma to większego wpływu na wynik procesu, jednak przyczynia się do szybszego umocnienia materiału wyoblanego.

Maszyny

W rozwiązaniach obrabiarek do wyoblania ze zmianą grubości często spotyka się układ dwóch rolek kształtujących jednocześnie. Rozwiązanie takie daje osiowo symetryczny układ sił zmniejszający gięcie, a zastosowane zostało w układzie pionowym przez firmę Lodge and Shipley Comp. Rysunek 7 pokazuje, doprowadzony do połowy proces kształtowania dwiema rolkami na tej maszynie. Oś rolek roboczych ustawione są pod kątem 15° względem poziomu. Położenie to jest wykorzystywane przy większości prac na tej maszynie. Inne położenie rolek, gdy osie są tworzącymi stożka o kącie 60° , jest stosowane w specjalnych przypadkach, jak na przykład wykonywanie stożków o kącie $2\div 3^\circ$ lub cylindrów. Rolki wykonane są z szybko tnącej stali wanadowej o twardości $64\div 65$ HRC. Wzornik kształtujący ma twar-

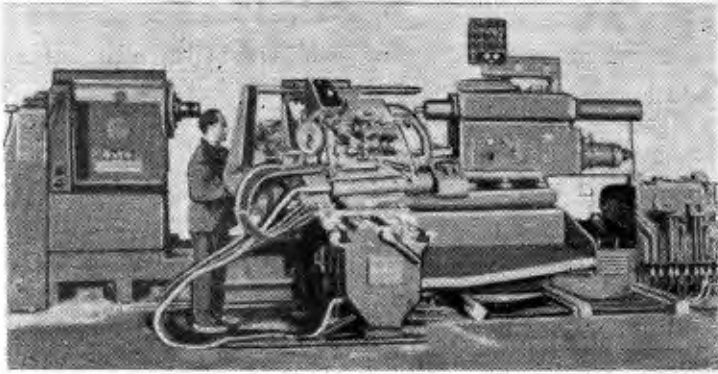


Rys. 7. Doprowadzony do połowy proces wyoblania stożka na pionowej wyoblarce

dość $60\text{--}62$ HRC i jest szlifowany. Napęd posuwów jest hydrauliczny. Obroty wrzeciona regulowane do 1200 obr/min, posuw do 300 mm/min. Wydajność około 120 szt/min średniej wielkości przedmiotów z miedzi. Największa średnica krążków do wyoblania 500 mm, przy grubości blach ze stali nierdzewnej lub ze stopów żaroodpornych do 4 mm, ze stopów lekkich i miedzi do 8 mm. Dokładność na grubości ścianki $0,9$ mm wynosi $\pm 0,05$ mm.

Częściej spotykane są maszyny do wyoblania pracujące w układzie poziomym. Jedną z większych maszyn tego typu przedstawia rys. 8. Ciężar własny wynosi 20 t, zajmuje powierzchnię $4,5 \times 7$ m. Moc zainstalowana 33 KW dla zasilania 10 silników do poszczególnych napędów.

Łoże ma poziomy przesuw hydrauliczny. Na wrzecionie głównym możliwe jest zainstalowanie uchwytu elek-

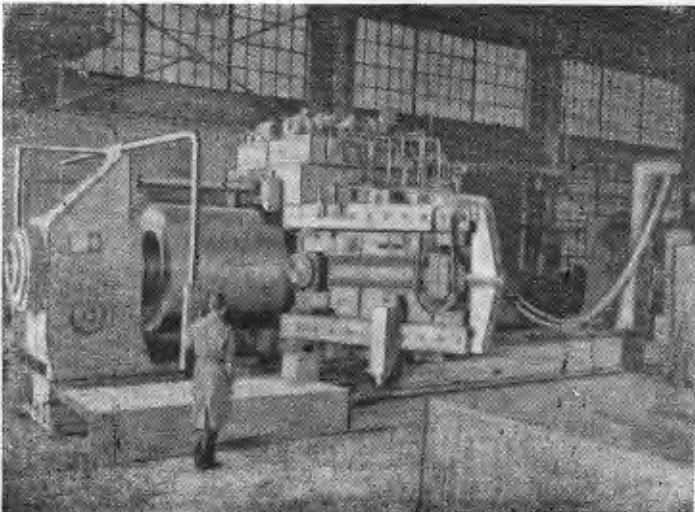


Rys. 8. Maszyna do wyoblania ze zmianą grubości. Moc zainstalowana 33 kW. Maks. średnica krążka wyjściowego 1500 mm

trycznego lub hydraulicznego. Konik dociskający napędzany i mocowany hydraulicznie. Suport zaopatrzony jest w hydrauliczny układ kopiujący według blaszanych szablonów. Ruch jałowy suportu jest szybki. Maszyna pozwala formować krążki do \varnothing 1500 mm przy długości przedmiotów nie większej niż 1000 mm, przy maks. grubości 15–18 mm z miedzi i do 8 mm ze stali.

Konstruktorzy raket balistycznych stawiają coraz wyższe wymagania. Płaszcze raket, dotąd wykonywane z wielu części i spawane, okazują się lepsze i dokładniejsze w wykonaniu integralnym. Jednak coraz większe wymiary raket wymagają coraz większych maszyn. Jedną z najnowszych i największych maszyn wykonano w USA w firmie Lodge and Shipley Comp (rys. 9), z przeznaczeniem głównie dla płaszczy raket o kształtach cylindrycznych i stożkowych. Koszt maszyny wyniósł ok. 87 000 £. Maszyna pozwala na wyoblanie ze zmienną grubością ścianki części o największych wymiarach 1829 mm średnicy i 2133 mm długości. Jeżeli kształtowanie przebiega w kierunku od wrzeciona, to docisk konikiem jest zbędny, gdyż materiał jest mocowany przy wrzecionie, a konik może być usunięty, przedłużając roboczą długość do 3555 mm. Największa grubość płyt do kształtowania wynosi 15,9 mm ze stali nierdzewnej, 19 mm z miękkiej stali. Materiały miękkie, jak aluminium, mogą mieć grubość do 32 mm. Dla kształtowania wielkość siły formującej wywieranej przez główny suport, przesuwany wzdłuż osi wrzeciona, wynosi 47 244 kG. Główny suport utrzymuje symetrycznie dwa boczne suporty z rolkami roboczymi. Każdy z tych suportów ma możliwość obrotu o 60° wokół pionowej osi i może wywierać nacisk rolki 31 500 kG. Konik dociska materiał do wzornika siłą 15 748 kG. Napęd obrotowy wzornika pochodzi od silnika o mocy 150 KM. Obroty te są regulowane w sposób ciągły od 40 do 80 obr/min, przy stałym momencie obrotowym, a od 80 do 320 obr/min, przy stałej mocy. Prędkość przesuwu suportu zmienna od 0–0,76 m/min, a przesuw szybki (jałowy) 1,83 m/min. Prawie wszystkie napędy są hydrauliczne i pracują przy maksymalnym ciśnieniu 105,4 atn. Ma-

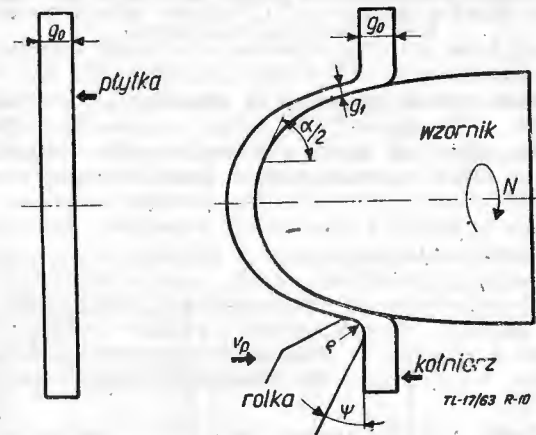
Rys. 9. Dwurołkowa maszyna do wyoblania w układzie poziomym; części o średnicy do 1829 mm i 2133 mm długości



szyna jest sterowana kopiowo. Ustawianie mikrometryczne kopiałów pozwala na wykonywanie płaszczy raket na gotowo.

Postęp w przemyśle silników tłokowych, turbinowych czy raketowych wyraża się między innymi w intensyfikacji procesów przemiany energii chemicznej na mechaniczną. Zmusza to do stosowania materiałów o coraz wyższej wytrzymałości w wysokich temperaturach i jednocześnie wysokiej odporności na działanie gorących, aktywnych gazów. Materiały, które te wymagania spełniają, są prawie zawsze trudnoobrabialne skrawaniem, a zawsze drogie. Te czynniki predestynują bezwzględnie obróbkę plastyczną jako najekonomiczniejszą dla tych materiałów.

Proces wyoblania ze zmianą grubości zawdzięcza szerokie możliwości kształtowania bardzo korzystnemu stanowi naprężeń w obszarze styku materiału z rolką i wzornikiem, zbliżonemu do trójosiowego ściskania. Taki stan naprężeń pozwala na odkształcenia z małym narażeniem na pęknięcie w czasie procesu nawet materiałów o stosunkowo niskiej plastyczności. Jednak każdy me-



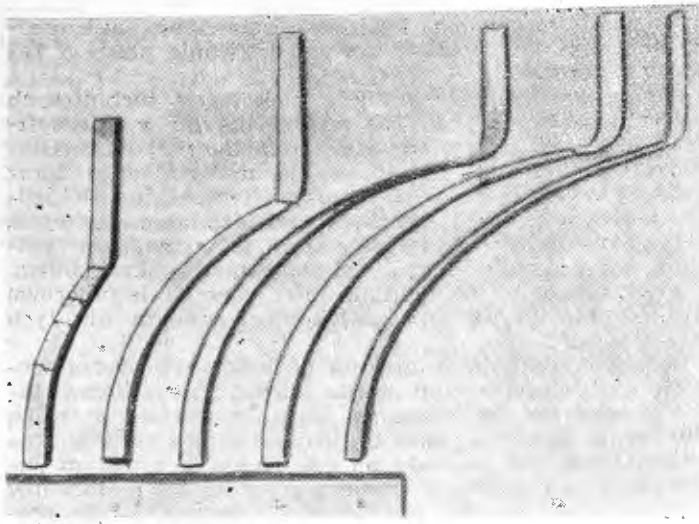
Rys. 10. Układ stosowany do badania materiałów pod względem przydatności do wyoblania

tal wskutek odkształceń plastycznych umacnia się. Efekt zgniotu powoduje wzrost własności mechanicznych z jednoczesną utratą własności plastycznych. Ta utrata plastyczności w procesie wyoblania ze zmienną grubością objawia się jako zerwanie materiału. Ważne jest więc określenie dopuszczalnego stopnia odkształcenia dla materiału o znanych własnościach. Badania zdolności do wyoblania prowadzone były przez Kalpakcioglu [3] na wzorniku w kształcie półelipsoidy (rys. 10) przy parametrach: grubość materiału wyjściowego 6,3 mm, prędkość obwodowa $0,075 \div 0,5$ m/min, obroty wzornika $200 \div 500$ obr/min, promień zaokrąglenia rolki $\rho = 6,35$ mm, kąt pochylenia rolki $\varphi = 26^\circ$. Przy kształcie elipsoidy grubość zmienia się w sposób ciągły według za-

leżności [1], przy czym $0^\circ \leq \frac{\alpha}{2} \leq 90^\circ$. Redukcja grubości ścianek wyraża się

$$R = \frac{g_0 - g}{g_0} \cdot 100\%$$

Próby prowadzone były dla różnych materiałów aż do zerwania. Obserwacja wyników wykazała, że najwyraźniejsza zależność zachodzi między redukcją R a przewężeniem przy rozciąganiu. Badania pęknięć (rys. 11) na różnych materiałach wykazują, że żeliwo (A) i aluminium 2024-T36 (B) pękają obwodowo, równoległe do osi, co pokrywa się z hipotezą przedstawioną na rys. 6a. Natomiast pozostałe materiały — C, D, E — pękają pod kątem nieznacznie większym niż 45° względem kierunku działania siły pochodzącej od posuwu. Te przełomy są podobne do pęknięć próbek przy rozciąganiu. Badania wykazały niewielki wpływ promienia zaokrąglenia rolki, kąta pochylenia rolki i prędkości obwodowej na zdolność wyoblania. Stwierdzono doświadczalnie i analitycznie, że minimalny kąt $\frac{\alpha}{2}$ stożka, jaki można otrzymać z płaskiej płyty w jednym przejściu wynosi około 15° .



Rys. 11. Próbkki zerwane przy próbie wyoblania: A — szare żeliwo, B — 2024-T36 aluminium, C — miedź zimno walcowana, D — 17-7.PH stal nierdzewna

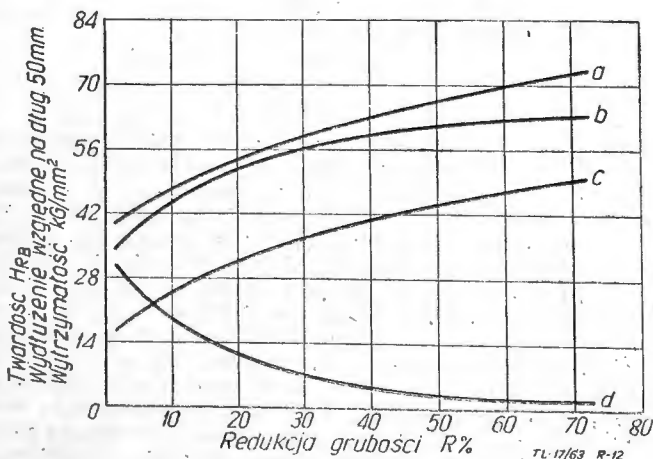
Większość metali pozwala na wyoblanie na zimno, co wywołuje efekt zgniotu. W wielu przypadkach jest to korzystne, gdyż tak obrabione części mają podwyższone własności. Jeżeli jednak proces kształtowania ma być dalej prowadzony, wymaga się obróbki cieplnej celem uzyskania nawrotu pierwotnych własności materiału.

Dla różnego stopnia zgniotu, którego kryterium jest zmniejszenie grubości ścianki R, można zbudować wykres zmiany własności mechanicznych, pokazujący charakter zmiany wytrzymałości, granicy plastyczności, twardości i wydłużenia charakteryzującego plastyczność materiału. Wykres taki dla mosiądzu przedstawiony jest na rys. 12.

Przykłady takich zmian własności zestawione są w tabeli dla stali stopowej, molibdenowej i chromowo-niklowej austenitycznej.

Materiały trudnoobrabialne — stale nierdzewne, stale niskowęglowe oraz stopy żaroodporne, jak Discaloy, Uniloy i Refractaloy, pozwalają na wyoblanie ze zmianą grubości. Czysty tytan może być kształtowany na zimno, jeżeli nie wymaga się dużej zmiany grubości. Większe odkształcenia można osiągnąć po wygrzaniu w temperaturze 540 °C. Stopy tytanu mogą być wyoblane w podwyższonej temperaturze do 590—595 °C.

Molibden i stopy molibdenu muszą być wyoblane w podwyższonych temperaturach. Temperatura ta zależy od grubości materiału wyjściowego. Zależność ta pokazana jest na rysunku 13 i obejmuje procesy: wyoblania ze zmienną i stałą grubością, ciągnięcia, tłoczenia, obciągania, wykrawania i cięcia. Molibden charakteryzuje się tendencją do fałdowania podczas wyoblania konwencjonalnego ze względu na wysoką sprężystość.



Rys. 12. Zmiana mechanicznych własności mosiądzu w zależności od redukcji grubości ścianki R, przy wyoblaniu ze zmianą grubości: a — granica wytrzymałości przy rozciąganiu, b — twardość; c — granica plastyczności; d — wydłużenie jednostkowe

Tabela 1

Mechaniczne własności stali przed wyoblaniem ze zmianą grubości i po nim

Materiał	Twardość w skali Rockwella	Granica plastyczności kG/mm ²	Granica wytrzymałości przy rozciąganiu kG/mm ²
Stal stopowa przed wyoblaniem	H-42	24,60	49,20
po wyoblaniu	C-20	42,20	59,75
Stal molibdenowa przed wyoblaniem	B-90	42,20	63,30
po wyoblaniu	C-32	91,40	102,0
Stal nierdzewna przed wyoblaniem	B-74	22,50	56,25
po wyoblaniu	C-30	34,45	68,90

Skład stali

Stal stopowa (SAE 1030): C = 0,28—0,34%; Mn = 0,6—0,9%; p ≤ 0,04%; s ≤ 0,05%.

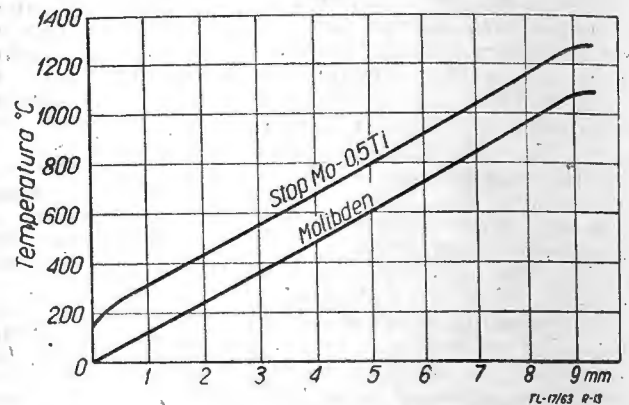
Stal molibdenowa (SAE 4130): C = 0,28—0,34%;

Mn = 0,4—0,6%; p ≤ 0,04%; s ≤ 0,04%; Si = 0,2—0,35%; Cr = 0,8—1,1%; Mo = 0,15—0,25%.

Stal nierdzewna (AISI 302): C = 0,08—0,15%;

Mn ≤ 2%; Si ≤ 1%; p ≤ 0,04%; s ≤ 0,03%; Cr = 17—19%;

Ni = 7—10%.

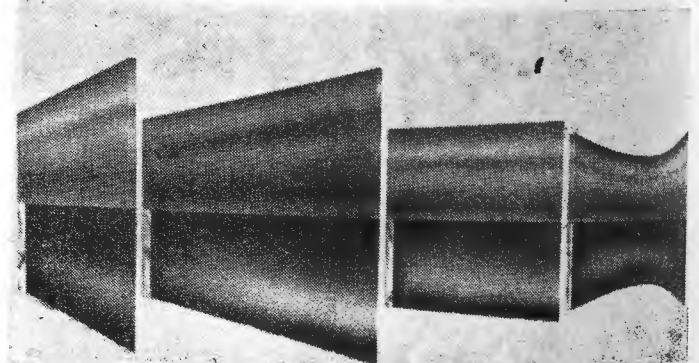


Rys. 13. Temperatury obróbki czystego molibdenu i stopu molibdenu z tytanem (0,5% Ti) dla różnych grubości blach lub średnic prętów

Wysoka temperatura topliwości wolframu (3370 °C) predestynuje go na części rakiet, jak dysze wylotowe i stożki czołowe, narażone na działanie wysokich temperatur. Przykład z rys. 14 ilustruje proces wykonania dyszy z wolframu.

Proces wykonania składa się z czterech operacji wyoblania, z których dwie pierwsze prowadzone są przy stałej średnicy i zmianie grubości, a dwie ostatnie to konwencjonalne wyoblanie ze stałą grubością. Ponieważ redukcja grubości ponad 50% nie jest wskazana, w pierw-

Rys. 14. Przykład dyszy z wolframu, wykonanej w czterech operacjach; kolejno: a) I wyoblanie ze zmianą grubości, b) II wyoblanie ze zmianą grubości, c) I wyoblanie ze stałą grubością, d) II wyoblanie ze stałą grubością



szej operacji zastosowano wzornik o kącie 60°. Przed operacją wzornik został nagrany do temperatury 480—530°C. Materiał grzany jest podczas obrotu do 980—1150°C. Części o większej grubości muszą być obrabiane w wyższej temperaturze. Nie wymaga się atmosfery ochronnej i nagrzewanie dokonuje się palnikiem acetylenowym. Temperatura nie może jednak przekroczyć 1150°C, gdyż może wystąpić rekrystalizacja.

Parametry procesu zostały dobrane dla kształtu i wymiarów części; średnica materiału wyjściowego \varnothing 250 mm, grubość 6,35 mm, obroty wzornika 250 obr/min, posuw 150 mm/min. Druga operacja jest analogiczna do poprzedniej, lecz prowadzona na wzorniku o kącie 30°, co powoduje redukcję grubości 75% po obu operacjach. Dla oczyszczenia zastosowano hydropolerowanie zawiesiną tlenku aluminium w wodzie. Obróbka cieplna polega na wyżarzaniu odpuszczającym w ciągu 1 godz. w temperaturze 950°C w atmosferze wodoru. Pozostałe dwie operacje prowadzone są przy takich samych temperaturach, lecz według zasady stałej grubości ścianki. Dwie ostatnie operacje w pewnych przypadkach mogą być zastąpione jedną. Końcowa obróbka cieplna i oczyszczenie prowadzone są tak jak międzyoperacyjne. Przy dyszach z wolframu innego rodzaju, końcowa grubość ścianek wahała się od 0,75 do 6,35 mm, a średnica do 350 mm [1].

W procesie wyoblania ze zmianą grubości końcową gładkość zależy od wielkości posuwu, promienia zaokrąglenia rolki i połowy kąta stożka [15]. Zależność gładkości wyraża się zależnością:

$$R = e - \sqrt{e^2 - \left(\frac{P}{2 \cos \frac{\alpha}{2}}\right)^2}$$

gdzie: R — wysokość nierówności [mm],
 p — posuw osiowy [mm/obr],
 e — promień zaokrąglenia rolki [mm].

Na przykład: przy $p = 0,1$ mm/obr,

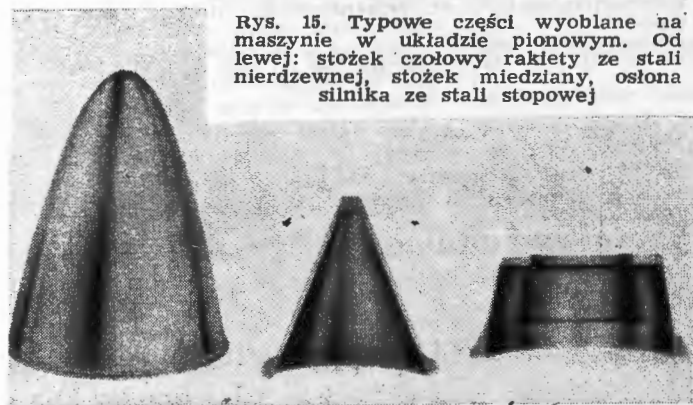
$$e = 2 \text{ mm}; \frac{\alpha}{2} = 30^\circ; R = 0,7 \mu$$

$$e = 6 \text{ mm}$$

$$R = 0,35 \mu$$

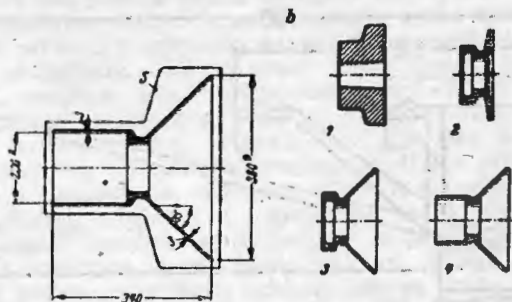
Wyoblanie ze zmianą grubości w wielu przypadkach zastępuje trudne operacje wielokrotnego ciągnięcia na prasie. Otrzymywanie długiego cienkościennego cylindra wymaga 7÷10 operacji ciągnięcia z 5÷6 żarzeniami międzyoperacyjnymi. Nowy proces zaleca wyoblanie stożka z płaskiego materiału, a dwie następne operacje wyoblania nadają ostateczny kształt, stosując przy tym 2 żarzenia międzyoperacyjne. Takie rury średnicy 75 mm, długości 1000 mm i grubości ścianki 0,625 mm, utrzymywane są w tolerancji $\pm 0,05$ mm. Stożki wylotowe wykonane ze stali nierdzewnej o grubości 3,2 mm, 600 mm długości, średnicy 500 mm i kącie 34° mają końcową grubość ścianek 0,95 mm z tolerancją $\pm 0,05$ mm. Przykłady typowych części wyoblanych pokazano na rys. 15.

Przykład rys. 16 ilustruje możliwości zastąpienia trudnego procesu wykonania części z odkuwki na drodze skrawania przez proces bardziej ekonomiczny pod wzglę-



Rys. 15. Typowe części wyoblane na maszynie w układzie pionowym. Od lewej: stożek czołowy rakiety ze stali nierdzewnej, stożek miedziany, osłona silnika ze stali stopowej

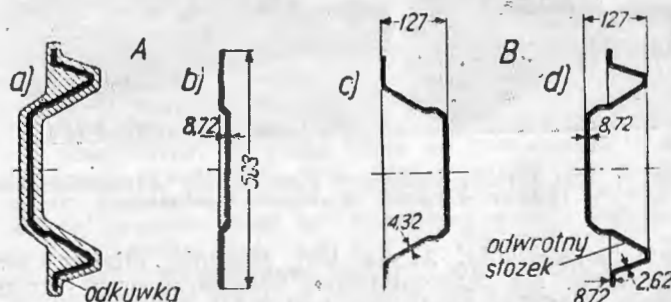
dem pracochłonności i oszczędności materiału. W pierwszym przypadku odkuwka ważyła 170 kG, a ciężar gotowej części 8,4 kG. Wydajność materiału wynosiła poniżej 5% (rys. 16a). W nowym procesie surówka waży 60 kG dla otrzymania takiego samego wyrobu (rys. 16b).



Rys. 16. Porównanie procesu części wykonanej z odkuwki i skrawanej z procesem, w który włączono wyoblanie: a. odkuwka o ciężarze 170 kG, ciężar części gotowej 8,4 kG, b. 1) odkuwka o ciężarze 60 kG, 2) odkuwka obrabiona skrawaniem, 3) wyoblanie stożka, 4) wyoblanie cylindra

Wydajność materiału wzrosła do 14%, co daje oszczędność 110 kG materiału, który był zamieniany na wióry. Ilość operacji wzrosła o dwie: wyoblanie stożka i cylindra.

Zastępowanie odkuwki płaskim materiałem wyjściowym może całkowicie wyeliminować kosztowny proces kucia i skrawania (rys. 17).



Rys. 17. Tarcza łożyskowa poprzednio wykonywana z odkuwki, obecnie wykonywana wyoblaniem ze zmianą grubości w dwóch operacjach z płyty wyciętej na prasie. A — wykonanie toczeniem, B — wykonanie wyoblaniem; a — toczony z odkuwki, b — po wykrawaniu na prasie, c — I wyoblanie, d — II wyoblanie

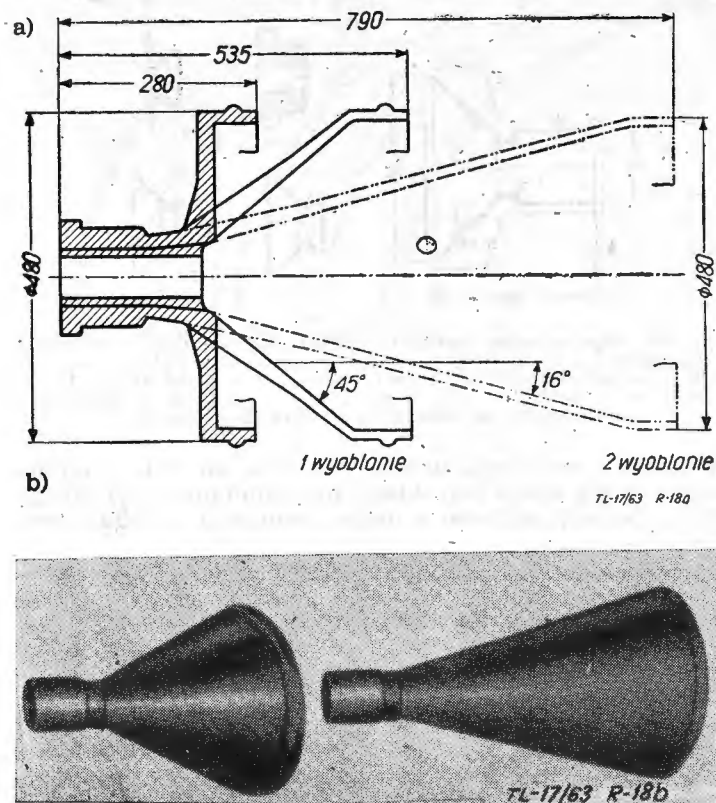
Odpowiedzialne części silników odrzutowych wymagają materiałów o bardzo wysokich własnościach, zapewniających wysoką niezawodność pracy. Wyoblanie ze zmianą grubości nadaje prawidłowy układ włókien w materiale, duży stopień przeformowania materiału oraz podwyższoną wytrzymałość i twardość. Proces ten stosowany jest do wałów turbin (rys. 18). Materiałem wyjściowym jest odkuwka wstępnie obrabiona mechanicznie. Kontrola odkuwki nie jest konieczna, gdyż wewnętrzne, nawet niewielkie wady materiałowe, zawsze zostają ujawnione podczas procesu jako przerwania szybko rozprzestrzeniające się na powierzchni, aż do zerwania materiału. Nowsze konstrukcje dużych rakiet nie pozwalają na szwy wzdłużne, co eliminuje wykonanie części z blach zwijanych. Tłoczenie zasadniczo jest wykonalne, lecz wymaga pras o wymiarach niespotykanych. Pozostaje wyoblanie, które prowadzone jest bez trudności dla tego typu części, gdyż średnica materiału wyjściowego nie przewyższa średnicy części.

Dobre efekty ekonomiczne daje łączenie procesu wyoblania ze zmianą grubości z innymi procesami.

Części wyoblane mogą być spawane z częściami obrabionymi innymi sposobami. Pozwala to wykonać konstrukcję bardziej technologiczną, a więc tańszą i jednocześnie spełniającą stawiane warunki.

Zastosowanie nielotnicze wyoblania to wytwarzanie gaśnic, nierdzewnych zbiorników, naczyń laboratoryjnych pokrywanych miedzią. Ciężki park maszynowy jest

zbędny, ponieważ siły wymagane przy wyoblaniu blach są około 50% mniejsze niż naciski potrzebne do tłoczenia podobnych pod względem materiału i kształtu części. Dodatkową zaletą jest gładkie wykończenie powierzchni bez potrzeby dalszego szlifowania, a w wielu przypad-



Rys. 18. Wał turbiny wykonany z obrabianej skrawaniem od-kuwki w dwóch operacjach wyoblania

kach polerowania. Zaletą jest znacznie niższy koszt wzorników niż pracochłonnych tłoczników oraz szerszy zakres produkcji złożonych kształtów, które nie mogą być wykonane innymi metodami. Łatwo mogą być wyoblane części pokryte warstwą miedzi, srebra, złota, platyny bez uszkodzenia jej. Sposobem tym mogą być kształtowane paraboliczne reflektory z wymaganą wysoko dokładnością kształtu i gładkości.

Wnioski

Proces wyoblania ze zmianą grubości można rozpatrywać jako połączenie procesu wyciskania z konwencjonalnym wyoblaniem, o czym świadczą określenia tego procesu — wyoblanie z wyciskaniem, wyciskanie obrotowe, wyciskanie maszynowe itp.

Zalety wyoblania ze zmianą grubości:

1. Znaczne podwyższenie wytrzymałości i twardości gotowego przedmiotu w porównaniu z materiałem wyjściowym (w niektórych przypadkach do 100%).
2. Wzrost granicy wytrzymałości zmęczeniowej, szczególnie dla materiałów wrażliwych na karb.
3. Można osiągnąć wąskie tolerancje, w porównaniu z otrzymywanymi obróbką skrawaniem (grubość ścianki i średnica wewnętrzna mogą być utrzymane w tolerancji $\pm 0,05$ mm).

4. Osiągalna gładkość powierzchni bliska jest otrzymywanej szlifowaniem. Wysokość nierówności około 0,15—0,2 μ .

5. Prawie pełne wykorzystanie materiału. Nie ma odpadów z wyjątkiem tych, które występują przy wykrawaniu na prasie lub obróbce mechanicznej materiału wyjściowego.

6. Nieduże serie elementów można wykonać bardziej ekonomicznie wyoblaniem, niż przez głębokie tłoczenie lub ciągnięcie, wskutek niskiego kosztu oprzyrządowania.

7. Duże serie elementów o złożonych kształtach mogą być wykonywane bardziej ekonomicznie niż przez głębokie tłoczenie.

8. Proces wyoblania ujawnia wady materiału, co zastrękuje kontrolę.

9. Odkształcenia plastyczne, zachodzące podczas wyoblania ze zmianą grubości, podwyższają wytrzymałość szwów spawalniczych i czynią je mniej widocznymi.

10. Za pomocą wyoblania można łatwo obrabiać materiały wysokostopowe, trudnoobrabialne skrawaniem.

Ograniczenia procesu wyoblania ze zmianą grubości:
1. Wyoblać można tylko takie części, które mają kształt stożków lub cylindrów. Jednak w tych zakresach części mogą mieć złożony kształt i zmienną grubość ścianki.

2. Wyoblanie obniża plastyczność obrabianego materiału. Wzrasta jednak twardość, co dla wielu części jest korzystne.

3. Wyoblanie nie może konkurować z głębokim tłoczeniem przy wykonywaniu dużych serii części z wyjątkiem części o złożonych kształtach. Mimo niższego kosztu oprzyrządowania, czas operacji jest dłuższy.

WYKAZ LITERATURY

1. Crimmins P. P. and Heimlich O. W. — Spinning of Refractory Alloys, Metal Progress, December 1962, vol. 82, nr 6, str. 67—72
2. Kalpakcioglu S. — An experimental study of plastic deformation in power spinning, CIRP Annalen, 3 August 1962, Band X, Heft 1, str. 58—63
3. Kalpakcioglu S. — A Study of Shear-Spinnability of Metals, Transactions of the ASME, November 1961, str. 478—484
4. Kobayashi S., Hall I. K., Thomsen E. G. — A Theory of Shear Spinning of Cones, Transactions of the ASME, November 1961, str. 485—495
5. Avitzur B. Yang C. T. — Analysis of Power Spinning of Cones, Transactions of ASME, August 1960, str. 231—245
6. Heavy Flow-Forming, Aircraft Production, Nov. 1962, str. 374—376
7. Bennett E. I. — Flow-Forming, Aircraft Production, nr 10, 1960, str. 366—373, nr 11, 1960, str. 438—444
8. Hards K. W. — Flow turning on sub-contract, Metalworking Production, June 7.1961, str. 71—73
9. Donovan M. — Rocket-motor cases, Aircraft Production, July 1962, str. 248—257
10. Spiegel F. — Hot Roll-Spinning, Aircraft Production, February 1959, str. 44—47
11. Bruckart W. L. — Fabrication of Refractory metals, ASTE Technical Paper, 1958, Paper number 177, str. 1—26
12. Spiegel F. — Hot Roll-Spinning Titanium, ASTE Technical Paper 1958, Paper number 173, str. 1—3
13. Heater I. N. — The challenging future of Power-Spinning, ASTE Technical Paper 1958 r., Paper number 171, str. 1—9
14. Izgotowienie detalej koniczeskoj i trubczatoj formy sposobom „Maszynnogo wydawliwania”, Maszynostrojenie — sbornik pierewodow, 1957, nr 3, str. 104—115
15. Reichel H. — Ueber das Walzdrücken Kegelförmiger Werkstücke aus Aluminium — II Teil, Fertigungstechnik Heft 6, 1958, str. 252—260
16. Singer F. — Das Herstellen von Hohlkörpern nach dem Metalldruckverfahren, VDI, z. 99, 1957, nr 25, str. 1223—1226
17. Bosch W. — Eine halbsebsttätige hydraulische Streck Drückmaschine, Werkstatttechnik und Maschinenbau, Heft 8, 1957, str. 410—413
18. Dryak A. V. — Eine amerikanische Streck-Drück-Maschine, Werkstatttechnik und Maschinenbau, Heft 8, 1957, str. 413—415
19. Caunet I. — Le répoissage, La Machine outil française, nr 129, II 1958, str. 85—89, nr 130, III 1958, str. 131—135.

PRASA TECHNICZNA

podnosi wasze kwalifikacje zawodowe —
czytajcie i rozpowszechniajcie

PRASA TECHNICZNA

POLIURETANOWE POKRYCIA W BUDOWIE PODUSZKOWCÓW

Używane w lotnictwie pokrycia wykańczające z poliuretanu są stosowane również w budowie poduszkowców; między innymi zastosowano je w poduszkowcu Vickers VA. 3, który jest pierwszym na świecie poduszkowcem utrzymującym regularną komunikację pasażerską.

Głównym wymaganiem, jakie stawia się materiałom pokryciowym w zastosowaniu do poduszkowców, jest odporność na: 1) korozję; 2) erozję pod wpływem wody morskiej; 3) erozję pod wpływem piasku, mułu itp.; 4) uderzenia fal i twardych elementów; 5) oleje estrowe. Poza tym pokrycie powinno być gładkie.

Pokrycia poliuretanowe do poduszkowców, opracowane przez Cellon-Docker Aircraft Finishes Division — mają wszystkie właściwości pokryć piecowych mimo, że są suszone strumieniem powietrza. Mają wyjątkową odporność na ścieranie i nadają się w związku z tym bardzo dobrze w budowie pojazdów poruszających się w wodzie o dużej ilości piasku i mułu. Odnazają się dużą odpornością na uderzenia i dużą odpornością chemiczną, np. działanie słonej wody, rozpuszczalników, olejów syntetycznych itp. Dzięki temu warstwa poliuretanowa zachowuje spójność i nie ulega korozji. Ma poza tym dużą gładkość i twardość, co jest korzystne ze względu na opory ruchu.

W. K.

NYLON ZE SZKLANYM WYPEŁNIACZEM

Nowy materiał nylonowy, opracowany w Anglii i nazwany „Maranyl” A 190, nie ma wad stosowanych obecnie tworzyw sztucznych, a mianowicie nie wykazuje dużej rozszerzalności cieplnej i małej sztywności. Podstawę nowego materiału stanowi nylon 66, odznaczający się największą wytrzymałością i sztywnością spośród wszystkich typów nylonów. „Maranyl” powstaje przez równomierne rozproszenie w nylonie 66 włókien szklanych. Poprawia się w ten sposób własności mechaniczne i cieplne materiału, np. sztywność części wykonanych z „Maranylu” A 190 jest dwukrotnie większa niż podobnych części wykonanych z nylonu 66, przy czym udarność pozostaje nie zmieniona. Wytrzymałość na rozciąganie, ścinanie i ściskanie jest o 50%—100% większa, również znacznie korzystniejsza jest charak-

terystryka peizania. Liniowa rozszerzalność cieplna „Maranylu” jest pięciokrotnie mniejsza niż nylonu 66 i można ją porównywać z rozszerzalnością wielu metali. „Maranyl” wykazuje wysokie temperatury zniekształceń, np. przy obciążeniu 18,5 kG/cm² temperatura ta wynosi 245°C, podczas gdy w przypadku nylonu 66 — tylko 75°C. Poza zwiększoną statecznością wymiarów w różnych temperaturach, większa jest również stateczność przy zmianie wilgotności względnej. Dzięki równomiernemu rozproszeniu włókien szklanych, własności poszczególnych odlewów z „Maranylu” są powtarzalne.

„Maranyl” można łatwo barwić za pomocą odpowiednich pigmentów, przy czym odlewy wykazują jednorodną barwę, a włókna szklane nie są widoczne.

Dobre własności „Maranylu” A 190 pozwolą zastępować nim niektóre części metalowe.

W. K.

PLATEROWANIE PŁOMIENIOWE

Platerowanie płomieniowe służy do pokrywania dowolnych metali i stopów oraz szkła i materiałów ceramicznych cienką lecz bardzo twardą warstwą węgla wolframu lub innych sproszkowanych węglików. Metoda ta jest szczególnie przydatna w odniesieniu do precyzyjnych części narażonych na intensywne ścieranie.

Ładunek sproszkowanego węgla wolframu w mieszaninie tlenowo-acetylenowej jest umieszczony w specjalnym pistolecie. Za pomocą iskry powoduje się wybuch mieszaniny tlenowo-acetylenowej, dzięki czemu proszek jest nagrzewany do wysokiej temperatury i wyrzucany z pistoletu z prędkością odpowiadającą pięciokrotnej prędkości dźwięku. Ładunek sproszkowanego węgla ma temperaturę około 3300°C i znajdując się w stanie plastycznym przylega ściśle do powierzchni platerowanego przedmiotu, przy czym grubość naniesionej w ten sposób warstewki wynosi 0,0064 mm. Następne ładunki proszku mogą być nakładane w celu zwiększenia powierzchni pokrycia lub jego grubości. W celu uzyskania odpowiedniego kształtu powierzchni pokrycia można stosować szablony. Przykładem zastosowania tego rodzaju pokryć w lotnictwie są półki łopatek silnika Bristol Siddeley BS. 53.

Opisana metoda platerowania została opracowana przez Oddział Linde Company angielskiej wytwórni Union Carbide Corporation.

W. K.

NA PÓLKACH KSIĘGARSKICH

WOJSKOWY PRZEGLĄD LOTNICZY, październik 1962 r.

M. Łyżwiński i S. Szczeciński zamieszczają obszernie studium, poświęcone przyczynom niestatecznej pracy silników odrzutowych (tzw. „pompażowi”). Po omówieniu procesu utraty stateczności oraz naświetleniu warunków wywołujących niestateczną pracę — omówiono sposoby zapobiegania i likwidacji niestateczności.

E. Cichosz drukuje drugą część swego artykułu o postępie w budowie płatowców. Część ta omawia konstrukcje integralne i przekładkowe, klejenie metali i łączenie ich pod ciśnieniem oraz wybuchowe kształtowanie blach.

R. Witkowski przeprowadza ocenę żywotności śmigłowca wg kryteriów amerykańskich i francuskich.

H. Krajewski referuje zagadnienia techniczne lotów kosmicznych.

Zeszyt X zawiera poza tym trzy artykuły interesujące personel latający, a mianowicie: o szkoleniu pilotów w zakresie eksploatacji samolotu, o wykonywaniu lotów nad morzem i rozpoznaniu w górach. Omówienie nowego prawa lotniczego w nawiązaniu do lotnictwa wojskowego, część historyczna oraz nowości lotnicze zamykają omawiany zeszyt WPL.

Z.

WOJSKOWY PRZEGLĄD LOTNICZY, listopad 1962 r.

B. Fibak poświęcił artykuł czynnikom ograniczającym możliwość lotu samolotów naddźwiękowych, stosując podział na

trudności: aerodynamiczne, termiczne, wytrzymałościowe, energetyczne i pilotażowe. Problemy te autor kolejno omawia.

St. Giza przeprowadza interesujące wywody dotyczące bezpieczeństwa lotów w świetle prawa karnego.

P. Wasilewicz omawia sprawę doboru i kształcenia pilotów oblatywaczy w aspekcie dzisiejszego stanu techniki lotniczej, porównując, jak przedstawia się to zagadnienie w Związku Radzieckim, Wielkiej Brytanii i w Polsce.

J. Konieczny omawia organizację pracy w oddziale obsługi technicznej w celu zapewnienia niezbędnego stanu technicznego użytkowanego wyposażenia lotniczego.

J. Czownicki w artykule pt. „Lotnictwo przeciw rakietom” zapoznaje nas z rakietową bronią NATO oraz zagadnieniami taktycznymi zwalczania rakiet.

Zeszyt XI zawiera również opis urządzeń treningowych w wojskach rakietowych, zestawiony na podstawie publikacji zachodnich.

Z innych materiałów zeszytu XI warto wymienić artykuł J. R. Koniecznego o sporcie lotniczym we Francji, z którego dowiadujemy się m. in., że — w okresie ubiegłych 12 lat — Francja czterokrotnie prześcignęła Polskę w liczbie zdobytych odznak diamentowych w szybownictwie.

Zeszyt w części końcowej zawiera nowości lotnicze i wydawnicze.

Z.

Prof. dr Marian Kwiek



Profesor dr Marek Kwiek urodził się 6. IV. 1913 r. w Warszawie. Od wczesnych lat życia uczył się muzyki, zdradzając zdolności kompozytorskie. Pod wpływem ojca, matematyka i astronomia, rozczytywał się w podręcznikach z matematyki i astronomii. Ojciec pod koniec swego życia, wciągnął 16-letniego Marka do prac nad konstrukcją turbiny spalinowej. To też po ukończeniu gimnazjum Bergera w Poznaniu studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Warszawskiej uważa za najodpowiedniejsze dla siebie. Poznał tam prof. Huberta, który przez wiele lat jeszcze udzielał mu pomocy naukowej i wywarł na Niego ogromny wpływ. Politechnika jednak okazała się daleka od zainteresowań, które krystalizowały się w kierunku muzyczno-fizycznym, dlatego też po ukończeniu I. roku studiów przeniósł się na Uniwersytet Poznański. Studiując muzykologię i uzyskując dyplom magistra filozofii w zakresie muzykologii, z fizyką jako przedmiotem ubocznym.

W międzyczasie utrzymywał M. Kwiek kontakt z Warszawą, gdzie dostał się pod wpływ swojego stryja architekta Piotra Kwieka i innych jego współpracowników. Wynikła stąd poważniejsza i wieloletnia współpraca, która obejmowała początkowo zagadnienia ogrzewania i wentylacji, po tym akustyki wnętrza, a wreszcie zagadnienia społecznej walki z hałasem. Zajmuje się analizą harmoniczną, rachunkiem prawdopodobieństwa, analizą widmową głosu. Wyjeżdża na roczną specjalizację do Berlina. Tam zdaje sobie sprawę, że dla opanowania zagadnień hałasu należy przede wszystkim badać czułość słuchu. Pierwsze własne badania w tym zakresie przeprowadził w 1936 r. i opublikował je jako pracę doktorską. Inne prace z tego okresu dotyczyły bądź czułości słuchu, względnie barwy dźwięku, bądź walki z hałasem.

Po powrocie z Niemiec pracował pod kierunkiem prof. Hubera w Biurze Konstrukcyjnym Państwowych Zakładów Lotniczych w Warszawie jako akustyk. Prace tam wykonane miały charakter techniczny: opracowanie pod względem akustyki prototypu samolotu pasażerskiego P.44, rozpoczętego przez tragicznie zmarłego inż. Puławskiego, zakończono przez inż. Jakimiuka, dalej opracowanie tłumika (kolektora wydechowego) do 1000-konnego silnika Cyclone. Niezależnie od tego prof. Huber daje Mu stałe zagadnienia o charakterze naukowym w zakresie badania drgań. Połowę czasu spędzał M. Kwiek w Poznaniu, wykładając akustykę

dla muzykologów, poza tym był asystentem fizyki na medycynie, głównie ze względu na badania czułości słuchu stojące na pograniczu fizjologii.

Ciały okres między latami 1933–39 wypełniały Mu w chwilach wolnych kompozycje utworów muzycznych.

W okresie okupacji M. Kwiek zajmował się badaniem i naprawą zabytkowych organów ziemi kielecko-sandomierskiej.

Bezpośrednio po wojnie i po habilitacji powrócił do badań nad czułością słuchu, których wynikiem były publikacje i referaty z prac własnych na Zjazdach Fizycznych w latach 1950–53. Istotnym postępowaniem w tych pracach są badania widm hałasów impulsowych, takich jak nitowanie, hałas maszyn do liczenia itp. Ponieważ dużą trudnością było uzyskanie aparatury, wiele prac było poświęconych budowie aparatury pomiarowej, a to: mikrofonów, filtrów akustycznych, urządzeń spektrograficznych, generatorów akustycznych itp.

Ponieważ już jako docent M. Kwiek wykazywał duże zainteresowanie zagadnieniami akustyki i ogłosił szereg prac z tej dziedziny, w 1955 r. powstaje na Uniwersytecie im. A. Mickiewicza w Poznaniu jedyna w kraju Katedra Akustyki, pod Jego kierownictwem. Dzięki Jego inwencji i energii staje się ona ośrodkiem szerokich badań naukowych, nawiązując współpracę z wieloma instytutami i katedrami w kraju i za granicą. Pod Jego kierunkiem kształcą się młodzi naukowcy z różnych dziedzin na specjalistów akustyków.

W wielu dziedzinach czystej teorii muszą towarzyszyć nie-raz bardzo trudne prace eksperymentalne i właśnie On potrafił w mistrzowski sposób przy swojej gruntownej znajomości teorii powiązać je z doświadczeniem, zachęcając młodych do eksperymentowania i poświęcając im wiele godzin w pracowni. Sam kieruje rozwiązaniem projektu akustycznego Teatru Opery i Baletu w Warszawie, współpracuje przy wyciszeniu hałasu w nowym prototypie polskiego samolotu komunikacyjnego i nowego portu lotniczego w Warszawie. Był On inicjatorem zwołanej w początkach grudnia 1962 r. konferencji przeciwhałasowej, na której omawiano również szkodliwość hałasu lotniczego oraz walkę z nim.

W katedrze swej prowadził wiele przewodów doktorskich i habilitacyjnych. Był członkiem wielu towarzystw naukowych w kraju i za granicą oraz członkiem Sekcji Akustyki Komisji Elektroniki i Telekomunikacji PAN-u. Z Jego inicjatywy powstaje Polskie Towarzystwo Akustyczne. Opublikował około 80 prac naukowych teoretycznych i doświadczalnych.

W ostatniej kadencji był posłem na Sejm PRL z ramienia Stronictwa Demokratycznego. Został odznaczony Krzyżem Komandorskim Odrodzenia Polski.

Na zaproszenie rektora Uniwersytetu w Liège wygłasza tam cykl wykładów z akustyki. W drodze powrotnej do kraju zginął tragicznie w katastrofie lotniczej na Okęciu w Warszawie dnia 19.XII.1962 r.

Odszedł od nas nieoczekiwanie w pełni sił twórczych, a tragizm Jego śmierci jest tym głębszy, że w pamięci wszystkich, którzy Go znali, żyje Jego dynamiczny witalizm, pozostała pamięć Jego szlachetnego charakteru.

Mgr inż. Zygmunt Cyma



Nadeszła opóźniona wiadomość z Kanady, że zmarł tam na atak sercowy w dniu 25. XI. ub. r. w miejscowości Sorel, i został pochowany w Montrealu wybitny inżynier lotniczy śp. Zygmunt Cyma.

Zmarły urodził się 1. I. 1901 r. w Lubaczowie pod Lwowem. Po uzyskaniu matury w gimnazjum realnym we Lwowie, wstąpił w 1919 r. na tamtejszą politechnikę, którą ukończył z odznaczeniem w 1923 r.

Pracę zawodową rozpoczął w Państwowych Zakładach Lotniczych w Warszawie na stanowisku kierownika ruchu. Po kilku latach przenosi się do Podlaskiej Wytwórni Samolotów S.A. w Białej Podlaskiej, gdzie dochodzi do stanowiska dyrektora technicznego, pełniąc te czynności aż do wybuchu wojny we wrześniu 1939 r.

Przez Rumunię, Grecję, Francję i Anglię dostaje się w 1941 r. do Kanady, gdzie przebywał do końca życia.

Podczas przejściowego pobytu w wymienionych krajach bierze wybitny udział w zorganizowaniu rozbitych rzesz polskich inżynierów i techników, skupiając ich w związku, członkowie którego powierzają mu godność prezesa. Po instalowaniu się w Kanadzie jest też jednym z założycieli tamtejszego Związku Polskich Inżynierów i Techników. Zaczął tam pracę w fabryce samolotów „Victory Aircraft” w Toronto na stanowisku kierownika planowania i rozbudowy (Plant Engineering). Przystosowuje fabrykę do potrzeb wojennych i przez kilka lat aktywnie w niej pracuje.

Po zakończeniu wojny przechodzi do Koncernu A. V. ROE CANADA Limited w Toronto na stanowisko kierownika budowy nowej fabryki silników odrzutowych „Orenda Engines”. Buduje ją od podstaw — aż do uruchomienia. Fabryka ta została wyposażona we wszelkie najnowsze urządzenia, stanowiące rezultat ostatnich zdobyczy naukowych w zakresie budowy silników odrzutowych. Skutkiem zmiany polityki rządu kanadyjskiego w stosunku do problemów zaopatrywania armii w sprzęt lotniczy i zredukowania zamówień, produkcja lotnicza została w tym kraju mocno ograniczona i nowa fabryka nie miała widoków rozwoju. Decydujące czynniki, oceniając należycie wybitne zdolności organizacyjne inż. Cymy i rezultaty jego pracy darzą go pełnym zaufaniem i powierzają mu nowe odpowiedzialne stanowisko w największej stalowni kanadyjskiej „Atlas Steel Corporation” z zadaniem wybudowania nowej stalowni w prowincji Quebec. Po roku wydatnej pracy na tym polu przedwczesna śmierć, ku żałowi wszystkich, którzy go znali, przerwała jego pracowite życie.

Cześć Jego świetlanej pamięci!

PRZEGLĄD DOKUMENTACYJNY LOTNICTWA

OPRACOWANY PRZEZ OŚRODEK INFORMACJI INSTYTUTU LOTNICTWA

DODATEK DO MIESIĘCZNIKA „TECHNIKA LOTNICZA”

ROCZNIK XIII

WARSZAWA, CZERWIEC 1963 r.

ZESZYT 6

HYDROAEROMECHANIKA

532.526.2:533.691.16

ILot

Wuest W.: Laminare Grenzschichten bei Ausblasen eines anderen Mediums (Zweistoffgrenzschichten). Laminarne warstwy przyścienne w przypadku wdmuchiwania drugiego czynnika (dwuskładnikowe warstwy przyścienne). Ing.-Arch., 1962, t. 31, nr 2, s. 125-143, ods. 31.

W przypadku wprowadzenia do warstwy przyściennej drugiego czynnika, zachodzi mieszanie drogą konwekcji i termicznej dyfuzji. Równanie pędu jest takie same, jak dla jednoskładnikowej warstwy przyściennej, natomiast w równaniu energii znajdują się składniki, będące funkcjami transportu ciepła drogą termicznej dyfuzji. Koncentracja wdmuchiwanego czynnika zależy od jego wydatku. Ułożono równania różniczkowe dla czynników o różnych własnościach. Przedyskutowano obliczenia na podstawie równań i ich stosowność dla podobnych rozwiązań. Podano przykłady dla przypadku wdmuchiwania pary do powietrza. A. K.

621.438-253.5:533.6.011.5

ILot

Stratford B. S., Sansome G. E.: Theory and tunnel tests of rotor blades for supersonic turbines. Teoria i badania tunelowe łopatek wirnika turbin naddźwiękowych. A.R.C. R.a.M., 1963, nr 275, s. 42, rys. 28, tabl. 1, ods. 9.

W warunkach specjalnych, gdy wymagane jest osiągnięcie wielkiej mocy z jednostopniowej turbiny, konieczne jest zastosowanie dużego spadku ciśnienia na wieńcu dyszowym, co wytwarza naddźwiękowe prędkości na wlocie do wirnika. Jako wycinek badań tego rodzaju turbin przeprowadzono pomiary na kilku kształtach przejść międzyłopatkowych wirnika w dwuwymiarowym tunelu oraz przedstawiono teorię projektowania przejść. Pierwsze rozwiązanie, którym było przejście o stałej szerokości i zakrzywieniu podobnie jak w turbinach parowych, posiadało poważne wady wynikające z ogniskowania fal ciśnienia powstających na powierzchni wklęsłej z wynikającym z tego oderwaniem przepływu na przeciwnej wypukłej powierzchni. Dawało ono współczynnik prędkości 0,929 przy liczbie Macha 1,9 i kącie zmiany kierunku 140°. Z rozważań teoretycznych i dodatkowych obserwacji zaprojektowano następne przejście posiadające odcinek przemiany stanu na wlocie o małej krzywiznie, prowadzący do przejścia ze swobodnym wiralem o krzywiznie dwukrotnie większej; kanał posiadał niewielkie wężenie. Zdjęcia Schlieren wykazały, że przepływ w tym przejściu był całkowicie bez uderzeń.

W pobliżu powierzchni wypukłej istniał cienki obszar powietrza o małej energii, lecz próby z wtryskiem cieczy doprowadziły do zlokalizowania jedynie małego ośrodka oderwania. Pomiary rozkładu ciśnienia na wlocie wykazały, że współczynnik ciśnienia wynosi 0,952. Pozostało jednak kilka nie wyjaśnionych zagadnień i przedstawiona próba musi być jeszcze traktowana jako eksperymentalna. J. Ch.

533.697

ILot

Leynaert J., Bresseur J. M.: Problèmes d'aérodynamique interne posés par l'avion de transport supersonique „Mach 2”. Problemy aerodynamiki wewnętrznej związane z naddźwiękowym samolotem transportowym „Mach 2”. Recherche Aeronautique, 1962, nr 91, s. 15-22, rys. 14, ods. 2.

Przeгляд wyników otrzymanych w O.N.E.R.A. podczas wstępnych studiów dotyczących wlotów i wylotów dla silników turbodrzutowych, przewidzianych do napędu naddźwiękowego samolotu transportowego przy liczbie $M=2$. W szczególności przedstawiono wyniki eksperymentów otrzymane na modelu wlotu płaskiego, przedstawiające zagadnienie wyboru między naddźwiękowym sprężaniem wewnętrznym i zewnętrznym oraz opisano metody obliczeń użyte do studium procesów mieszania na wlocie z silników, porównując niektóre rezultaty teoretyczne i doświadczalne. J. Ch.

533.6.011:533.6.013.4

ILot

Jones W. P.: Research on unsteady flow. Badania przepływu nieustalonego. J. aerospace Sci., 1962, t. 29, nr 3, s. 249-263, ods. 55.

Przedyskutowano pewne nowe prace, dotyczące badań przepływu nieustalonego oraz pewne nowe zagadnienia, wymagające dalszych badań. Szczególną uwagę poświęcono zjawisku nieustalonej warstwy przyściennej. Rozważono niestacjonarność spowodowaną oderwaniem przepływu oraz zagadnienie cienkich, mocno skośnych skrzydeł pod kątem natarcia, przy którym może pojawić się oderwanie. A. K.

533.6.013:533.652

ILot

Spence A., Lean D.: Some low speed problems of high speed aircraft. Pewne problemy związane z małymi prędkościami wysokonaddźwiękowego samolotu. J. Royal Aeronaut., Soc., 1962, t. 66, nr 616., s. 211-225, ods. 23.

Artykuł dotyczy niskonaddźwiękowych zagadnień aerodynamiki kształtów samolotu, sugerowanych przez Kuchemana (II

Międzynarodowy Kongres Nauk Aerodynamicznych, 1960), jako odpowiednich dla osiągnięcia żądanego zakresu prędkości naddźwiękowych. Przedyskutowano wymagania odnośnie właściwości sterowania przyszłościowego samolotu — z punktu widzenia pilota. Dano krótki przegląd obecnego stanu wymagań sterowania bocznego i kierunkowego, przy użyciu głównie danych amerykańskich. A. K.

533.6.013.422:533.691.155.32

ILot

Broadbent E. G., Williams M.: Flutter of an all-moving tailplane. Flatter statecznika poziomego o wszystkich stopniach swobody. A.R.C. R.a.M., 1957, nr 3284, s. 13, tabl. 6, ods. 1.

Rozważono teoretycznie flatter statecznika poziomego dla następujących półsztywnych postaci: 1) częstość zginania statecznika W_1 , 2) częstość skręcania W_2 , 3) częstość obrotów W_3 , 4) częstość skręcania lub zginania kadłuba (zależnie od symetrii) W_4 . Zmieniono stosunki W_2/W_1 ; W_3/W_1 ; W_4/W_1 , podając wykresy prędkości flatteru w zależności od W_3/W_1 . Prędkość, przy której występuje flatter spada ostro przy małych wartościach W_3/W_1 , lecz prawdopodobnie położenie miejsca ostrego spadku prędkości flatteru określa stosunek W_3/W_4 . Podano wyniki symetryczne i niesymetryczne zarówno dla stateczników ze skosem jak i prostych. Wpływ ściśliwości nie był brany pod uwagę poza jednym przypadkiem, lecz nie wydaje się, by opuszczenie to posiadało istotny wpływ na wnioski. J. Ch.

ZAGADNIENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE W KONSTRUKCJACH LOTNICZYCH

620.171.5

ILot

Meyer M. L., Cak A. N.: Two-dimensional photoelasticity as a method of approximation to the stresses in three-dimensional problems with a plane or axis of symmetry. Dwuwymiarowa elastooptyka jako metoda przybliżenia trójwymiarowego stanu naprężeń z płaską lub osiową symetrią. J. Royal Aeronaut. Soc., 1962, t. 66, nr 615, s. 193-196, ods. 5.

W celu zbadania jakości przybliżenia określono miejscowe naprężenia w wale wykorobionym czterocylinrowego silnika ciągnika za pomocą: 1) krótkich tensometrów, 2) elastooptyki „zamrożonych” trójwymiarowych stanów naprężeń, 3) płaskiej elastooptyki. Przedstawiono i przedyskutowano wyniki. Wykazano, że metoda dwuwymiarowa elastooptyki daje ekonomiczne korzyści. A. K.

629.13.014.3:539.384

ILot

Gallagher R. H., Rattinger I.: The deformational behaviour of low aspect ratio multi-web wings. Pt. 2. Elementary and plate bending theories. Deformacja wielożebrowych skrzydeł o małym wydłużeniu. Cz. II: Teoria elementarnego zginania i zginania płyt. Aero. Quart., 1962, t. 13, cz. 1, s. 71-87, ods. 6.

Opisano, zastosowano i porównano teorie zginania elementarnego i zginania płyt. Wykazano nieodpowiedniość zastosowania teorii elementarnej do skrzydeł raket. Niekorzystny wpływ na dokładność ekwiwalentnej teorii płyty posiada ścinające naprężenie powierzchniowe. A. K.

624.078:621.886.7:531.252.3

ILot

Lambert T. H., Brailey R. J.: The influence of the coefficient of friction on the elastic stress concentration factor for a pin-jointed connection. Wpływ współczynnika tarcia na współczynnik spiętrzenia naprężeń dla połączenia kołkowego. Aero. Quart., 1.62, t. 13, cz. 1, s. 17-29, ods. 4.

Ustalono korzyści zastosowania pasowania z wciskiem między kołkiem a płytą w połączeniu kołkowym oraz wykazano, że pewna nieliniowość pojawia się w mechanizmie przejścia obciążenia od kołka do płyty. Badanie zależności naprężenia od obciążenia wykazuje wyraźną nieciągłość; obciążenie, przy którym nieciągłość ta występuje, zależy od początkowego wcisku i współczynnika tarcia między kołkiem a płytą. Wykazano, że wyniki opublikowane w tej pracy odpowiadają współczynnikowi tarcia między kołkiem a płytą rzędu 0,3. Podano także wyniki dla niższych i wyższych wartości współczynników. A. K.

CIEPŁO. POMIARY TEMPERATUR

536.24

ILot

Borman M. R., Surin E. W.: Metodika opriedielenija koeficienta tieploobmiena. Metoda określenia współczynnika przejmowania ciepła. Zawodskaja Laboratorija, 1962, t. 28, nr 12, s. 1470-1472, ods. 3.

Przedstawiono możliwość pomiaru współczynnika przejmowania ciepła symetrycznego ciała (płytki, cylindra, kuli) jedynie

drogą pomiaru zmiennej w czasie temperatury w jednym jego punkcie. Przedstawiono zależności obliczeniowe oraz analizę popełnianego błędu. J. Ch.

536.521.2

ILot

Kelsall D.: An automatic emissivity-compensated radiation pyrometer. Automatyczny pirometr promieniowania całkowitego z kompensacją współczynnika promieniowania. J. Scien. Instr., 1963, t. 40, nr 1, s. 1-4, rys. 3, ods. 3.

Opisano nowy typ pirometru promieniowania całkowitego do pomiaru temperatury powierzchni, niezależnie od jej współczynnika promieniowania. Zastosowano dwupromienną metodę z kompensacją zerową, która zapewnia automatyczny pomiar i zapis temperatury. Detektorem jest fotokomórka PbS. Przedstawiony pierwowzór przeznaczony był do pomiaru temperatury powierzchni komutatorów silników elektrycznych lokomotyw w zakresie 50-300 °C. Przeprowadzone badania laboratoryjne z kilku polerowanymi i utlenionymi powierzchniami metalowymi, których współczynnik promieniowania zmienił się od 0,1 do 1,0, wykazały, że dla współczynnika promieniowania większego od 0,2 otrzymana dokładność wynosiła $\pm 10^\circ\text{C}$ przy temperaturze rzędu 200 °C. J. Ch.

SILNIKI LOTNICZE

621.45

ILot

Weir R. H.: High performance turbine engines. Silniki turbiniowe o wysokich osiągnięciach. J. Royal Aeronaut. Soc., 1962, t. 66, nr 621, s. 541-557, rys. 23, ods. 7.

Omówiono następujące zagadnienia dotyczące silników turbiniowych: osiągalne moce i sprawności, kierunki rozwojowe — silniki turbosmigłowe oraz do napędu śmigłowych, silniki turboodrzutowe i dwuprzepływowe — rozwój sprężarek, komór spalania turbin, materiałów żaroodpornych, tendencje wzrostu osiągnięć silników turboodrzutowych, układy sterowania i regulacji, niezawodność i trwałość silników oraz ich koszty. J. Ch.

621.454

ILot

Turbinenstrahltriebwerke heute. Współczesne silniki turboodrzutowe. Flugwelt, 1963, t. 15, nr 1, s. 24-27.

Przegląd współczesnych rodzajów silników turboodrzutowych do napędu samolotów pod- i naddźwiękowych; naszkicowano niektóre związane z nimi trudności i metody ich rozwiązywania. Przedstawiono także wykaz najważniejszych wytwórni silników turboodrzutowych zachodniej Europy, północnej Ameryki i Japonii oraz ich wyrobów. J. Ch.

621.454

ILot

Kravec J. A.: Die Prüfung des General Electric J. 79-11A. Badanie silnika General Electric J. 79-11A. Flugwelt, 1963, t. 15, nr 1, s. 31-33.

Opisano próby przeprowadzane przez wytwórnię dla sprawdzenia sprawności, niezawodności i trwałości silnika J. 79-11A, związane z nimi operacje oraz niezbędne do ich przeprowadzenia urządzenia badawcze. J. Ch.

621.455

ILot

Barrère M., Larue P.: Fusées a propergol solide utilisant deux poudres ayant des vitesses de combustion differentes. Rakiety na paliwo stałe o dwu rodzajach prochu posiadających różne prędkości spalania. Recherche Aeronautique, 1962, nr 91, s. 33-41, rys. 16, ods. 2.

Trudności w otrzymaniu neutralnego ziarna paliwa stałego i straty pod koniec spalania mogą być zmniejszone przez użycie w tym samym ziarnie dwu paliw o różnych prędkościach spalania. Ostatnie publikacje na ten temat określiły różne parametry występujące w takim rozwiązaniu; w niniejszej pracy wniesiono kilka uzupełnień oraz przedstawiono niektóre wyniki uzyskane w O.N.E.R.A. podkreślające możliwości tej koncepcji silnika rakietowego. J. Ch.

536.46

ILot

Kuzniecowa W. K.: Wlijanje skorosti chemiczeskoj reakcii na proces gorienija kapli. Wpływ szybkości reakcji chemicznej na proces spalania kropli. Inżynierskiy Zhurnal, 1962, t. 2, nr 4, s. 344-349, ods. 7.

W pracy, na podstawie równań wymiany, spróbowano określić zakres stateczności spalania kropli (w postaci zależności $\frac{V}{R}$ przy której następuje spalanie, od warunków przepływu) oraz ocenić ilość spalanej w otoczeniu kropli paliwa. Dotychczasowe wyniki (uzyskane przez Spaldinga) okazały się niezgodne z wynikami doświadczeń. Analiza równań wymiany opiera się na często stosowanych uproszczeniach zależności opisujących rozkład temperatury w otoczeniu kropli oraz na aproksymacji szybkości reakcji za pomocą pewnej krzywej schodkowej. Uzyskane wyniki odnośnie sprawności spalania nie zostały potwierdzone doświadczalnie ze względu na to, że teoria nie bierze pod uwagę dopalania w turbulentnym śladzie za kroplą; potwierdziły się natomiast wielkości $\frac{V}{R}$, przy których następuje zgaszenie płomienia wokół kropli oraz zależności na prędkość przepływu powietrza przy zgaszeniu — od jego temperatury. J. Ch.

536.46

ILot

Udelson D. G.: Geometrical considerations in the burning of liquid drops. Geometryczne rozważania na temat spalania kropli cieczy. Combustion and Flame, 1962, t. 6, nr 2, s. 93-102, ods. 9.

Upřednie prace doświadczalne wykazały istnienie dwu rodzajów spalania na ciekłych kulach paliwa, umieszczonych w strumieniu powietrza: płomień otaczający i płomień w śla-

dzie za kulą. W pracy wyróżniono trzeci rodzaj spalania, w którym płomień zostaje ustancjonowany w warstwie przysciennej na bocznej powierzchni kropli. Wykazano, że położenie kątowne, mierzone od poprzedniego punktu spiętrzenia, jakie przyjmuje płomień, wzrasta ze wzrostem prędkości przepływu. Stwierdzono również, że położenie kątowne płomienia zależy także od wielkości kropli oraz od kierunku przepływu powietrza w stosunku do kierunku grawitacji, wykazując, że konwekcja naturalna posiada duży wpływ na przebieg obserwowanego zjawiska. Część teoretyczną pracy oparto na teorii warstwy przysciennej. J. Ch.

536.46:621.455

ILot

Larue P.: Visualisation de la combustion d'un propergol solide a l'interieur d'un propulseur. Wizualizacja spalania ziarna paliwa stałego wewnątrz silnika rakietowego. Recherche Aeronautique, 1962, nr 91, s. 23-31, rys. 12, ods. 6.

Opisano aparaturę służącą do wizualizacji spalania na czolowej powierzchni ziarna paliwa stałego oraz jej możliwości: obserwacji anomalii spalania, określenia lokalnej prędkości spalania, określenia prędkości emitowanego gazu lub cząstek, studium spalania nieustalonego. Przedstawiono także projekt urządzenia umożliwiającego jednoczesną obserwację obu końców ziarna, a więc dostarczającego środków do badania erozji. J. Ch.

531.787

ILot

Girves J.: Mesure des pressions rapidement variables et en particulier dans des écoulements a haute temperature. Pomiar szybkozmiennych ciśnień ze specjalnym uwzględnieniem przepływów o wysokiej temperaturze. Recherche Aeronautique, 1962, nr 91, s. 43-52, rys. 19, ods. 4.

W pracy opisano konstrukcję czujników do pomiarów szybkozmiennych ciśnień o szerokim zakresie częstotliwości, mogących pracować przy bezpośrednim zetknięciu z czynnikiem o temperaturze do 3700 °K. Przedstawiono szczegółowo poszczególne typy czujników oraz specjalnych elektronowych układów pomocniczych. Poza specyficznym lotniczym zastosowaniem, do którego zostały opracowane, czujniki te mogą być użyte w badaniach w wielu innych dziedzinach, szczególnie ze względu na możliwość jednoczesnego pomiaru chwilowych ciśnień szybkozmiennych oraz ciśnień średnich. Opracowane przetworniki elektronowe współpracujące z czujnikami, pozwalają na użycie ich w układach telemetrycznych o dużym zasięgu. J. Ch.

MATERIAŁY

629.13.002.3:678

ILot

Bass L.: Fibre-reinforced composite. Materiały laminatowe. Aircr. Prod., 1963, t. 25, nr 2, s. 38-43, ods. 9.

Szerokie zastosowanie materiałów laminatowych w technice, szczególnie lotniczej, zmusiło inżynierów do określenia ich własności wytrzymałościowych. Wzmacnianie żywic, przez wprowadzenie włókien, stwarzało kompozycje o module sprężystości różnym od elementów składowych. To samo dotyczy innych wskaźników wytrzymałościowych. Autor analizuje zagadnienie określenia tych wskaźników na drodze matematycznych rozwiązań, wychodząc z własności składników wchodzących do laminatu oraz ich składu procentowego. A. G.

WYTWARZANIE SPRZĘTU LOTNICZEGO

621.753.3:621.793

ILot

Hard plating. Nakładanie twardych pokryć. Aircr. Prod., 1963, t. 25, nr 2, s. 66-68, rys. 4, t. 1.

Zużywanie się sprawdzianów stanowi poważny kłopot w gospodarce narzędziowej. Duże nadzieje na rozwiązanie tego zagadnienia wiąże się z opanowaniem nowego procesu nakładania powłok z węglików spiekanych. W artykule omówiono fazy procesu natryskiwania powłok na sprawdziany tłoczkowe oraz zmiany wymiarowe związane ze ścieraniem się po określonej ilości cykli docierania. Jak wynika z porównania, proces ten daje rewelacyjnie dobre wyniki. A. G.

621.791.9

ILot

Ultrasonics in production. Ultradźwięki w produkcji. Aircr. Prod., 1963, t. 25, nr 2, s. 46-52, rys. 13, tabl. 1.

Wykorzystanie energii ultradźwiękowej w technice, z dobrym skutkiem, zależy w dużej mierze od wyposażenia umożliwiającego doprowadzenie drgań o określonej amplitudzie i koncentracji w określone miejsce. W numerze tym zawarta jest pierwsza część artykułu omawiająca wykorzystanie ultradźwięków do zgrzewania ultradźwiękowego i lutowania. Omówione zostały możliwości łączenia różnych materiałów i zestawów materiałowych, wyposażenie do zgrzewania, narzędzia i maszyny, badanie metalograficzne zgrzeń oraz własności wytrzymałościowych. Omówiono przykładowo części z przemysłu elektronicznego zgrzewane ultradźwiękowo. Pokazano również zestaw narzędzi do lutowania ultradźwiękowego. I wreszcie omówiono korzyści wynikające z zastosowania ultradźwięków. Przegląd ten dokonany został na podstawie doświadczeń amerykańskich. A. G.

621.9-52

ILot

Economic of numerical control. Ekonomia sterowania numerycznego. Aircr. Prod., 1963, t. 25, nr 2, s. 56-65, rys. 10, tabl. 10.

Stosowanie sterowania numerycznego do obróbki profili odbywa się ze znacznie większymi oporami niż do wiercenia według współrzędnych. Było to wynikiem braku danych ekonomicznych odnośnie pierwszego tematu. W artykule przeprowadzono analizę kosztów produkcji, przy zastosowaniu obrabiarek sterowanych numerycznie i porównano je z kosztami dla obróbki konwencjonalnej. Analiza przeprowadzona w odniesieniu do dwudziestu dwóch przykładów przedmiotów obrabiających, daje jasny obraz wyższości nowych metod i może usunąć resztki sceptycyzmu, jeszcze istniejącego. A. G.

Tabela 9. Ogólna charakterystyka i zastosowanie ważniejszych stopów z głównym składnikiem niklem produkowanych w USA

Lp	Nazwa stopu	Ciepłota właściwa g/cm ³	Postać stopu	Temperatura kucia °C	Zalecane warunki obróbki cieplnej	Ocena spawalności	Główne zastosowanie
1	Refractaloy 26		Odkuwki, profile walcowane		Przesykanie: 1150°C - woda lub powietrze + starzenie: 730°C - 20 godz. - powietrze.		Części silników odrzutowych
2	Incoloy T	7,96	Blachy		Przesykanie: 980-1010°C - 0,5 godz. - powietrze	dobra	Części silników odrzutowych
3	Incoloy 901	8,21	Blachy		Przesykanie: 1120°C - 2 godz. - olej + starzenie: 700°C - 16 godz. - powietrze	b. dobra	Części silników odrzutowych
4	Hastelloy A	8,80	Odkuwki, odlewy	1230-1000	Przesykanie: 1180-1220°C - woda lub powietrze + starzenie: 850°C - 16 godz. - powietrze.		Łopatk i tarcze turbin lotniczych silników odrzutowych
5	Hastelloy B	9,24	Odkuwki, odlewy, profile walcowane	1200-980	Przesykanie: 1180-1220°C + woda lub powietrze + starzenie: 850°C - 16 godz. - powietrze		Łopatk i tarcze turbin lotniczych silników odrzutowych.
6	Hastelloy C	8,94	Odkuwki, blachy, odlewy	1230-1010	Przesykanie: 1180-1220°C - 0,5 godz. - woda lub powietrze + starzenie: 850°C - 16 godz. - powietrze	dobra	Łopatk i tarcze turbin lotniczych silników odrzutowych.
7	Hastelloy R-235	8,15	Profile walcowane		Przesykanie: 1175°C - 1 godz. - powietrze + starzenie: 900°C - 4 godz. - powietrze		Części silników, rakiet i pocisków kierowanych.
8	Hastelloy X	8,21	Blachy, odkuwki	1200-980	Przesykanie: 1165°C - 10 minut - powietrze.	dobra	Elementy komór spalania silników odrzutowych
9	K-42-B		Odkuwki, profile walcowane		Przesykanie: 1050-1080°C - olej + starzenie: 730°C - 20 godz. - powietrze		Części silników odrzutowych
10	Inconel	8,43	Blachy		Przesykanie: 1010°C - 0,5 godz. - powietrze.	dobra	Części silników odrzutowych rakiet i pocisków kierowanych.
11	Inconel X	8,25	Blachy, prety, druty, sprężynowe	1220-980	Przesykanie: 1150°C - 2 + 4 godz. - powietrze + starzenie: 850°C - 24 godz. + 730°C - 20 godz. - powietrze.		Części silników odrzutowych, dopalacze
12	Inconel W	8,33	Blachy		Przesykanie: 1150°C - 2 - 4 godz. - woda + starzenie: 850°C - 24 godz. - powietrze	b. dobra i dobra	Części silników odrzutowych rakiet i pocisków kierowanych.
13	Inconel 700	8,15	Blachy, profile walcowane	1090-980	Przesykanie: 1175°C - 2 godz. - powietrze + starzenie: 870°C - 4 godz. - powietrze.	dobra	Części silników odrzutowych, łopatk wirujące.
14	Inconel 702	8,15	Blachy		Przesykanie: 1080°C - 0,5 godz. - powietrze + starzenie: 760°C - 5 godz. - powietrze	dobra	Części silników odrzutowych, łopatk wirujące.
15	Waspalloy		Odkuwki, profile walcowane		Przesykanie: 1060 - 1070°C - 4 godz. - olej + starzenie: 745°C - 16 godz. - powietrze.		Łopatk wirujące.
16	Udimet 500	8,02	Odkuwki, profile walcowane	1050-1040	Przesykanie: 1080°C - 4 godz. - powietrze + starzenie: 840°C - 24 godz. - powietrze + 760°C - 16 godz. - powietrze.		Części silników odrzutowych, łopatk wirujące.
17	M-252	8,24	Odkuwki, profile walcowane	1180-980	Przesykanie: 1065°C - 4 godz. - powietrze + starzenie: 760°C - 15 godz. - powietrze.		Części silników odrzutowych, łopatk wirujące.
18	GMR-235	9,71	Odlewy		Starzenie: 980°C - 5 godz. - powietrze.		Części turbin gazowych, łopatk

Tabela 10. Niektóre własności fizyczne typowych amerykańskich stopów z głównym składnikiem niklem

Nazwa stopu	Własności fizyczne	Temperatura badania °C								
		95	205	315	425	540	650	760	870	980
Hastelloy C	Przewodność cieplna kal/cm·sek w temperaturze		0,027	0,030	0,034	0,038	0,041			
Hastelloy R-235		0,025	0,029	0,035	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065
Hastelloy X		0,026	0,032	0,037	0,042	0,047	0,052	0,055	0,063	
Inconel X		0,031	0,037	0,041	0,047	0,050	0,054	0,058	0,062	0,067
Inconel 700		0,031				0,038	0,040	0,042	0,044	
Hastelloy C	Współczynnik rozszerzalności liniowej α · 10 ⁶ w zakresie od 20°C do temperatury badania		12,0	12,2	12,4	12,6	13,1	13,8	14,6	15,6
Hastelloy R-235		11,7	12,8	13,5	14,0	4,3	14,6	15,0	15,8	17,0
Hastelloy X		13,9	14,1	14,2	14,7	15,1	15,4	15,8	16,3	16,6
Inconel X		13,7	13,8	14,2	14,4	14,8	15,1	15,8	16,7	18,0
Inconel 700		12,3				14,4	15,0	15,6	16,7	

Tabela 11. Wytrzymałość czasowa ważniejszych amerykańskich stopów z gl. składnikiem niklem.

Lp	Nazwa stopu	W stanie	Wytrzymałość czasowa R_{r-h}																								
			R_{r-100} [kg/mm ²] w temperaturach [°C]							R_{r-1000} [kg/mm ²] w temperaturach [°C]																	
			650	730	760	815	870	925	980	650	730	760	815	870	925	980											
1	Refractaloy B	Przesyconym i starzonym	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,5	6,8	—	—					
2	Refractaloy 26	Przesyconym i starzonym	56	36	—	19,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	44	27	—	13	—	—				
3	Incoloy 901	Walcowanym i ciągnionym	56	35	—	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	42	21	—	7	—	—				
4	Hastelloy B	Walcowanym	38	—	14,5	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26	—	8,5	7	—	—				
5	Hastelloy B	Lanym	38,5	24	—	12,5	8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	25,5	18	—	9	6	—				
6	Hastelloy C	Walcowanym	37	—	—	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,8	25	—	7	—	—				
7	Hastelloy C	Lanym	35	22	—	13	9,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30	18	—	9,5	6,4	—				
8	Hastelloy X	Walcowanym	32	18	15	10,5	6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	21	13	11	7	4	—			
9	K-42-B	Przesyconym i starzonym	46	26	—	12,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28	19	—	7,7	—	—				
10	Inconel	Przesyconym	15	7,3	—	4	2,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,7	14	4,7	—	2,6	1,9	—	1,1		
11	Inconel X	Przesyconym i starzonym	56	35	—	20	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,3	48	28	—	13	6,3	—	1,6		
12	Inconel W	Przesyconym i starzonym	48	32	—	14,5	5,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,2	36,5	22	—	8	3,4	—	—		
13	Inconel X-550	Przesyconym i starzonym	—	—	—	24	12,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,3	48	27	—	14	6,5	—	2,3		
14	Inconel 700	Przesyconym i starzonym	—	51	—	30	19,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4,5	49	42	—	21	13	—	2,4		
15	Inconel 702	Walcowanym i ciągnionym	35	21	—	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
16	Inconel 739	—	—	—	—	24	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14	7,7	—	—		
17	Inconel 713C	Lanym	—	56	—	35	21	14	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28	14	7	—		
18	Waspalloy	Przesyconym i starzonym	—	38,5	—	21	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	28	—	14	—		
19	Udimet 500	Walcowanym i ciągnionym	—	49	—	28	21	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	63	42	—	21	14	—
20	Udimet 700	Walcowanym i ciągnionym	—	—	—	—	28	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14	—
21	Nicrotung	Lanym	—	—	—	42	28	21	14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	Rene 41	Walcowanym i ciągnionym	—	56	—	28	14	7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23	M-252	Przesyconym i starzonym	—	30	—	20	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
24	GMR-235	Lanym	—	42	—	26	18,5	10	6,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

