

AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY

Rozprawy
Nr 6

A.F. Budzyński

**BADANIA
TEORETYCZNE I DOŚWIADCZALNE
PROCESU
ELEKTROCHEMICZNEGO HONOWANIA (ECH)**

BYDGOSZCZ - 1982



**AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
IM. JANA I JĘDRZEJA ŚNIADECKICH
W BYDGOSZCZY**

**Rozprawy
Nr 6**

A.F. Budzyński

**BADANIA
TEORETYCZNE I DOŚWIADCZALNE
PROCESU
ELEKTROCHEMICZNEGO HONOWANIA (ECH)**

Biblioteka Główna ATR w Bydgoszczy



00000118964

BYDGOSZCZ - 1982

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO

doc. dr hab. Juliusz Skonieczny

OPINIODAWCY

Prof. zw. dr hab. inż. Kazimierz Albiński

Prof. zw. dr inż. Jerzy Dmochowski

REDAKTOR NAUKOWY

doc. dr hab. inż. Edward Walicki

OPRACOWANIE REDAKCYJNE I TECHNICZNE

mgr Halina Kluczyńska, Alfons Grzenkowicz

Wydano za zgodą Rektora
Akademii Techniczno-Rolniczej
w Bydgoszczy



61745

**WYDAWNICTWO UCZELNIANE AKADEMII TECHNICZNO-ROLNICZEJ
W BYDGOSZCZY**

Wyd. I. Nakład 100+50 egz. Ark. wyd. 15,1. Ark. druk. 10,50. Papier kl. V, 70×100 cm
Oddano do druku 28.6.1982 r. Druk ukończono w lipcu 1982 r.

Zam. nr 284. Cena 106 zł C-6/13

WSiP Zakłady Graficzne w Bydgoszczy

SPIS TREŚCI

Wstęp	5
Ważniejsze skróty i oznaczenia	7
I. PROBLEMATYKA HONOWANIA, CEL I OGÓLNY ZAKRES PRACY	9
II. ANALIZA TEMATU	12
1. Opis i krytyczna ocena dotychczasowych wyników badań	12
1.1. Wydajność honowania elektrochemicznego	12
1.2. Dokładność wymiaru i kształtu	15
1.3. Chropowatość powierzchni	18
1.4. Rola ziarna ściernego w procesie elektrochemicznego honowania	19
1.5. Jakość użytkowa warstwy wierzchniej	20
2. Wnioski z analizy tematu, tezy badań własnych	22
III. WŁASNE BADANIA TEORETYCZNE	26
1. Informacja, energia i masa w procesie kształtowania elementów maszyn	26
2. Ogólne sposoby wytwarzania elementów maszyn	28
2.1. Pojęcie cech konstrukcyjnych	28
2.2. Sposoby kształtowania geometrycznej cechy konstrukcyjnej	29
3. Analiza teoretyczna kształtowania powierzchni o postaci walca obrotowego	31
3.1. Przegląd podstawowych sposobów kształtowania	31
3.2. Honowanie dwukierunkowe	37
3.3. Honowanie jednokierunkowe	64
4. Wpływ sposobu doprowadzenia energii elektrycznej na spadki napięć w szczelinie międzyelektrodowej	70
5. Wpływ ruchu oraz sposobu doprowadzenia elektrolitu na odwzorowanie cech geometrycznych katody	75
6. Wpływ czasu oddziaływania katody na przyrost średnicy kształtowanego otworu	83
7. Wpływ grubości szczeliny międzyelektrodowej oraz właściwości elektrolitu na prędkość zmniejszania odchyłki kształtu	93
8. Automatyzacja kształtowania powierzchni o postaci walca obrotowego	105
9. Cechy geometryczne kształtowanych otworów jako ograniczenie stosowania honowania elektrochemicznego	111
IV. WYKONANE DOŚWIADCZENIA I ANALIZA ICH WYNIKÓW	117
1. Cel i zakres doświadczeń	117
2. Koncepcja i metodyka badań	118
3. Badania wytwórcze procesu elektrochemicznego honowania	124
3.1. Badane czynniki, zakres ich zmienności oraz sposoby pomiaru	124
3.2. Wyniki badań i ich analiza	131
4. Badania konstrukcyjne powierzchni honowanej	143
4.1. Badane czynniki, zakres ich zmienności oraz sposoby pomiaru	143
4.2. Wyniki badań i ich analiza	146
V. WNIOSKI	158
LITERATURA	161
Streszczenia	166



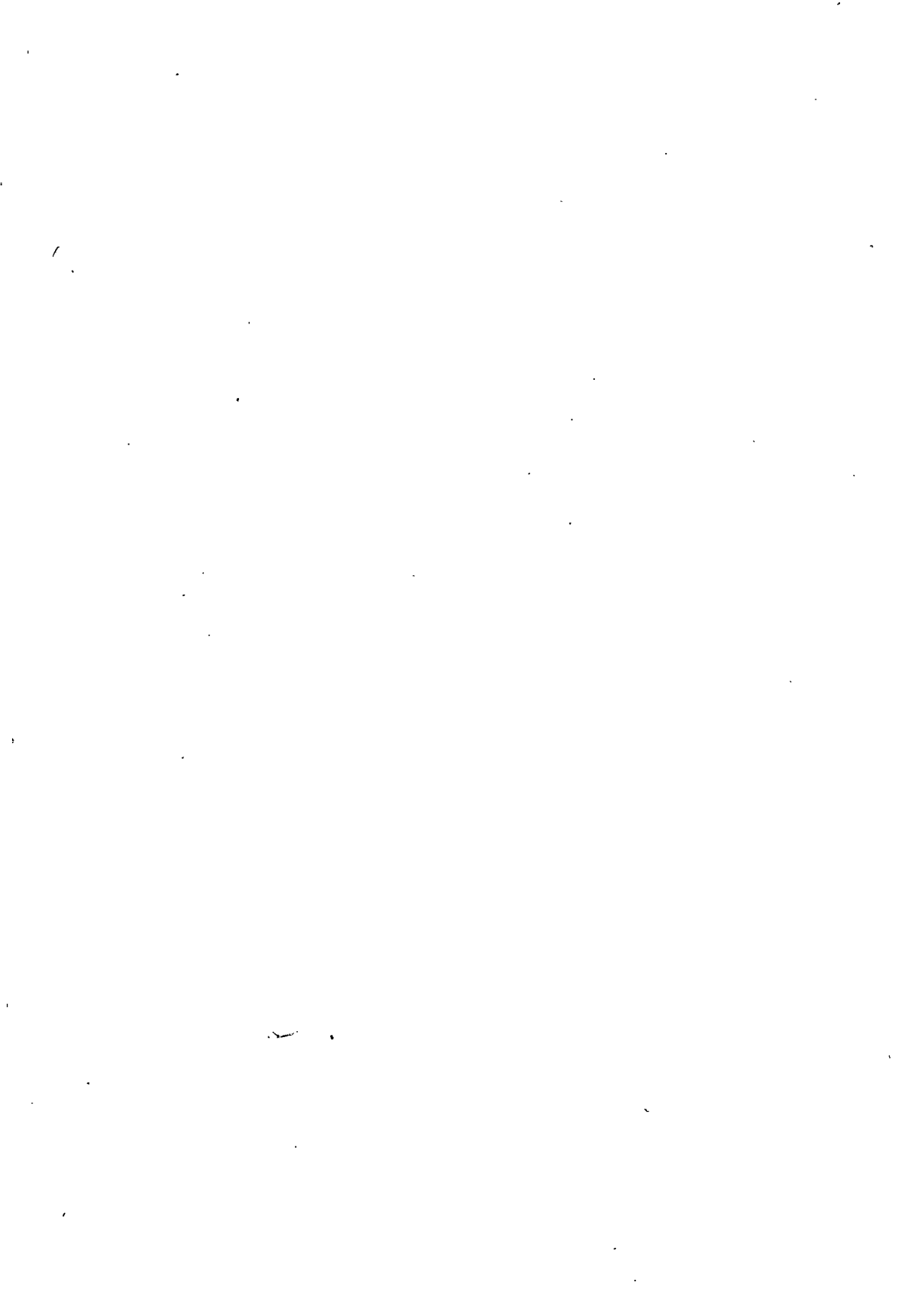
WSTĘP

Praca składa się, poza analizą literatury i określeniem zakresu tematu, z dwóch wyraźnych części, stanowiących własne badania teoretyczne i doświadczalne procesu elektrochemicznego honowania (ECH). Zrealizowano ją na przestrzeni lat 1974–81, częściowo w ramach Problemu Węzłowego 05.1.6 (Rozwój erozyjnych metod kształtowania części maszyn), z inicjatywy koordynatora tego problemu Prof. zw. dr hab. inż. K. Albińskiego.

Pracę nad ECH poprzedzono analizą jakościowych i ilościowych potrzeb przemysłu krajowego na tę nową technologię. Przeprowadzone podstawowe badania teoretyczne i doświadczalne tego procesu umożliwiły autorowi zaprojektowanie i zbudowanie, przy pomocy Współpracowników, prototypów przemysłowych obrabiarki, wykorzystanych następnie we wdrożeniach przemysłowych tego procesu.

W opracowaniu tym, oprócz przyjętej w skali międzynarodowej terminologii w nauce o metodach wytwarzania opartych na wykorzystaniu skoncentrowanych nośników energii (erozyjnych), starano się wykorzystać również terminologię przyjmowaną w nauce o konstrukcji maszyn, z których podstawowe pojęcia przytoczono i omówiono w pierwszych rozdziałach własnych badań teoretycznych.

W realizacji badań doświadczalnych i prac wdrożeniowych procesu ECH pomagał autorowi wieloosobowy Zespół Współpracowników, zajmujący się tą problematyką pod kierownictwem i według koncepcji autora. Kilku z zespołu związało także swój dalszy rozwój naukowy z tym tematem, kończąc lub aktualnie realizując przewody doktorskie (wyszczególnione w przypisach do tekstu pracy), których promotorem jest autor. Im też — a przede wszystkim wspomagającemu dobrymi radami Prof. zw. dr hab. inż. K. Albińskiemu — autor zawdzięcza możliwość napisania tej pracy.



WAŻNIEJSZE SKRÓTY I OZNACZENIA

SKRÓTY

- ACG – sterowanie adaptacyjne procesem honowania (geometryczne),
CS, CZ – cechy materiałowe obrabianych cylindrów: S – stalowych, Z – żeliwnych,
 C_d, C_g, C_m – cechy konstrukcyjne, odpowiednio: d – dynamiczna, g – geometryczna,
 m – materiałowa,
ECH – honowanie elektrochemiczne,
(ECH+HS) – honowanie elektrochemiczne zakończone za pomocą HS,
ECM, ECMc – obróbka elektrochemiczna bezstykowa, ciągła lub impulsowa,
HD – honowanie dwukierunkowe,
HJP – honowanie jednokierunkowe poprzeczne,
HJW – honowanie jednokierunkowe wzdłużne,
HS – honowanie ściernie (nie elektrochemiczne, tradycyjne),
UZ, UG – cechy konstrukcyjne uszczelnienia tłoka: Z – żeliwnego, G – gumowego.

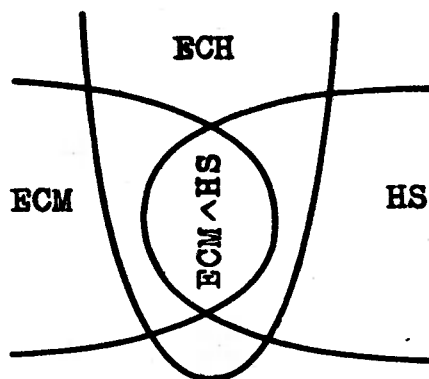
OZNACZENIA

- a_0 – naddatek obróbkowy,
 b – szerokość katody,
 d – średnica otworu,
 d_i – średnica otworu w płaszczyźnie l_i ,
 d_0 – początkowa średnica otworu,
 d_z – zadana średnica otworu,
 Δd – przyrost średnicy,
 Δd_i – przyrost średnicy w płaszczyźnie l_i ,
 E_c, E_e, E_h, E_m – cecha nośnika energii: c – chemiczna, e – elektryczna, h – hydrauliczna,
 m – mechaniczna,
 F_e, F_m, F_p – pole powierzchni: e – katody, n – narzędzia, p – kształtowanej,
 f, f_f – częstość, częstość oscylacji,
 h – długość skoku narzędzia,
 h_f – amplituda oscylacji,
 h_s – minimalna długość skoku narzędzia,
 i – natężenie prądu elektrycznego,
 j – jednostkowa gęstość prądu elektrycznego,
 K – liczba podwójnych skoków narzędzia,
 l – długość otworu,
 l_c – długość otworu o zbliżonej liczbie n , oddziaływań narzędzia,
 l_n, l_r – długość narzędzi odcinkowych,
 l_0 – położenie obrabianego otworu względem początku układu współrzędnych,
 l_p – obwodowe przesunięcie śladów narzędzia,
 l_s – długość powierzchni stożkowej,
 M_e, M_h, M_x – cecha nośnika masy: e – elektrolit, k – katoda, s – ścierniwo,
 M_0 – moment oporowy ECH,

m	– masa wg prawa Faradaya,
Δm	– ubytek lub przyrost masy,
N	– wymiar nominalny,
N_L	– nośność liniowa profilu powierzchni,
n	– prędkość obrotowa,
n_1	– liczba oddziaływań narzędzia,
P_x	– składowa wzdłużna oporów ECH,
p	– nacisk jednostkowy na pilniki ścierne lub ciśnienie medium układu rozpięcia pilników ściernych,
P_j	– obliczeniowy nacisk jednostkowy na pilniki ścierne,
R_b, R_c, R_a, R_t, R_s	– rezystancja: b – bocznika, c – katody, e – anody, k – kompensatora, s – szczeliny,
R_m, R_{max}, R_t	– parametry chropowatości,
r, r_0	– promień, promień odpowiadający d_0 ,
Δr	– przyrost promienia,
s, s_0	– grubość szczeliny, grubość szczeliny początkowej,
T	– tolerancja,
t, t_e, t_p, t_r	– czas, odpowiednio: e – oddziaływania katody, p – postoju katody, r – roztwarzania,
U_{ca}, U_x	– napięcie: ca – międzyelektrodowe, x – w miejscu x ,
$\Delta U_a, \Delta U_c$	– spadek napięcia: a – na anodzie, c – na katodzie,
v, v_j, v_e	– prędkość narzędzia: v – obwodowa, v_j – posuwowa, v_e – wypadkowa,
v_c	– prędkość przepływu elektrolitu,
v_{fj}	– prędkość ruchu oscylacyjnego,
v_g	– prędkość katody normalna do powierzchni,
w_1, w_2	– dobieg, wybieg narzędzia,
x_a, x_b	– odległość od katody,
$x'_a(t), x'_b(t)$	– prędkość roztwarzania elektrochemicznego,
z	– liczba narzędzi odcinkowych,
α	– kąt skrzyżowania śladów obróbki,
β	– kąt przestawienia obrotowego narzędzia,
γ	– kąt przesunięcia śladów obróbki,
$\delta, \delta_0, \delta_r, \delta_w, \delta_p$	– odchyłka kształtu, odpowiednio: δ_0 – początkowa, δ_r – okrągłości, δ_w – walcowości, δ_p – prostoliniowości osi,
ϵ	– kąt przesunięcia śladów obróbki,
ξ	– kąt obrotu wektora v_{fj} ,
ϑ	– objętość właściwa roztwarzania,
κ, κ_1	– przewodność właściwa elektrolitu: κ – pasywowującego słabo, κ_1 – pasywowującego silnie,
ϱ	– oporność właściwa,
φ	– kąt obrotu narzędzia po wykonaniu jednego podwójnego skoku,
ψ	– linia prądu elektrolitu.

I. PROBLEMATYKA HONOWANIA, CEL I OGÓLNY ZAKRES PRACY

Znane od blisko pół wieku honowanie (gładzenie, osełkowanie) ścierne (HS), realizowane za pomocą narzędzi ściernych (pilników, oselek), jest obecnie jedną z najbardziej rozpowszechnionych odmian obróbki wykańczającej, zamykającej sekwencję stosowanych zdarzeń wytwórczych: obróbka zgrubna, kształtująca, wykańczająca. Głównym celem obróbki wykańczającej, w tym także honowania, zwanej często gładkością, jest ostateczne ukonstytuowanie obrabianej powierzchni. Honowanie znajduje zastosowanie głównie w obróbce dokładnych otworów, przeważnie o postaci walca obrotowego o znacznym stosunku l/d . Bywa także stosowane do obróbki powierzchni zewnętrznych. Często – z racji zastosowanych parametrów obróbki – honowanie nazywa się superfiniem lub mikrofiniem, pomimo iż procesy te są realizowane za pomocą



Rys. 1. Problemy omawiane w pracy: ECH – honowanie elektrochemiczne, ECM – elektrochemiczna obróbka bezstykowa, HS – honowanie ścierne (tradycyjne), $ECM \wedge HS$ – zagadnienia związane z jednoczesnym występowaniem ECM oraz HS

narzędzi o cechach konstrukcyjnych jak w HS. Powszechnie uważa się, że honowanie jest obróbką czasochłonną, mało wydajną, szczególnie gdy są stawiane duże wymagania dokładności makro- i mikrogeometrii obrabianych powierzchni w materiałach trudnoskrawalnych lub o dużej twardości [47, 55, 61, 62, 115, 122, 130].

Jedną z niewielu obróbek, niewrażliwych na cechę materiałową i dynamiczną kształtowanych elementów, jest obróbka elektrochemiczna bezstykowa (ECM). Rozwinęła się ona na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat do tego stopnia, że (pomimo braku ciągle jeszcze ogólnej teorii uwzględniającej w pełni rzeczywiste warunki oraz

opisującej proces w ciągu całego jego przebiegu) można w wielu przypadkach za jej pomocą znacznie zwiększyć wydajność kształtowania elementów, szczególnie o złożonych kształtach w twardych i trudnoskrawalnych materiałach [2, 61, 68, 97, 106]. Można także za jej pomocą znacznie rozszerzyć dotychczasowe możliwości wytwórcze [2, 6, 53, 54, 61, 69, 106, 110], pomimo uzyskiwania ciągle jeszcze małych dokładności wymiarowo-kształtowych i stereometrycznych obrabianej powierzchni [2, 47, 66, 67, 68, 81, 106].

Połączenie HS i ECM w jeden proces (rys. 1) prowadzi do powstania jakościowo nowej obróbki – honowania elektrochemicznego (ECH). Można oczekiwać, iż stanie się ona na tyle wydajną, że umożliwi realizację obróbki kształtującej i wykańczającej w jednym zabiegu wytwórczym, przy jednoczesnym spełnieniu wymagań im stawianych. Jest również prawdopodobne, że ECH może posiadać możliwości wytwórcze nieosiągalne dla ECM lub HS. Poznanie tych problemów jest głównym celem tej pracy.

Honowanie elektrochemiczne (ECH) jest procesem do tej pory mało poznanym, gdyż rozwinęło się dopiero w latach siedemdziesiątych. Główny problem w ECH, wymagający wyjaśnienia w badaniach teoretycznych i doświadczalnych tego procesu, to łączne występowanie ECM i HS w jednym zabiegu obróbkowym. W szczególności celem tych badań jest wyjaśnienie udziału najistotniejszych czynników ECM oraz HS w usuwaniu warstw wierzchnich obrabianego materiału i oddziaływania tych procesów na wskaźniki wytwórcze (technologiczne) oraz jakość użytkową warstwy wierzchniej kształtowanej za pomocą ECH. Zakres pracy, na który składają się badania teoretyczne i doświadczalne, niespotykane w dostępnej literaturze, ujmuje zagadnienia istotne z teoretycznego poznania i praktycznego stosowania ECH, takie jak: analizę teoretyczną kształtowania powierzchni o postaci walca obrotowego za pomocą honowania jednokierunkowego oraz dwukierunkowego (HD), wpływ sposobu doprowadzenia energii elektrycznej do strefy obróbki na spadki napięć w szczelinie międzyelektrodowej, wpływ cechy geometrycznej oraz ruchów stycznych katody na odchyłki kształtu obrabianej powierzchni, wpływ sposobu doprowadzenia oraz właściwości elektrolitu na odwzorowanie cech geometrycznych katody i prędkość zmniejszania odchyłki kształtu honowanej powierzchni. Zagadnienia dotyczące ECM lub HS są omówione w pracy na tyle, na ile jest to konieczne dla lepszego przedstawienia ECH. Dotyczy to zagadnień: wpływu grubości szczeliny międzyelektrodowej na prędkość zmniejszania odchyłki kształtu, wpływu ruchu elektrolitu na odwzorowanie cech geometrycznych katody oraz niektórych fragmentów HD.

Niezależnie od problemów badawczych już wymienionych, całą uwagę w pracy skupiono na wyjaśnieniu w badaniach teoretycznych i doświadczalnych (wynika to z potrzeb teoretycznych i praktycznych zastosowań tego procesu) następujących zagadnień:

- dokładności wykonania kształtu (otworów o postaci walca obrotowego i znacznym stosunku l/d) w tym także w sposób automatyczny,
- chropowatości honowanej powierzchni, a zwłaszcza kierunkowości śladów obróbki i jej wpływie na ścierność i ścieralność powierzchni,
- wydajności obróbki, momentach i siłach towarzyszących temu procesowi,
- jakości użytkowej powierzchni honowanej elektrochemicznie.

Starano się także określić miejsce ECH wśród znanych sposobów wytwarzania, zakres możliwych zastosowań oraz wskazać ograniczenia w stosowaniu tego procesu.

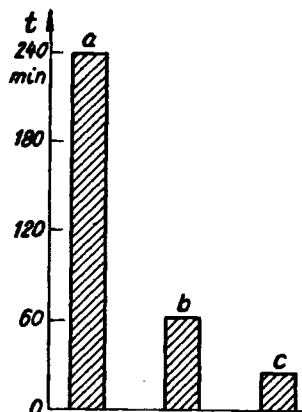
W pracy pominięto takie obróbki elektrochemiczno-ścierne jak elektrochemiczne dogładzanie oscylacyjne (superfinisz – ECS) [63, 64, 65, 109] oraz elektrochemiczne docieranie za pomocą luźnego ścierniwa (lapping – ECL) [86, 103].

II. ANALIZA TEMATU

1. OPIS I KRYTYCZNA OCENA DOTYCHCZASOWYCH WYNIKÓW BADAŃ

1.1. WYDAJNOŚĆ HONOWANIA ELEKTROCHEMICZNEGO

W dostępnej literaturze problem wydajności obróbki za pomocą ECH jest ekspozowany najbardziej. Z prac tych wynika w sposób jednoznaczny wielokrotny wzrost wydajności obróbki za pomocą ECH w prównaniu z HS [12, 48, 71, 72, 73, 90, 91, 92, 95, 102, 104, 105, 112, 118, 131] (np. rys. 1.1 i 1.2).

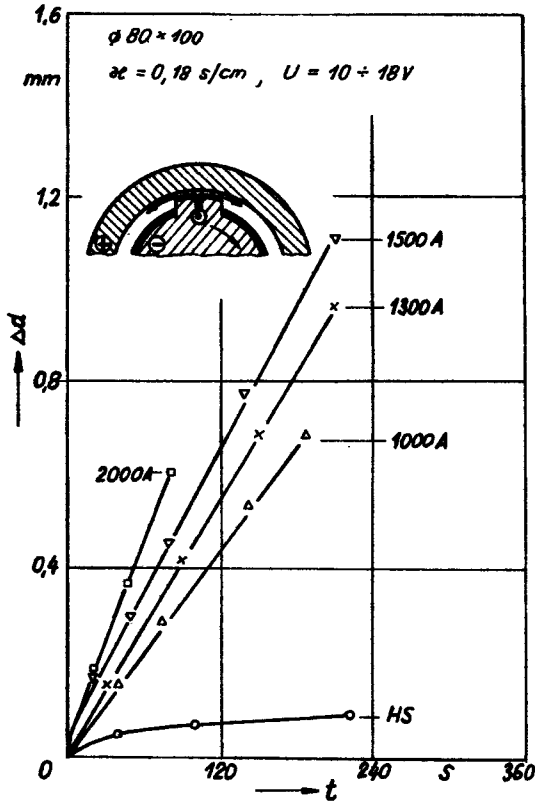


Rys. 1.1. Porównanie czasów honowania otworu ($d = 40$, $l = 1040$): a – HS za pomocą diamentowych pilników ściernych, b – ECH ($i = 1250$ A), c – ECH ($i = 3000$ A); naddatek na obróbkę 2,5 mm, początkowa odchyłka kształtu 0,6 mm, dopuszczalna odchyłka kształtu po honowaniu 0,01 mm [112]

Szczególnie wartościowe są prace [48, 90, 91] wskazujące, że twardość obrabianych za pomocą ECH materiałów nie wpływa znacząco na wydajność obróbki (rys. 1.3). Może ona nawet wzrastać, w zależności od zastosowanego elektrolitu, wraz ze wzrostem twardości obrabianego materiału. Dotyczy to zarówno różnego rodzaju stali obrabianych cieplnie, jak i węglików spiekanych i jest tłumaczone różną podatnością struktury kształtowanego materiału na tę obróbkę.

Z prac [12, 48, 71, 90, 91, 92, 95, 105] wynika, że wydajność obróbki za pomocą ECH jest uzależniona przede wszystkim od zastosowanego elektrolitu oraz jednostkowej gęstości j prądu elektrycznego (rys. 1.4).

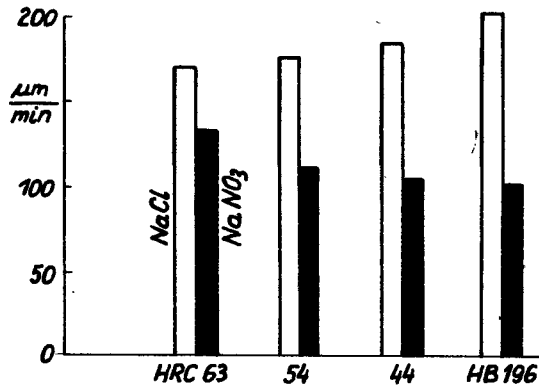
W wielu pracach z zakresu ECH [71, 72, 73, 95, 101, 105, 118, 121] omawia się szczegółowo szczelinę międzyelektrodową i potwierdza doświadczalnie znane zależności wynikające z praw Faradaya i Ohma, szczególnie dobrze zbadane w ECM. Z opracowań tych wynika, że jednostkowe gęstości j prądu elektrycznego w szczelinie uzależnione są od: właściwości elektrolitu, grubości szczeliny, przyłożonego napięcia, hydrodynamiki przepływu elektrolitu oraz jego temperatury na wlocie do szczeliny międzyelektrodowej. W pracach [46, 95] zwraca się uwagę, że w przypadku obróbki za



Rys. 1.2. Przyrost średnicy obrabianego otworu (w czasie) za pomocą ECH oraz HS [105]

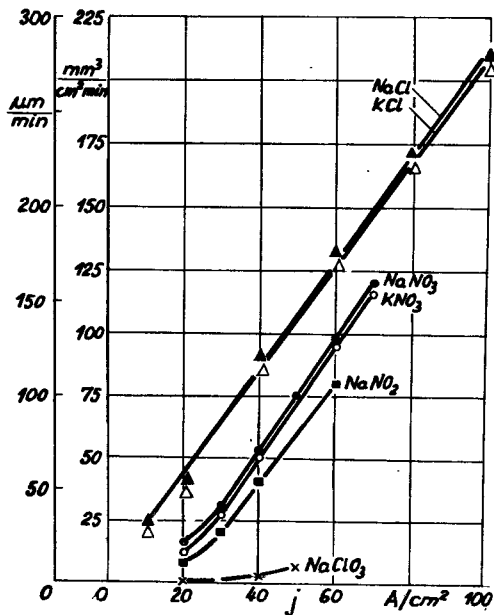
pomocą ECH przy stałych parametrach, temperatura honowanej powierzchni bardzo szybko osiąga wartość ustaloną i przewyższa temperaturę doprowadzanego elektrolitu zaledwie o kilkanaście stopni (rys. 1.5).

W niewielu pracach z zakresu ECH omawia się wpływ parametrów HS na wydajność obróbki, a w szczególności: cech konstrukcyjnych pilników ściernych, kinematyki narzędzia, prędkości skrawania v_c i nacisków jednostkowych p na pilniki. Ich wpływ jest od dawna w obróbce ścierniej uznawany [47, 55, 61, 115]. W pracy [12] wykazano

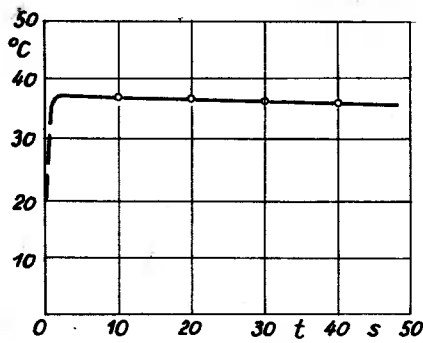


Rys. 1.3. Wpływ twardości stali stopowej oraz zastosowanego elektrolitu na prędkość przyrostu średnicy ($d = 40$) [48, 90]

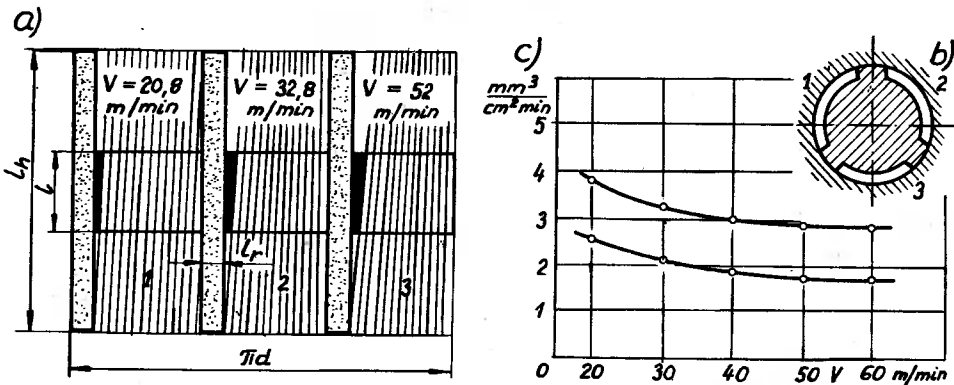
wpływ cech konstrukcyjnych pilników ściernych, a w szczególności diamentowych i ceramicznych, na wydajność ECH. Z pracy [131] wynika, że wymiar ziarna pilników nie ma wpływu na wydajność ECH. Wyniki badań [92, 95] są sprzeczne co do wpływu na wydajność ECH nacisku jednostkowego p na pilniki ścierne. Jedynie w opracowaniu [84] zwraca się uwagę na wpływ prędkości obwodowej v na wydajność obróbki za



Rys. 1.4. Wpływ zastosowanego elektrolitu oraz jednostkowej gęstości j prądu elektrycznego na objętościową wydajność oraz prędkość przyrostu średnicy ($d = 40$) [48, 90]



Rys. 1.5. Przebieg zmian temperatury powierzchni obrabianej za pomocą ECH [95]



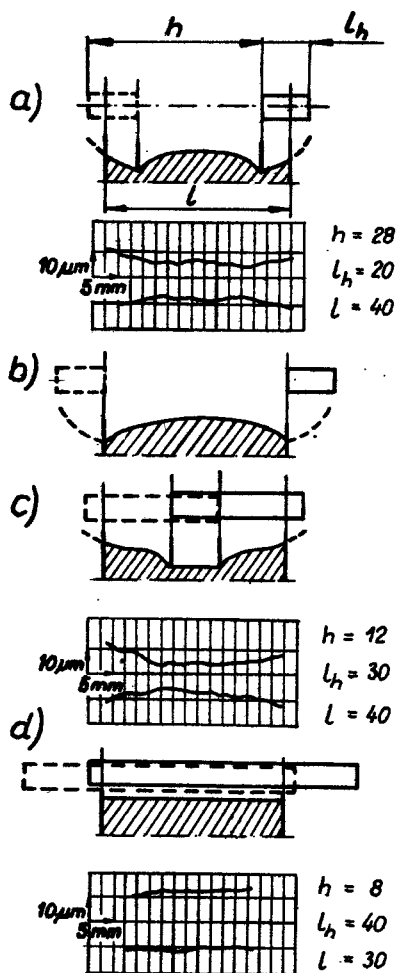
Rys. 1.6. Wpływ prędkości obwodowej v na wydajność ECH: (a, b) – badany przypadek, c – wyniki badań dla 2 różnych materiałów próbek [84]

pomocą ECH (rys. 1.6). Nie spotkano w literaturze wyników badań dotyczących wpływu kinematyki narzędzia na wydajność ECH, jak również badań optymalizacyjnych istotnych parametrów tego procesu, do których można zaliczyć: i , t , v , p .

1.2. DOKŁADNOŚĆ WYMIARU I KSZTAŁTU

Analizując dostępną literaturę z zakresu ECH w aspekcie uzyskiwanych dokładności wymiaru i kształtu można dojść do zastanawiającego wniosku. Okazuje się, że w przeważającej większości publikacji, autorzy sugerując się prostopadłościenną postacią pilnika ściernego, nadają taką samą postać katodzie [43, 71, 72, 73, 83, 84, 92, 95, 96, 105, 112, 113, 118, 121].

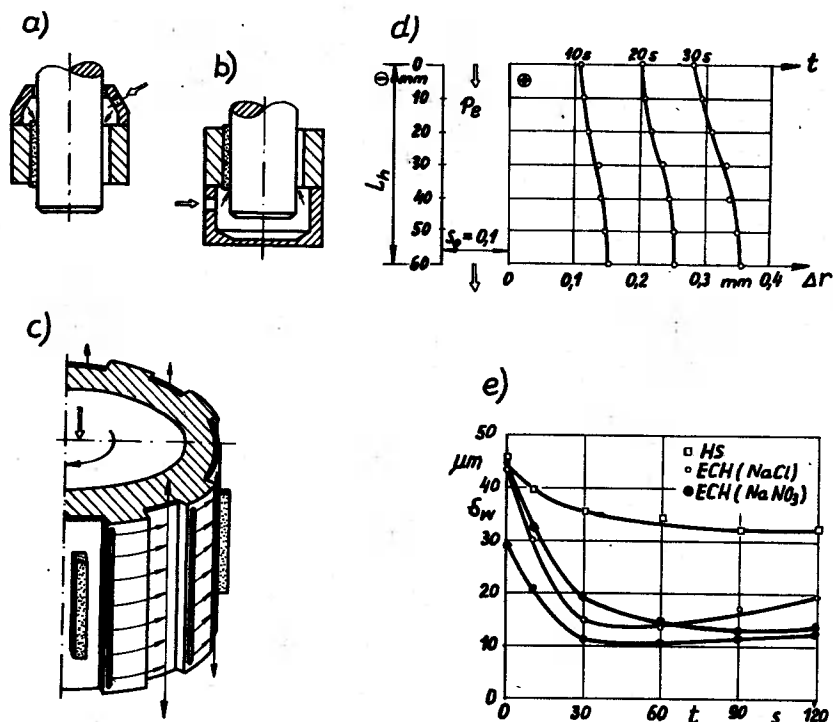
W nielicznych pracach [83, 92, 105, 112] analizuje się i bada wpływ: długości l_h katody, jej skoku h oraz długości l obrabianego otworu na czas oddziaływania katody t_e , a tym samym prostoliniowość tworzącej walca (rys. 1.7), nazywaną często odchyłką walcowości. Utożsamianie odchyłki prostoliniowości tworzącej walca w dowolnie wybranym miejscu, z odchyłką walcowości obrabianego otworu może prowadzić do mylnych wniosków, gdyż narzędzie wykonując poza ruchem posuwisto-zwrotnym



Rys. 1.7. Wpływ długości l_h katody, skoku h narzędzia oraz długości l obrabianego otworu na odchyłkę prostoliniowości tworzącej walca: a - ($l_h < h$), b - ($h \geq l + l_h$), c - ($l_h > h$), d - ($l_h \geq h + l$) [92]

z prędkością v_f , jeszcze ruch główny z prędkością v , może oddziaływać na kształtowaną powierzchnię w sposób zróżnicowany [37]. W pracy [104] wykazano teoretyczną jak i praktyczną możliwość obrabiania otworów nieprzelotowych za pomocą katody o zmiennej szerokości (wg krzywej wykładniczej o podstawie e) i regulowania czasu postoju t_p narzędzia w punkcie zmiany znaku wektora prędkości v_f . Jako kryterium oceny walцовości obrabianych otworów zastosowano wspomnianą wyżej ocenę prostoliniowości tworzącej.

W wielu pracach [71, 95, 101, 104, 105, 121] omówiono w sposób wystarczający wpływ napięcia U_{ca} oraz grubości szczeliny początkowej s_0 na prędkość zmniejszania odchyłki kształtu δ obrabianych otworów, dla katody nieruchomej i ruchomej w kierunku normalnym do obrabianej powierzchni, z uwzględnieniem niektórych elektrolitów stosowanych w ECM. Określono także niezbędny czas t lub nadatek na obróbkę a_0 dla zmniejszenia początkowej odchyłki kształtu δ do wartości wymaganej. Zagadnienia te są znane w FCM i omówione wyczerpująco w pracach [68, 99].



Rys. 1.8. Wpływ właściwości oraz sposobu doprowadzenia elektrolitu do strefy obróbki na odchyłki kształtu: (a ÷ c) – sposoby doprowadzenia elektrolitu, d – wpływ długości l_h katody na odchyłki kształtu, e – wpływ właściwości elektrolitu doprowadzonego do narzędzia (c) na odchyłki walцовości [73, 118]

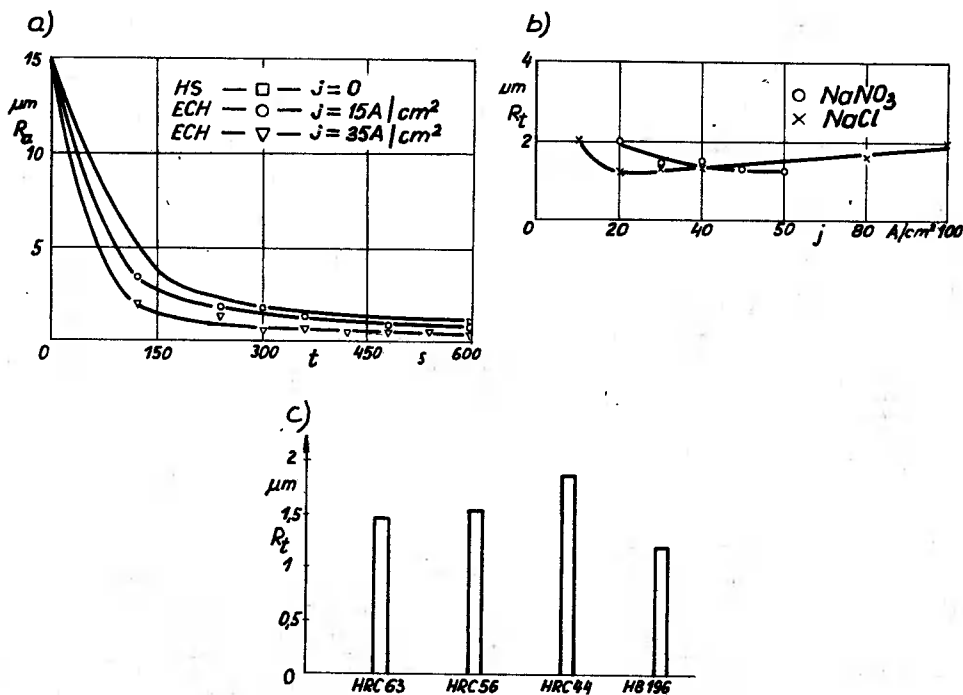
W publikacjach [71, 72, 73, 84, 95, 118] wykazano wpływ właściwości oraz sposobu doprowadzenia elektrolitu do strefy obróbki na odchyłki kształtu (rys. 1.8). W pracach [48, 90] zwrócono natomiast uwagę, że na prędkość zmniejszania odchyłek kształtu ma wpływ nie tylko zastosowany elektrolit, ale także liczba pilników ściernych. Znamienny jest fakt pomijania milczeniem nie tylko ważnych cech geometrycznych katody i pilników ściernych, ale także kinematyki narzędzia.

W wielu pracach [43, 48, 76, 90, 91, 92, 102, 105, 112, 113, 121] omawiających uzyskiwane za pomocą ECH dokładności wymiaru i kształtu, podaje się zwykle: naddatek na obróbkę a_0 , początkowe odchyłki walцовości δ_w i okrągłości δ_r , obrabianych otworów oraz uzyskane wymiary i odchyłki końcowe bez wyraźnego sprecyzowania cech konstrukcyjnych narzędzia i parametrów obróbki. Nie omawia się także sposobów pomiaru średnicy otworu i odchyłek kształtu oraz niezbędnych zabiegów w czasie obróbki, związanych z uzyskaniem założonych wartości. Brak tego typu informacji nie pozwala na przeprowadzenie szerszej analizy tego problemu. Podane informacje w zakresie uzyskanych dokładności wymiaru i kształtu w ECH mogą jedynie utwierdzić, że za pomocą tego sposobu wytwarzania można uzyskiwać dokładności większe aniżeli w przypadku HS.

1.3. CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI

Osiągana za pomocą ECH chropowatość powierzchni może być rozpatrywana w aspekcie ECM, HS lub obu łącznie. W literaturze dotyczącej ECM lub HS jest ona omówiona wystarczająco i dalej nie będzie rozpatrywana. Problem chropowatości powierzchni w ECH, jako łączne działanie ECM i HS, jest omówiony w pracach [48, 63, 64, 65, 71, 72, 90, 91, 92, 95, 102, 112, 113].

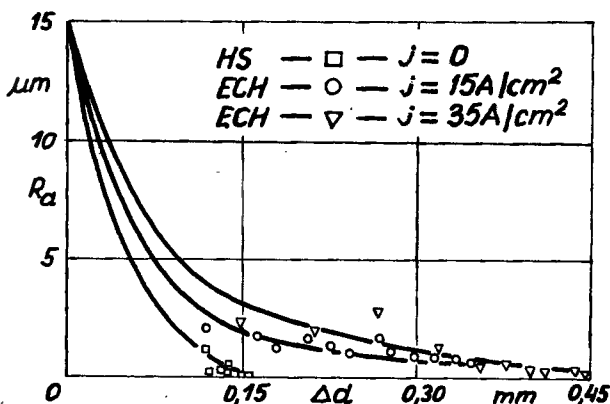
W pracach [48, 77, 90, 91, 102, 113] wykazano, że za pomocą ECH można uzyskać chropowatość powierzchni mniejszą i w krótszym czasie niż za pomocą HS (rys. 1.9a). Z badań [63, 64, 65] wynika, że za pomocą połączonego działania ECM i HS można uzyskiwać chropowatości powierzchni o parametrze $R_a = 0,005 \mu\text{m}$, nieosiągalne za pomocą innych sposobów obróbki.



Rys. 1.9. Wpływ badanych czynników ECH na chropowatość powierzchni: a – gęstości j prądu elektrycznego oraz czasu t obróbki, b – właściwości elektrolitu i gęstości j prądu elektrycznego, c – twardości (struktury) obrabianego materiału [90, 92, 102]

Z prac [48, 90, 91, 92, 102] wynika, że chropowatość powierzchni w ECH zależy nie tylko od zastosowanego elektrolitu i jednostkowych gęstości j prądu elektrycznego (rys. 1.9b), ale także od twardości (struktury) obrabianego materiału (rys. 1.9c). W opracowaniu [131] wykazano, że na chropowatość powierzchni obrabianej za pomocą ECH wpływa natężenie przepływu elektrolitu i nie wpływa w sposób istotny wymiar ziarna piłników ściernych. Wzrost natężenia przepływu elektrolitu zwiększa chropowatość powierzchni proporcjonalnie do zmniejszenia wartości napięcia mię-

dzyelektrodowego. Wymiar ziarna pilników ściernych, w przebadanym zakresie zmian (280, 340, 400), pomimo że nie wpływa na chropowatość powierzchni w ECH, może okazać się decydujący w przypadku kończenia tej obróbki z wyłączonym prądem elektrycznym. Taki sposób kończenia ECH, omówiony w dalszej części pracy, zwiększa udział HS w ostatecznym ukształtowaniu chropowatości obrabianej powierzchni. Ten problem, jak również wpływ istotnych parametrów ECH (i , t , v_e , p) na chropowatość powierzchni, nie został omówiony wyczerpująco w dostępnej autorowi literaturze.



Rys. 1.10. Niezbędne nadładki obróbkowe dla uzyskania określonego parametru chropowatości powierzchni [102]

W pracy [102] zwrócono uwagę, że dla osiągnięcia za pomocą ECH określonych parametrów chropowatości wymagane są większe nadładki obróbkowe, niż w przypadku HS (rys. 1.10).

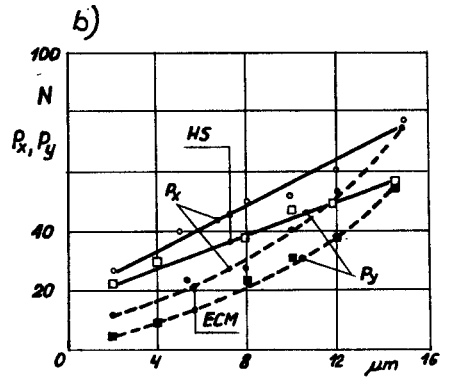
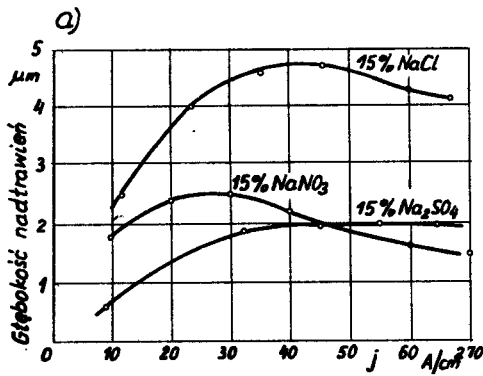
1.4. ROLA ZIARNA ŚCIERNEGO W PROCESIE ELEKTROCHEMICZNEGO HONOWANIA

ECH jest procesem, w którym jednocześnie występują:

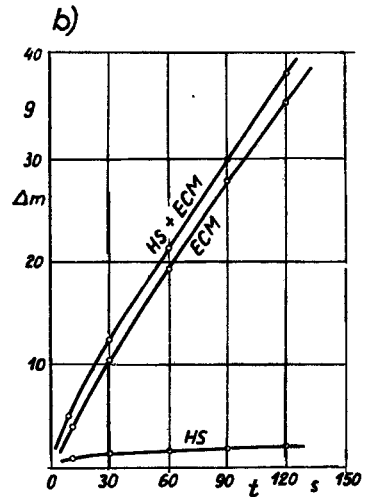
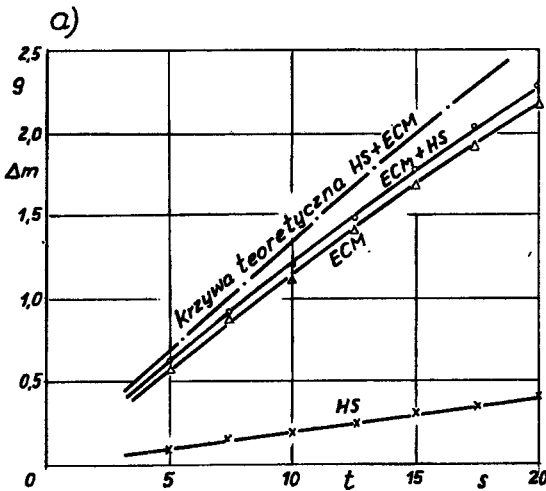
- roztwarzanie anodowe, charakterystyczne dla ECM,
- mikroskrawanie, znamienne dla HS.

W wielu pracach [1, 68, 86, 90, 91, 92, 95, 102, 113] wykazano, że roztwarzanie anodowe nie występuje równomiernie na całej powierzchni. Pojawiają się nadtrawienia fazowych składników, bardziej podatnych na ECM (rys. 1.11a). Tworzą one powierzchnię o określonej mikrogeometrii, charakteryzującą się obniżoną wytrzymałością mechaniczną (rys. 1.11b).

Z prac [71, 95, 131] wynika, że udział obróbki ściernej w usuwaniu nadładku obróbkowego za pomocą ECH jest różny i zależy od zastosowanych elektrolitów. Udział HS w ECH nie jest duży dla elektrolitów pasywujących słabo (rys. 1.12). W przypadku zastosowania w ECH elektrolitów pasywujących silnie udział czynnika ściernego wzrasta. Pilniki ściernie wykonują nie tylko pracę skrawania, ale także intensyfikują proces roztwarzania elektrochemicznego przez mechaniczne usuwanie



Rys. 1.11. Wpływ elektrolitu oraz jednostkowej gęstości j prądu elektrycznego na: a – głębokość roztrawienia granic ziarn w ECMc, b – siły mikroskrawania powierzchni (P_x, P_y) obrabianej za pomocą HS oraz ECM (elektrolit 15% $\text{NaNO}_3, j = 30 \text{ A/cm}^2$) [1]



Rys. 1.12. Udział obróbki ścierniej w ECH z zastosowaniem elektrolitów pasywnujących słabo w krótkim (a) i dłuższym (b) przedziale czasu [71, 95]

warstwy spasywowanej, powodując tym samym zmianę stanu powierzchni z pasywnego na aktywny.

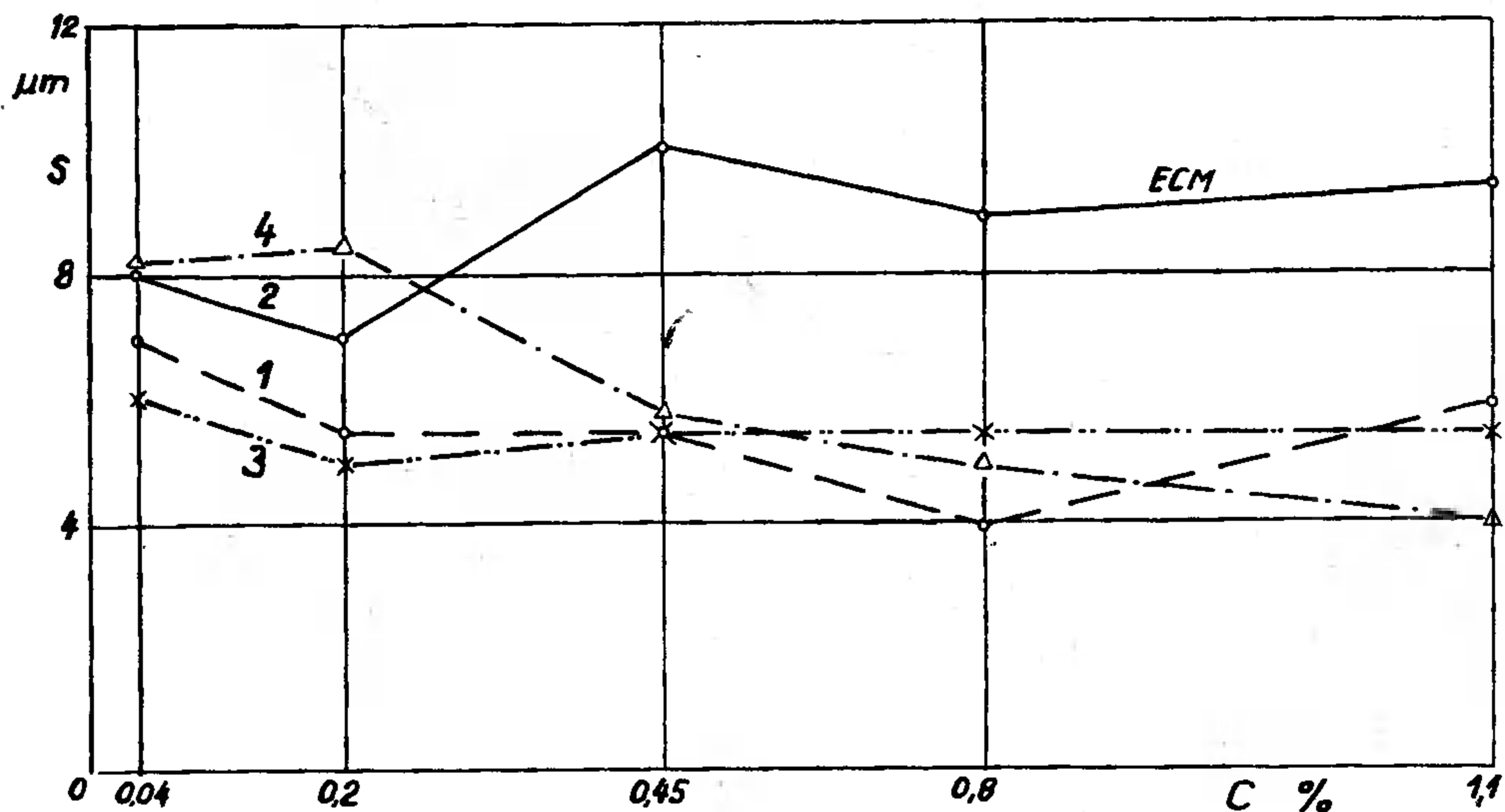
Dostępne prace z omawianego tematu nie wyjaśniają jednak wpływu istotnych parametrów ECM (i, t) oraz HS (v_e, p) na ostateczne wyniki ECH.

1.5. JAKOŚĆ UŻYTKOWA WARSTWY WIERZCHNIEJ

Problem jakości warstwy wierzchniej, obrabianej za pomocą ECH, jest omawiany jedynie sporadycznie w dostępnej literaturze [23, 33, 34, 35, 102, 131]. Znacznie lepiej problem jakości użytkowej warstwy wierzchniej omówiony jest w literaturze dotyczą-

cej HS [40, 42, 52, 56, 60, 62, 75, 77, 82, 93, 117, 129] oraz ECM [46, 68, 69, 74, 86, 108, 124]. Z prac tych wynika, że:

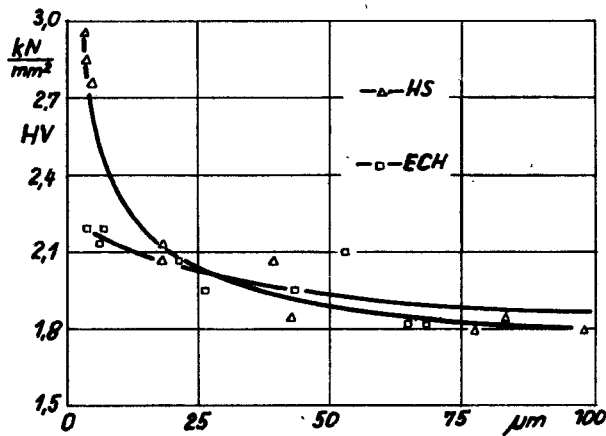
- HS wnosi naprężenia ściskające w warstwę wierzchnią,
- ECM w przypadku obróbki stali i większości stosowanych szeroko stopów nie wnosi własnych zmian w stan fizykalno-chemiczny warstwy wierzchniej,
- po ECM ma miejsce zmniejszenie odporności na ścieranie obrobionych powierzchni (rys. 1.13) oraz obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej obrobionych materiałów.



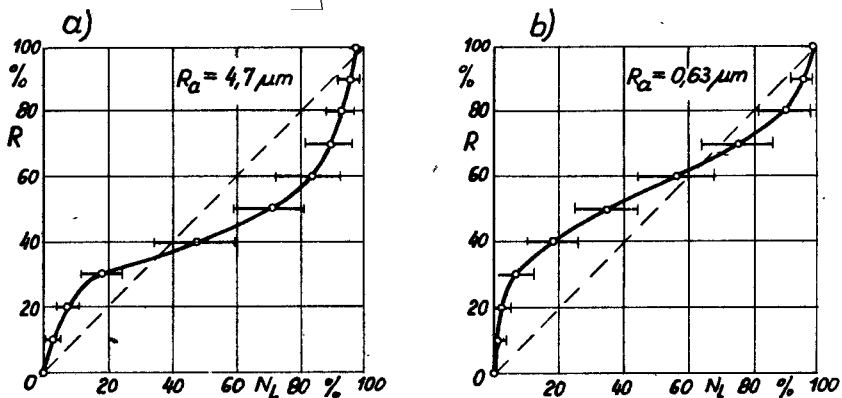
Rys. 1.13. Ścieralność (s) stali w zależności od sposobu wytwarzania oraz zawartości węgla (c): 1 – przed ECM, 2 – po ECM, 3 – po obróbce ścierniej, 4 – po obróbce wiórowej [124]

Z prac [23, 33, 34, 35, 102, 131] wynika, że ECH wnosi mniejsze naprężenia ściskające w warstwę wierzchnią, niż HS, nawet jeśli w obu przypadkach stosowano te same naciski jednostkowe na pilniki ściernie (rys. 1.14). Wykazano także, że uzyskane charakterystyki struktury stereometrycznej powierzchni, oceniane na podstawie udziału nośnego liniowego profilu powierzchni (N_L) różnią się po ECH oraz ECM (rys. 1.15). Krzywe udziału nośnego powierzchni po ECH wykazują także zróżnicowanie w zależności od zastosowanych parametrów obróbki.

Powyższe informacje nie są wystarczające dla jednoznacznego określenia jakości użytkowej warstwy wierzchniej po ECH, gdyż w zależności od sposobu kończenia tego procesu (np. z wyłączonym lub trwającym do końca roztwarzaniem prądu elektrycznego, bardzo małymi lub dużymi naciskami na pilniki ściernie), może on wnosić stan naprężeń w warstwę wierzchnią, znajdujący się pomiędzy stanami granicznymi: ECM – HS. W świetle powyższego konieczne jest przeprowadzenie szerokich badań ścierności i ścieralności warstwy wierzchniej wytworzonej za pomocą ECH lub (ECH+HS) i porównanie tych wyników badań ze ściernością i ścieralnością powierzchni HS.



Rys. 1.14. Mikrotwardość warstwy wierzchniej, uzyskana za pomocą HS i ECH [102]



Rys. 1.15. Udział nośny liniowy profilu powierzchni (N_L): a – ECM, b – ECH [131]

Większej uwagi wymaga także wpływ kierunkowości śladów obróbki, wynikającej ze sposobu honowania (HJW, HD, HJP), na ścierność i ścieralność powierzchni honowanej.

2. WNIOSKI Z ANALIZY TEMATU, TEZY BADAŃ WŁASNYCH

Analiza dostępnej literatury z zakresu ECH upoważnia do sformułowania następujących wniosków:

- wydajność obróbki za pomocą ECH jest kilku – a nawet kilkunastokrotnie – większa, niż za pomocą HS. Dotyczy to zwłaszcza obróbki materiałów trudnoskrawalnych lub o dużych twardościach. Badania wydajności ECH realizo-

- wane są najczęściej z uwzględnianiem zmiennych parametrów ECM oraz stałych parametrów HS. Z wielu prac wynika, że wydajność obróbki za pomocą ECH jest uzależniona od zastosowanego elektrolitu oraz jednostkowej gęstości j prądu elektrycznego. Brak jest jednomyślności w zakresie wpływu na wydajność ECH nacisku jednostkowego p na pilniki ścierne oraz prędkości skrawania v_e . Nie uwzględnia się także wpływu na wydajność ECH konstrukcji oraz kinematyki narzędzia;
- dokładność wymiaru, a przede wszystkim problem odchyłek kształtu powierzchni obrabianych za pomocą ECH, jest omówiony w literaturze najslabiej. Dotyczy to także ECM oraz HS. W przypadku ECM uzyskiwane odchyłki kształtu powierzchni mieszczą się najwyżej w polu tolerancji IT7. Rozwój ECMc zmierza głównie w kierunku poprawienia dokładności tej obróbki. Do problemu odchyłek kształtu powierzchni w HS podchodzi się w dwojaki sposób. Bardzo często zakłada się, że HS nie poprawia istniejących odchyłek kształtu obrabianej powierzchni, a sam proces honowania ogranicza się tylko do poprawienia jej mikrogeometrii oraz wprowadzenia w warstwę wierzchnią określonego stanu naprężeń mechanicznych. W podejściu drugim, odchyłki kształtu powierzchni ustala się w czasie trwania procesu za pomocą mierzenia lub sprawdzania i na tej podstawie zmienia się wybiegi narzędzia, wpływające istotnie w HD na wartości odchyłek walcowości. Powtarzanie tych czynności trwa dopóty, dopóki nie osiągnie się założonych wartości odchyłek dopuszczalnych. W tym przypadku proces HS zaliczany jest do czasochłonnych, gdyż nie został jeszcze zautomatyzowany. Osiągalne za pomocą HS odchyłki kształtu zależą także od wymiaru nominalnego honowanej powierzchni i nie są na ogół mniejsze od kilkunastu, najwyżej kilku mikrometrów. W przypadku ECH tylko w nielicznych pracach analizuje się teoretycznie i bada doświadczalnie problem odchyłek kształtu. Najczęściej problem ten analizuje się w aspekcie ECM, uwzględniającym wpływ na odchyłki kształtu: przyłożonego napięcia U_{ca} , grubości s_0 szczeliny międzyelektrodowej oraz zastosowanego elektrolitu, bez wyraźnego sprecyzowania cech konstrukcyjnych katody, pilników ściernych, kinematyki narzędzia oraz pozostałych parametrów procesu. Na podstawie literatury z zakresu ECH nie można wnioskować jak należy sterować procesem, aby otrzymać założone odchyłki kształtu. Można jednak przyjąć, że uzyskiwane za pomocą ECH dokładności wymiaru i kształtu nie odbiegają od dokładności uzyskiwanych za pomocą HS;
 - chropowatość powierzchni uzyskiwana za pomocą ECM lub HS jest omówiona w dostępnej literaturze szeroko, nie wyczerpująco zaś w przypadku ECH. W wielu pracach zwraca się uwagę, że po ECM otrzymuje się powierzchnię o charakterystycznej mikrogeometrii, wynikającej z nierównomiernego roztwarzania fazowych składników obrabianego materiału. Głębokość tych nadtrawień zależy głównie od zastosowanego elektrolitu oraz jednostkowych gęstości j prądu elektrycznego i wynosi najczęściej kilka mikrometrów. Osiągalna chropowatość powierzchni za pomocą ECM na ogół wynosi $R_a = (1,25 \div 0,04) \mu\text{m}$. W przypadku HS uważa się, że można osiągnąć chropowatości $R_a = (0,32 \div$

$\div 0,02$) μm . W dostępnej literaturze z zakresu ECH nie spotyka się pełnej informacji omawiającej wpływ poszczególnych parametrów procesu na chropowatość honowanej powierzchni oraz osiągnięte jej wartości. Najczęściej stwierdza się, że za pomocą ECH można uzyskiwać chropowatości powierzchni mniejsze i w krótszym czasie niż za pomocą HS. Jedynie w kilku publikacjach, w tym także autora, zwraca się uwagę, że za pomocą ECH można osiągnąć chropowatość powierzchni $R_a \leq 0,01 \mu\text{m}$, nieosiągalną dla ECM lub HS;

- jakość użytkowa warstwy wierzchniej po ECH w dostępnej literaturze jest omówiona fragmentarycznie. Znacznie lepiej omówiono ten problem dla ECM oraz HS. W przypadku ECM ogólnie stwierdza się, że warstwa wierzchnia stali oraz większości stosowanych szeroko stopów charakteryzuje się zmniejszoną odpornością na ścieranie, gorszą wytrzymałością zmęczeniową oraz większą korozyjnością, bez wyraźnego określenia ilościowego tych zmian. Wynika to głównie z nierównomiernego roztwarzania powierzchni obrabianego materiału. Jednocześnie stwierdza się, że w przypadku obróbki w/w materiałów ECM nie wnosi własnych zmian w stan fizykalno-chemiczny warstwy wierzchniej, przejawiających się powstawaniem naprężeń mechanicznych, charakterystycznych dla HS. W tym ostatnim przypadku przyjmuje się, że HS wnosi naprężenia ściskające w warstwę wierzchnią o wartości uzależnionej od parametrów procesu, a grubość warstwy o zmienionych własnościach wynosi od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów. W nielicznych pracach omawiających jakość użytkową warstwy wierzchniej po ECH stwierdza się, że proces ten wnosi blisko dwukrotnie mniejsze naprężenia ściskające w warstwę wierzchnią niż HS. Powierzchnia po ECH charakteryzuje się także inną nośnością, niż powierzchnia po ECM lub HS, uzależnioną od zastosowanych parametrów procesu. W dostępnej literaturze nie spotyka się badań porównawczych ścierności i ścieralności warstwy wierzchniej po ECH oraz HS. Nie zauważono także badań dotyczących wpływu kierunkowości śladów obróbki honowanej powierzchni na jej ścierność i ścieralność.

W wyniku analizy literatury, a szczególnie sprecyzowanych wniosków, wymagają wyjaśnienia w badaniach teoretycznych i doświadczalnych (wynika to ze względów teoretycznych i wdrożeniowych procesu ECH) zagadnienia dotyczące dokładności ECH, a szczególnie makro- i mikrogeometrii powierzchni, obszaru zastosowań ECH ograniczonego właściwościami obrabianych materiałów i właściwościami warstwy wierzchniej. Dalszych badań wymaga także problem wydajności ECH oraz wpływu kierunkowości śladów obróbki na ścierność i ścieralność honowanej powierzchni.

Biorąc pod uwagę wymagania techniczne i ekonomiczne stawiane procesom wytwórczym oraz wnioski z literatury z zakresu ECH, autor w pracy zamierza wykazać, że:

1. Dokładność wymiaru, a przede wszystkim odchyłek kształtu oraz mikrogeometrię powierzchni obrabianej za pomocą ECH, można w tym złożonym procesie uzyskać nie mniejszą, niż za pomocą HS, w czasie wielokrotnie krótszym, w tym także w sposób automatyczny. Badania teoretyczne tego problemu wymagają przeprowadzenia analizy sposobów kształtowania powierzchni o postaci walca

obrotowego oraz ustalenia wpływu na odchyłki kształtu: sposobu doprowadzenia energii elektrycznej w strefę obróbki, właściwości oraz sposobu doprowadzenia elektrolitu w strefę obróbki, grubości szczeliny międzyelektrodowej, czasu oddziaływania katody, liczby oddziaływań pilników ściernych oraz kinematyki narzędzia. Weryfikacja doświadczalna przeprowadzonej analizy teoretycznej wymaga materialnej realizacji narzędzi do ECH, opracowanych w oparciu o tę analizę i przeszukane pole możliwych rozwiązań konstrukcyjnych. Dotyczy to zwłaszcza narzędzi konstrukcji autora, umożliwiających HD oraz HJW [27, 39];

2. Możliwe jest zastąpienie stosowanej dotychczas dwuzabiegowej obróbki kształtującej i wykańczającej jednozabiegową operacją za pomocą ECH. Wykazanie tej możliwości wymaga przeprowadzenia badań doświadczalnych tego procesu, uwzględniających wpływ istotnych parametrów ECH oraz konstrukcji i kinematyki narzędzia na makro- i mikrogeometrię powierzchni, wydajność obróbki oraz siły i momenty towarzyszące temu procesowi;
3. Kierunkowość śladów obróbki istotnie wpływa na jakość użytkową honowanej powierzchni, ocenianą na podstawie jej ścierności i ściernalności. Teza ta wymaga potwierdzenia badaniami konstrukcyjnymi [44, 45] honowanej powierzchni, które obejmują także badania jakości użytkowej warstwy wierzchniej obrabianej za pomocą ECH oraz HS.

III. WŁASNE BADANIA TEORETYCZNE

1. INFORMACJA, ENERGIA I MASA W PROCESIE KSZTAŁTOWANIA ELEMENTÓW MASZYN

Cybernetyczne pojęcia informacji, energii i masy są na tyle uniwersalne, że stają się przydatne także w wytwarzaniu elementów maszyn [8, 9, 20]. Można je zdefiniować, w oparciu o teorię projektowania i konstrukcji maszyn [44, 45] jako własności konkretów [17, 21]:

$$\begin{aligned} I &= \pi_I \wedge W, \\ E &= \pi_E \wedge W, \\ M &= \pi_M \wedge W, \end{aligned} \quad (1.1)$$

gdzie: I, E, M – cecha nośnika: I – informacji, E – energii, M – masy,
 π_I, π_E, π_M – postać nośnika: informacji (I), energii (E), masy (M),
 W – układ wymiarów;

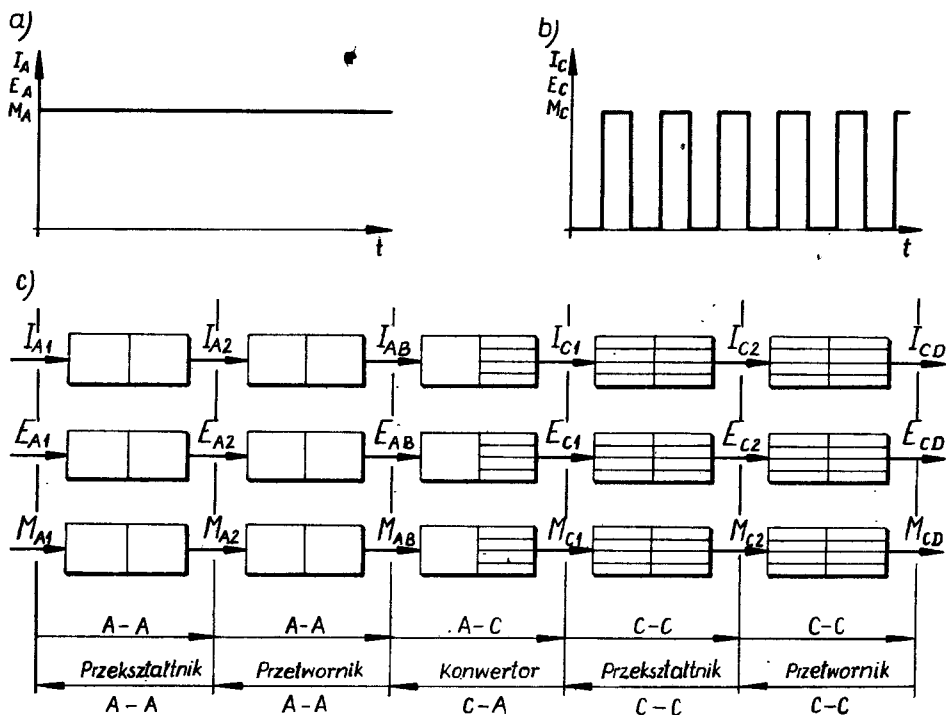
przy czym:

$$W = N' \wedge T', \quad (1.2)$$

gdzie: N' – wartość nominalna nośnika,
 T' – tolerancja nośnika.

Nośnik informacji w procesie wytwarzania – pojmowany jako wielkość, której można przypisać wartość – kojarzy się głównie z cechami geometrycznymi, materiałowymi i dynamicznymi elementów maszyn [44, 45], pomimo że będzie wykorzystywany także w celach organizacyjnych [20] procesu wytwórczego do określania masy i energii oraz sterowania ich przepływem (sterowanie sekwencyjne). Może on występować w postaci analogowej I_A lub dyskretnej I_C (rys. 1.1a i b). Do zapisywania i przesyłania informacji wykorzystuje się własności masowe i energetyczne, które można przekształcać, przetwarzać lub konwertować [8, 9, 17, 21], jak to pokazano na rys. 1.1c. Źródłem informacji może być organizator lub każde inne źródło, z probabilistycznym włączeniem. W tym ostatnim przypadku informacja nosi nazwę zakłóceń I_z [9, 19].

Obecny okres rozwoju technosfery [26] charakteryzuje się tym, że w procesie wytwarzania potrafimy wykorzystywać energię mającą różne postacie, w pojedynczym bądź połączonym działaniu, nie zawsze znając ich własności. Wydaje się, że energia oceniana na podstawie jej własności i właściwości, rozumianych jako jej relacje wewnętrzne i zewnętrzne, może być przydatna do podziału sfer zainteresowań nauk podstawowych i technicznych. Postać nośników energii, w zależności od zastosowań



Rys. 1.1. Cechy nośników: informacji (I), energii (E), masy (M); a – postać analogowa, b – postać dyskretna, c – przekształcanie, przetwarzanie, konwertowanie

w poszczególnych technikach wytwarzania, powinna być jednym z istotnych kryteriów ich podziału.

Niniejsza praca w całości dotyczy łącznego wykorzystania nośników energii: elektrycznych (E_e), chemicznych (E_c) oraz mechanicznych (E_m), w kształtowaniu elementów maszyn o postaci walca obrotowego, a w szczególności wykonywania otworów o tej postaci. Stąd też obróbkę tę należałoby oznaczać symbolem ECM, złożonym z symboli wykorzystywanych w procesie postaci nośników energii. Ponieważ symbol ECM (Electrochemical Machining) w literaturze światowej jednoznacznie oznacza obróbkę elektrochemiczną bezstykową, postanowiono w tej pracy zastosować symbol ECH, oznaczający elektrochemiczne honowanie, przyjmując założenie, że to ostatnie słowo, znane od dawna, będzie się zawsze kojarzyło czytającemu z mechanicznym oddziaływaniem energii na kształtowaną powierzchnię. Nośniki energii, podobnie jak informacji oraz masy, można przekształcać, przetwarzać lub konwertować [8, 9, 17, 21] (rys. 1.1).

W wielu procesach wytwórczych, takich jak: odlewnictwo, technika proszków spiekanych, obróbka plastyczna itp. występuje pojęcie formy, którą ogólnie można określić pomieszczeniem. Zazwyczaj pod pojęciem pomieszczenia rozumie się wytwór, ograniczający w pożądanej mierze swobodę ruchu zbiorom materialnym poprzez to, że stanowi on obszar wyodrębniony z przestrzeni [44, 45]. Definicja ta na użytek wytwarzania wymaga dodatkowego uściślenia.

W przypadku odlewania lub spiekania – pomieszczenie występuje w postaci wyraźnego wytworu (formy) – i jest realizowane w zasadzie przez masę. Przykład odlewania metali, bez formy, w stanie nieważkości na orbicie wokół ziemskiej, może być dowodem na wyznaczenie pomieszczenia wyłącznie za pomocą sił masowych, natomiast odlewanie odśrodkowe jest przykładem realizacji pomieszczenia w sposób mieszany – za pomocą sił masowych (odśrodkowych) i ograniczeń nałożonych przez masę formy.

W kształtowaniu plastycznym za pomocą wahającej matrycy, a także w skrawaniu, pomieszczenie, lub ogólniej, cechy geometryczne kształtowanego elementu, odzworowane są za pomocą masy i energii mechanicznej narzędzia. W tym przypadku można mówić o pomieszczeniu kinematycznym albo symulowanym.

Przyjmując taki tok rozumowania można uznać, że pomieszczenie może być wyznaczone masą, energią lub obu łącznie. Można im przypisać określone cechy geometryczne i opisać za pomocą informacji.

W przypadku ECH, szczególnie zaś w przypadku, gdy:

$$F_n \ll F_p \quad (1.3)$$

gdzie: F_n – pole powierzchni narzędzia,

F_p – pole powierzchni kształtowanej,

niezbędna jest energia mechaniczna, umożliwiająca realizację pomieszczenia kinematycznego bez względu na to, czy pomieszczenie będzie wyznaczone narzędziem ściernym, czy też katodą, kształtującą powierzchnię za pomocą roztwarzającego działania energii elektrycznej i chemicznej, nie wnikając na razie w samą istotę tego procesu.

2. OGÓLNE SPOSOBY WYTWARZANIA ELEMENTÓW MASZYN

2.1. POJĘCIE CECH KONSTRUKCYJNYCH

Proces wytwórczy elementów maszyn zmierza do nadania im określonych w procesie konstruowania cech konstrukcyjnych, zdefiniowanych przez [44, 45] jako:

$$\begin{aligned} C_m &= \pi_m \wedge W, \\ C_d &= \pi_d \wedge W, \\ C_g &= \pi_g \wedge W, \end{aligned} \quad (2.1)$$

gdzie:

C_m – cecha materiałowa,

C_d – cecha dynamiczna,

C_g – cecha geometryczna,

π_m, π_d, π_g – postać, odpowiednio: materiałowa, dynamiczna, geometryczna,

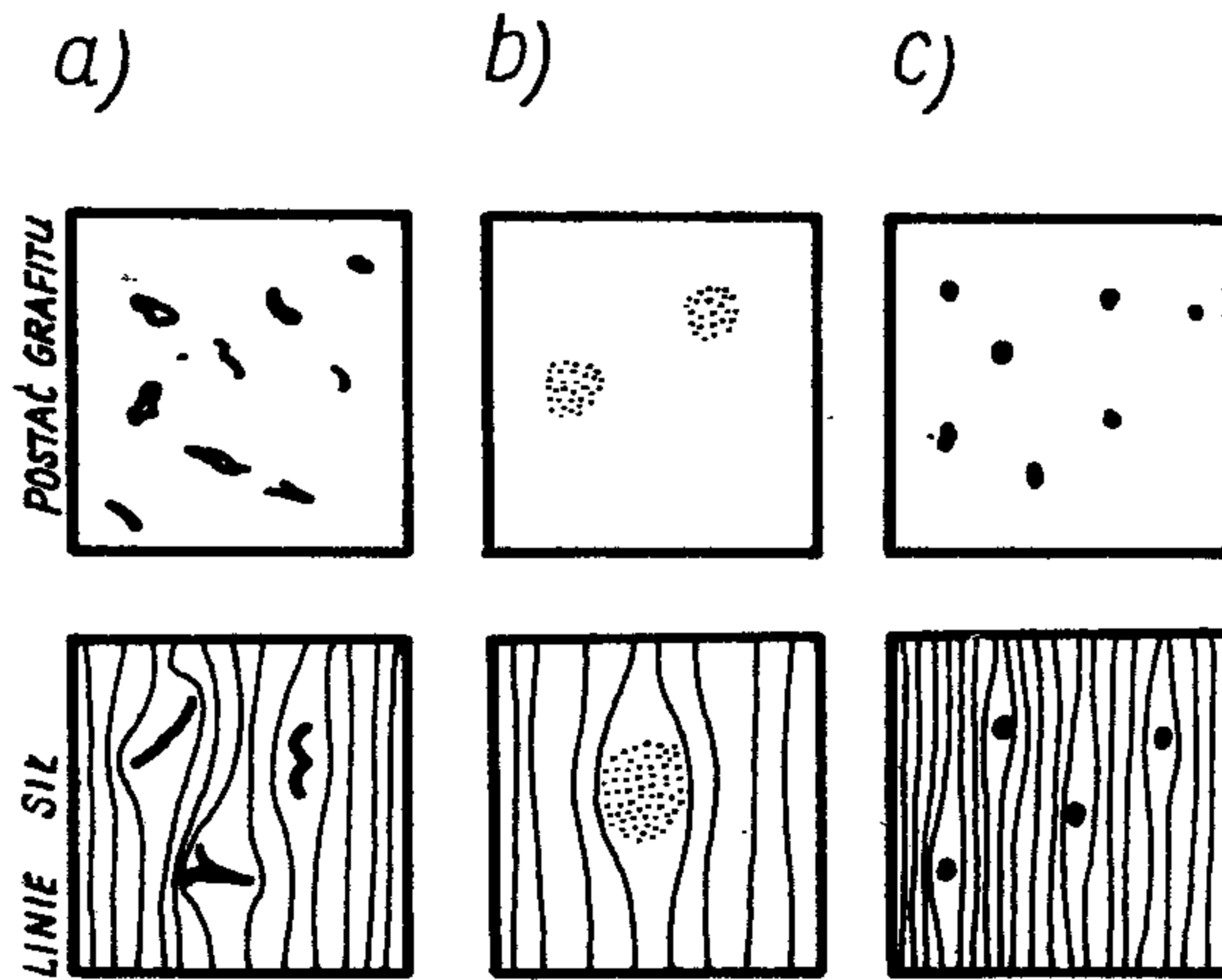
W – układ wymiarów;

przy czym:

$$W = N \wedge T, \quad (2.2)$$

gdzie: N – układ wymiarów nominalnych,
 T – tolerancja.

Rysunek 2.1 przedstawia przykład konstrukcyjnej cechy materiałowej C_m wraz z określeniem postaci materiałowej π_m (żeliwo szare, ciągliwe lub sferoidalne). Jednym z wielu możliwych wymiarów W może być wytrzymałość na rozciąganie (R_m). Tolerancja



Rys. 2.1. Przykład konstrukcyjnej cechy materiałowej (C_m): a – żeliwo szare, b – żeliwo ciągliwe, c – żeliwo sferoidalne [44, 45]

T wynika z granicznych wartości R_m . Rys. 2.2 ilustruje przykład wprowadzania konstrukcyjnej cechy dynamicznej C_d w czasie skrawania, gdzie postać dynamiczna π_d stanowić będzie o rodzaju naprężeń, celowo wprowadzanych do warstwy wierzchniej obrabianego materiału (naprężenia ściskające lub rozciągające), a ich wartość może być określona za pomocą wymiaru nominalnego N oraz tolerancji T . Pojęcia: postaci geometrycznej π_g , układu wymiarów W , wymiarów nominalnych N oraz tolerancji wykonania T , stanowiące o konstrukcyjnej cesze geometrycznej C_g są powszechnie znane i nie wymagają oddzielnego komentowania. W dalszej części tej pracy uwaga będzie skierowana głównie na kształtowanie za pomocą ECH powierzchni o postaci geometrycznej walca obrotowego.

2.2. SPOSOBY KSZTAŁTOWANIA GEOMETRYCZNEJ CECHY KONSTRUKCYJNEJ

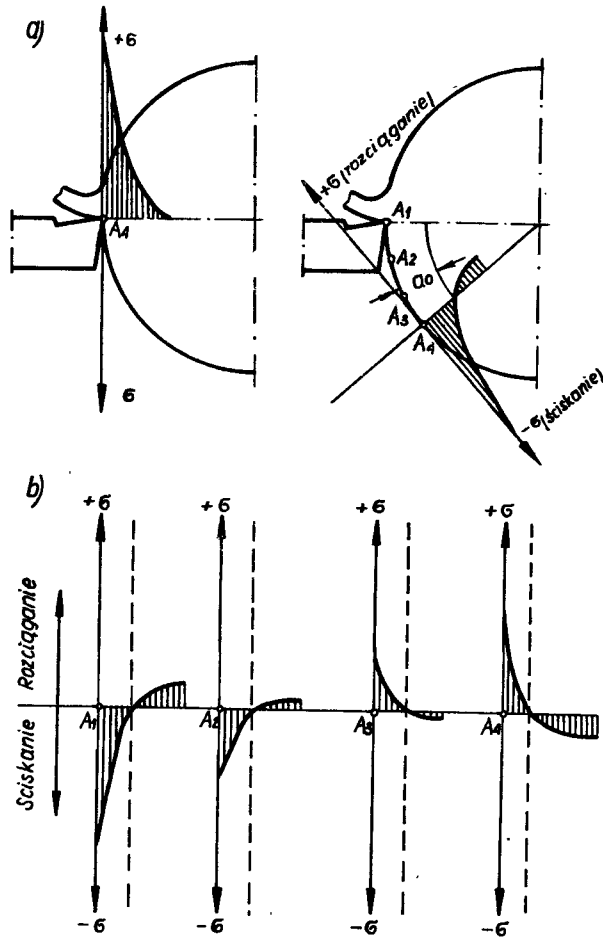
Nadawanie geometrycznych cech konstrukcyjnych elementom maszyn jest jednym z najważniejszych i bardzo czasochłonnych procesów wytwórczych. W swojej istocie proces ten sprowadza się do tego aby:

$$C_{g1} \rightarrow C_{g2}, \quad (2.3)$$

czyli:

$$\pi_{g1} \wedge W_1 \rightarrow \pi_{g2} \wedge W_2. \quad (2.4)$$

Możliwe są tutaj następujące przypadki [15, 51, 57, 61, 79, 116, 123]:



Rys. 2.2. Przykład wprowadzania konstrukcyjnej cechy dynamicznej (C_d): a – powstawanie naprężeń w modelu zimnym, b – powstawanie naprężeń w modelu cieplnym [61]

$$M_{C_{g1}} \rightarrow M_{C_{g2}} \quad (2.5)$$

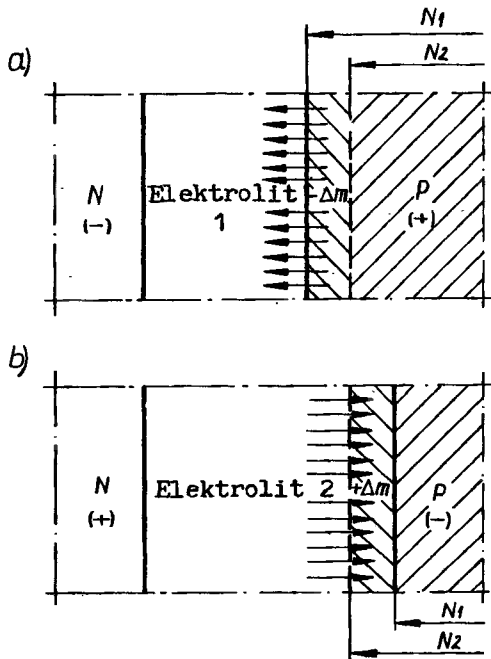
lub

$$M_{C_{g1} \pm \Delta m} \rightarrow M_{C_{g2}} \quad (2.6)$$

gdzie: $M_{C_{g1,2,\dots}}$ – masa o cechach geometrycznych 1, 2, ...,
 Δm – ubytek lub przyrost masy.

Przypadek (2.5) często nosi nazwę kształtowania bieżwiórowego [57], w którym zmianę cech geometrycznych uzyskuje się za pomocą cech geometrycznych pomieszczenia, wyznaczanego za pomocą masy, energii lub obu łącznie; wykorzystując przy tym plastyczność materiału lub inne od stałego stany skupienia.

Przypadek (2.6), polegający na odejmowaniu lub dodawaniu masy Δm do masy $M_{C_{g1}}$ w celu uzyskania $M_{C_{g2}}$, jest od dawna rozpowszechniony. Współcześnie, w miarę



Rys. 2.3. Przykład odejmowania (a) lub dodawania (b) masy Δm za pomocą energii elektrycznej i chemicznej: P – przedmiot obrabiany, N – narzędzie elektrochemiczne

poznawania coraz to nowszych, innych od mechanicznej, postaci nośników energii (rys. 2.3), oddziałujących na kształtowaną masę pojedynczo lub w sposób złożony jest coraz bardziej rozszerzany.

Honowanie elektrochemiczne (ECH), stanowiące przedmiot tego opracowania, dotyczy realizacji konstrukcyjnej cechy geometrycznej o postaci walca obrotowego poprzez odejmowanie masy Δm od obrabianego materiału za pomocą nośników energii: elektrycznych, chemicznych i mechanicznych.

Autor prowadzi także badania stanowiące odwrócenie procesu ECH (rys. 2.3b), w którym masa Δm jest dodawana do obrabianego otworu, co prowadzi do zmniejszania się jego średnicy. Badania te są prowadzone z myślą o usuwaniu skutków procesu tarcia (zużycia) lub przeciwdziałaniu im.

3. ANALIZA TEORETYCZNA KSZTAŁTOWANIA POWIERZCHNI O POSTACI WALCA OBROTOWEGO

3.1. PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH SPOSOBÓW KSZTAŁTOWANIA

Poszczególne powierzchnie elementów maszyn można kształtować za pomocą narzędzi punktowych, obwiedniowych oraz kształtowych [57, 79, 123]. Przegląd podstawowych narzędzi oraz niezbędnych ich ruchów podczas kształtowania powierzchni o postaci walca obrotowego w przypadku honowania ujmuje rys. 3.1 oraz

3.2. Zaznaczono na nich także ślady ziarn (kształtowania) narzędzia.

W przypadku gdy:

$$\begin{aligned} \bar{v}_f &\neq 0, \\ \bar{v} &= 0 \text{ lub } \bar{v} = \bar{v}_{0c} \end{aligned} \quad (3.1)$$

lub

$$\begin{aligned} \bar{v} &\neq 0, \\ \bar{v}_f &= 0 \text{ lub } \bar{v}_f = \bar{v}_{fc}, \end{aligned}$$

gdzie: \bar{v} – prędkość obwodowa (poprzeczna),

\bar{v}_f – prędkość posuwowa (poosiowa, wzdłużna),

\bar{v}_{0c} – wartość dyskretna \bar{v} ,

\bar{v}_{fc} – wartość dyskretna \bar{v}_f ,

wówczas kierunkowość nierówności jest równoległa bądź prostopadła do osi walca. Taki przypadek honowania przyjęto nazywać jednokierunkowym, co pokazano na rys. 3.1 oraz 3.2 w kolumnach 1 i 2.

Z rys. 3.1 oraz 3.2 wynika także, że w przypadku gdy:

$$l_r \geq \pi d \quad (3.2)$$

lub

$$l_h \geq l,$$

gdzie: l_r, l_h – długości narzędzi kształtowych, nazywanych dalej odcinkowymi,
 l, d – wymiary otworu,

wówczas do ukształtowania powierzchni o postaci walca obrotowego niezbędna jest tylko jedna prędkość \bar{v}_f lub \bar{v} . Jest to wymóg wystarczający dla ECM, jednak ze względu na nienakładanie się śladów ziarn ściernych w procesie ECH [50, 55, 100, 115, 129], niezbędny jest jeszcze dodatkowy ruch, którym w tym przypadku może być ruch oscylacyjny z prędkością \bar{v}_{ff} .

Jeżeli:

$$zl_r < \pi d \quad (3.3)$$

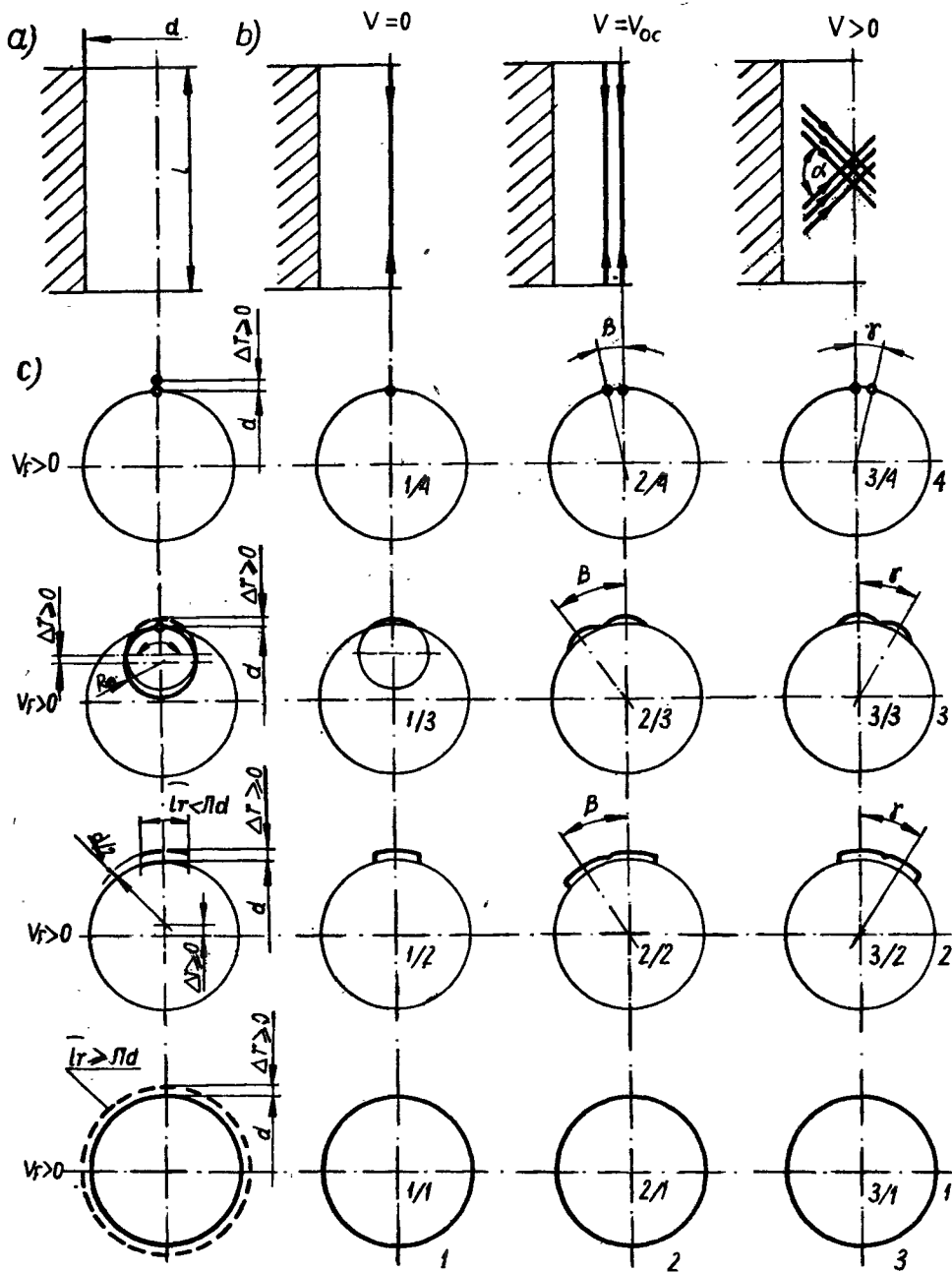
$$zl_h < l,$$

gdzie: z – liczba narzędzi odcinkowych,

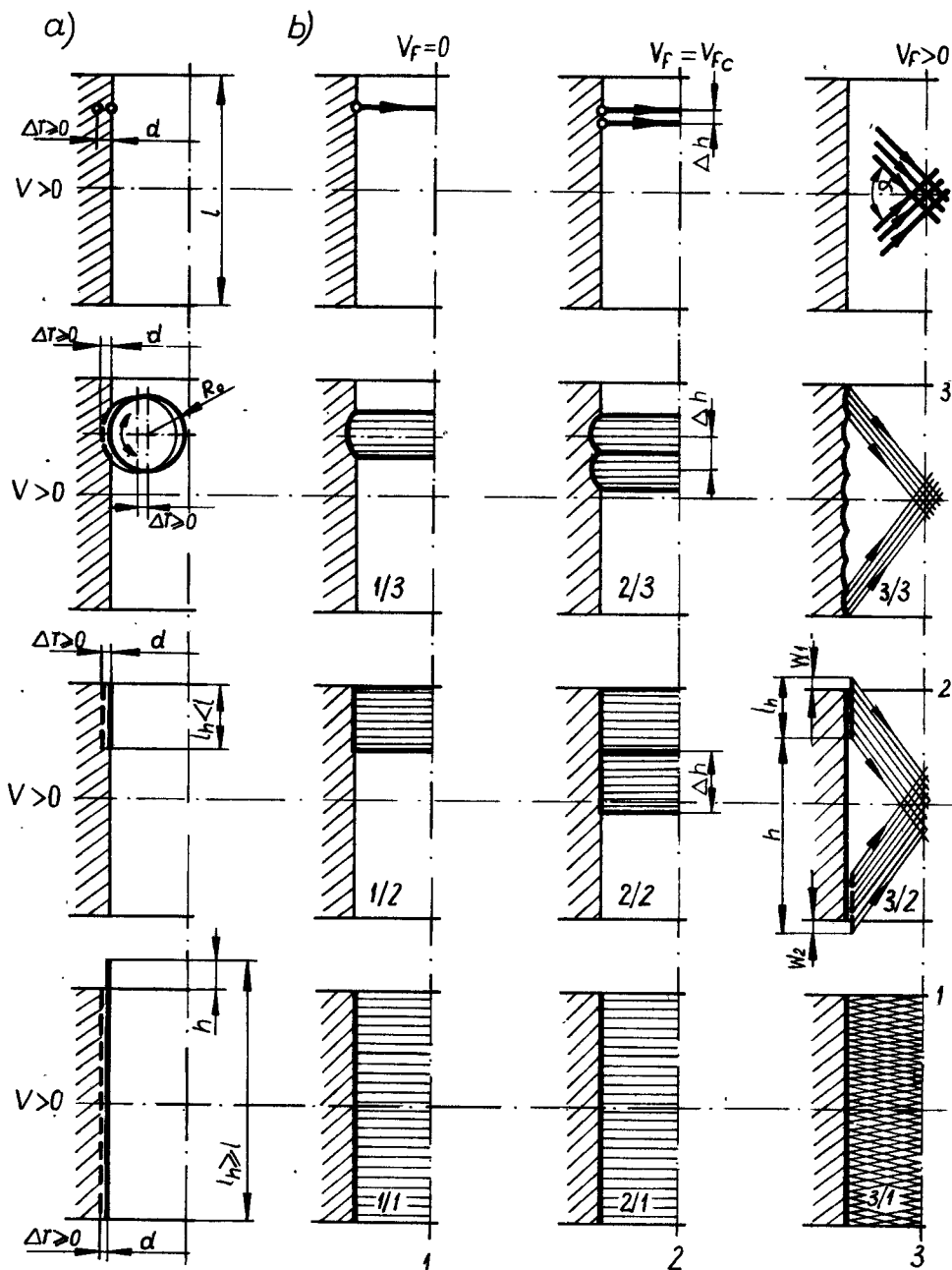
wówczas niezbędne są obie prędkości składowe \bar{v} i \bar{v}_f . Taki przypadek nosi nazwę honowania dwukierunkowego (HD). Rysunek 3.3 przedstawia kilka możliwych trajektorii narzędzia punktowego dla przypadku honowania jedno- i dwukierunkowego.

Przypadki pokazane w wierszach 2 na rys. 3.1 i 3.2 oprócz wykorzystywania podczas kształtowania powierzchni o postaci walca obrotowego mogą być przydatne także do kształtowania innych powierzchni. Wówczas odcinek l_r lub l_h przybierze cechy geometryczne inne, niż łuk lub odcinek prostej.

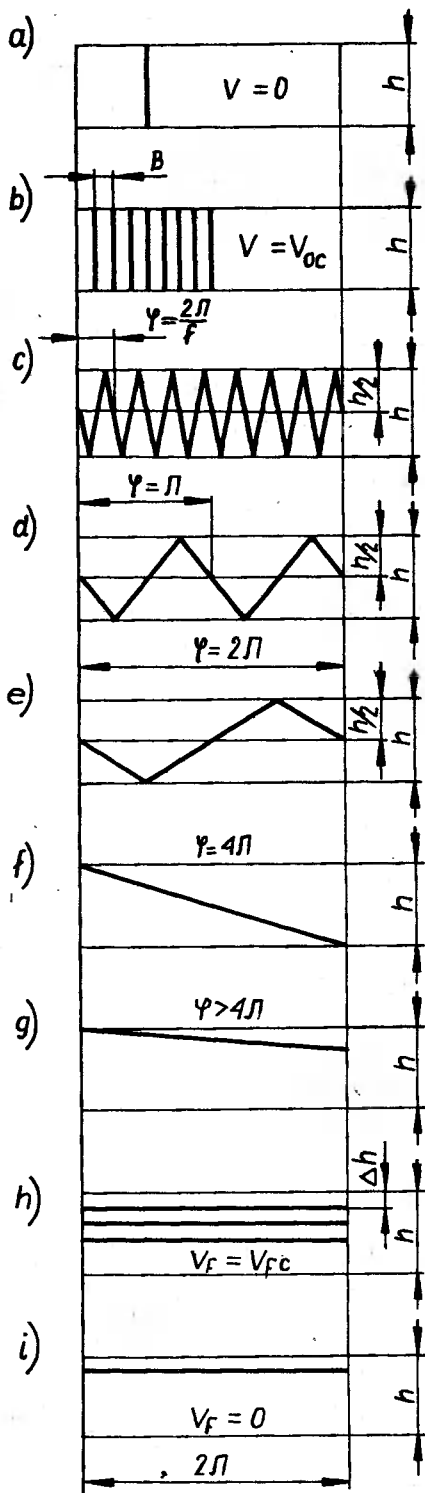
Przeprowadzona analiza sposobów kształtowania powierzchni umożliwia doko-



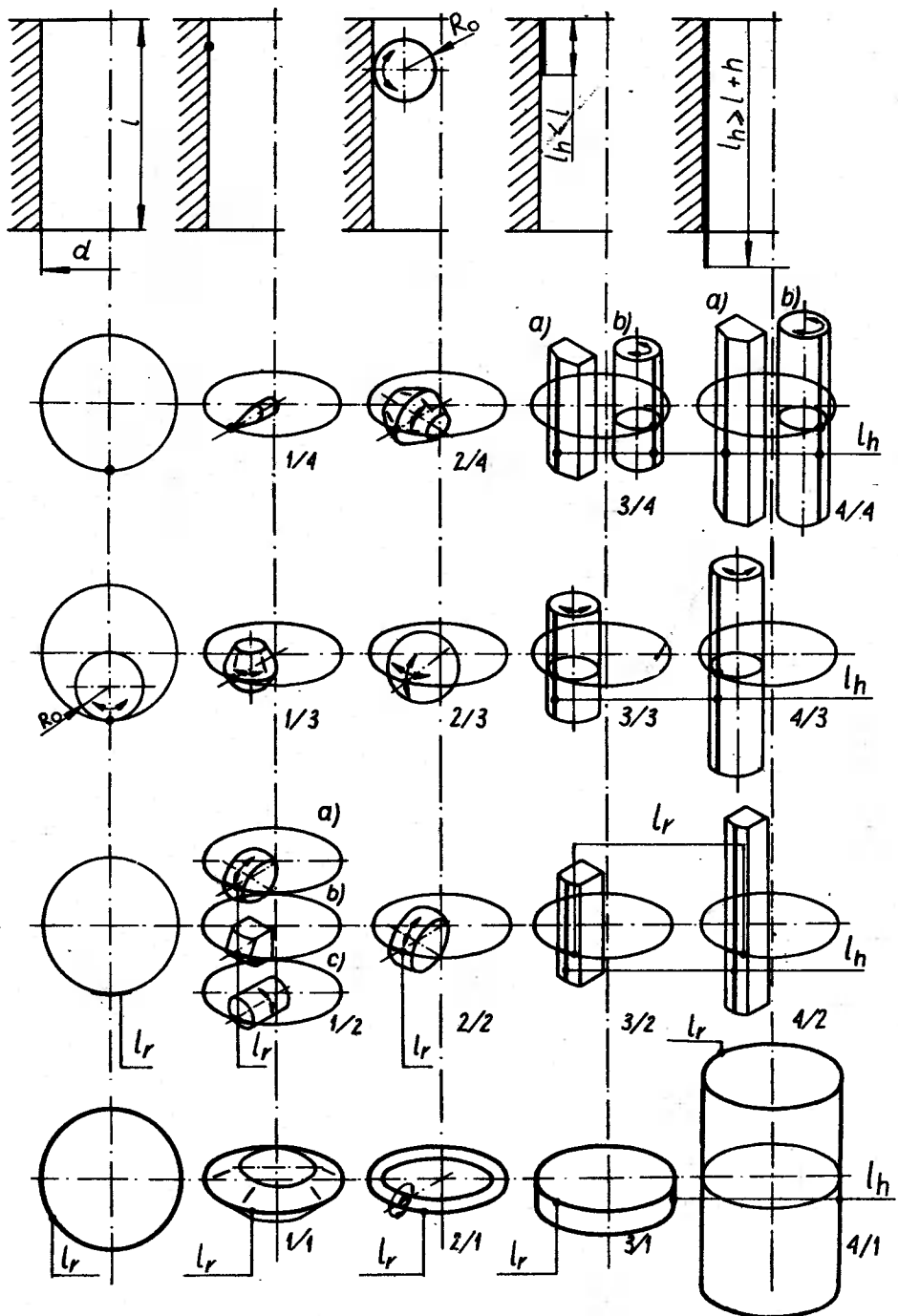
Rys. 3.1. Podstawowe sposoby kształtowania powierzchni o postaci walca obrotowego za pomocą narzędzi punktowych, obwodniowych i kształtowych (odcinkowych): a – kształtowany otwór, b – ślady obróbki, c – narzędzia w przekroju poprzecznym walca



Rys. 3.2. Podstawowe sposoby kształtowania powierzchni o postaci walca obrotowego za pomocą narzędzi punktowych, obwiedzionych i kształtowych (odcinkowych) w przekroju osiowym walca (a) oraz ślady obróbki (b)



Rys. 3.3. Kilka możliwych trajektorii narzędzia punktowego poruszającego się z prędkościami analogowymi \bar{v} i \bar{v}_f lub analogowo-dyskretnymi: (c ÷ g) – dla przypadku $\bar{v} > 0, \bar{v}_f > 0$; (b, h) – dla przypadku gdy jedna z prędkości przyjmuje wartości dyskretne; (a, i) – dla przypadku gdy występuje tylko jedna z prędkości. Na rysunku nie uwzględniono stanów przejściowych



Rys. 3.4. Podstawowe postacie geometryczne narzędzi umożliwiających kształtowanie powierzchni o postaci walca obrotowego za pomocą honowania

nania przeglądu możliwych cech geometrycznych narzędzi do honowania (rys. 3.4). Ujmuje on cechy geometryczne narzędzi dla podstawowych przypadków kształtowania powierzchni, przedstawionych na rys. 3.1 i 3.2, nawet wtedy, gdy ich współczesna możliwość wytwórcza jest utrudniona lub nierealna [41, 58]. Z przeglądu tego wynika, że ze względu na trwałość narzędzia, a szczególnie ściernego, najmniej interesujące jest narzędzie punktowe. Obwiedniowe, pomimo zwielokrotnionej trwałości w stosunku do narzędzi punktowych, wymaga dodatkowych powiązań kinematycznych i staje się bardziej korzystne w stosunku do odcinkowych tylko wtedy, gdy:

$$2\pi R_0 > l_h \quad (3.4)$$

lub

$$2\pi R_0 > l_r,$$

gdzie: R_0 – promień narzędzia obwiedniowego.

Natomiast najbardziej przydatne do ECH, w tym także ze względu na prostotę cech geometrycznych, wydają się być przypadki: 3/4a, 4/4a, 3/2, 4/2, 1/2b, 1/1, 3/1. Kryteria ostatecznego wyboru postaci geometrycznej narzędzia omówiono dalej podczas rozważania zjawisk towarzyszących roztwarzaniu elektrochemicznemu. Przypadek 4/1, aczkolwiek nie wymaga ruchów kształtujących, jest typowy dla ECM i w dalszych rozważaniach nie jest brany pod uwagę.

3.2. HONOWANIE DWUKIERUNKOWE

W przypadku poruszania się ruchem względnym narzędzia punktowego po kształtowanej powierzchni z prędkościami \bar{v} i \bar{v}_f , wyznaczanymi jako:

$$v = \pi dn, \quad (3.5)$$

$$v_f = 2hf, \quad (3.6)$$

gdzie: v – prędkość obwodowa,

v_f – prędkość posuwowa (o skokowych zmianach wartości),

d – średnica otworu obrabianego,

n – prędkość obrotowa,

h – długość skoku (suwu) narzędzia,

f – częstość podwójnych skoków narzędzia,

wypadkowa prędkość narzędzia \bar{v}_e wyniesie:

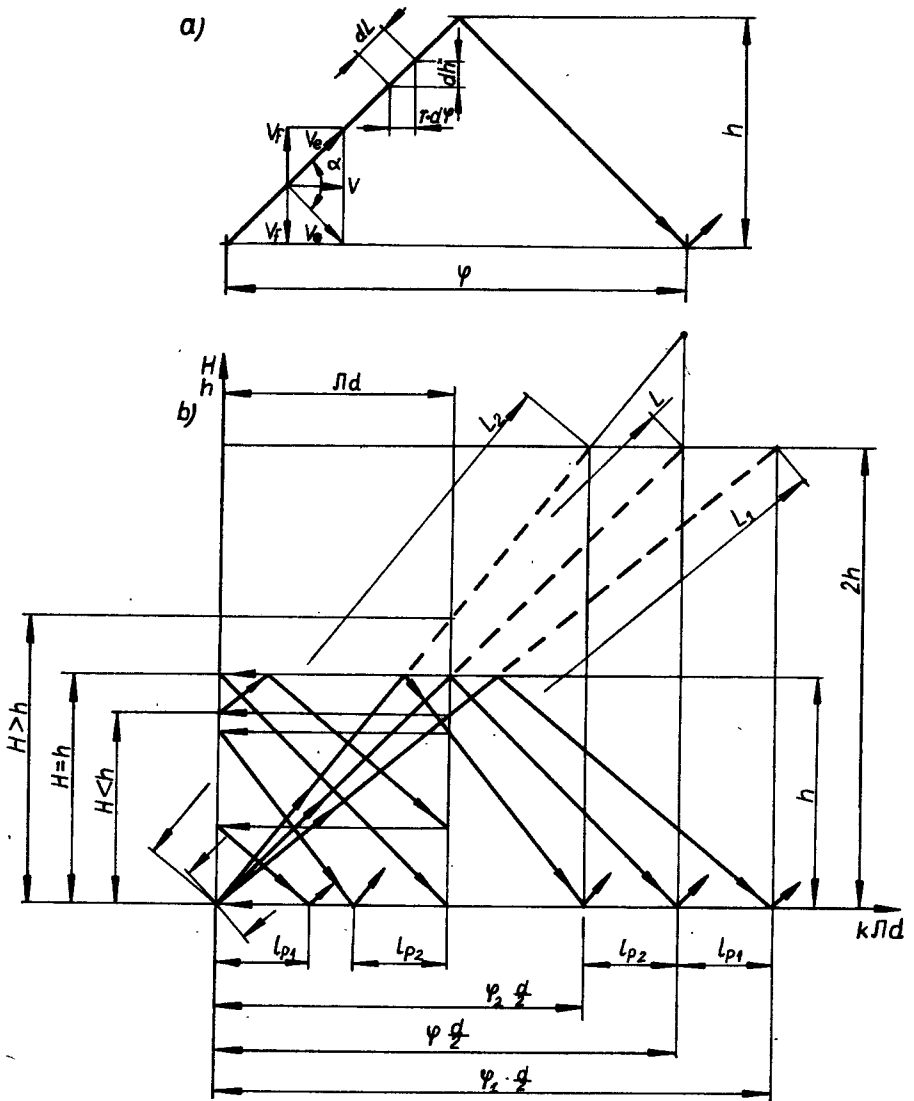
$$v_e = \sqrt{v^2 + v_f^2}. \quad (3.7)$$

W elementarnym czasie dt narzędzie przesunie się po powierzchni kształtowanej o wartości, które można wyznaczyć w sposób następujący (rys. 3.5a) [100]:

$$r \cdot d\varphi = v \cdot dt, \quad (3.8)$$

$$dh^* = v_f \cdot dt, \quad (3.9)$$

$$(dL)^2 = (r \cdot d\varphi)^2 + (dh^*)^2, \quad (3.10)$$



Rys. 3.5. Interpretacja geometryczna: a – trajektorii, b – przesunięcia śladów l_p narzędzia punktowego

gdzie: $r \cdot d\varphi$ – elementarne przesunięcie narzędzia po obwodzie kształtowanego walca

$$\text{ca o promieniu } r = \frac{d}{2},$$

dh^* – elementarne przesunięcie narzędzia wzdłuż tworzącej,

dL – elementarna długość linii śrubowej,

$d\varphi$ – elementarna wartość kąta obrotu narzędzia.

Z przyrównania zależności (3.8) i (3.9) wynika, że:

$$\frac{r \cdot d\varphi}{v} = \frac{dh^*}{v_j}, \quad (3.11)$$

$$dh^* = \frac{v_f r}{v} \cdot d\varphi, \quad (3.12)$$

$$d\varphi = \frac{v}{v_f r} dh^*. \quad (3.13)$$

Zakładając prostoliniowość śladów narzędzia – co równoznaczne jest z tym, że $\frac{v}{v_f} = \text{const}$ – z zależności (3.13), przy uwzględnieniu (3.5) i (3.6), kąt φ po jednym podwójnym skoku narzędzia będzie wynosił:

$$\varphi = 2 \frac{\pi dn}{2hf_r} \int_0^h dh^* = 2\pi \frac{n}{f} \quad (3.14)$$

Podstawiając zależność (3.12) do (3.10) otrzymuje się elementarną długość trajektorii narzędzia:

$$(dL)^2 = (r \cdot d\varphi)^2 + \left(\frac{v_f r}{v} \cdot d\varphi \right)^2, \quad (3.15)$$

a po uporządkowaniu będzie:

$$dL = r \sqrt{1 + \left(\frac{v_f}{v} \right)^2} \cdot d\varphi. \quad (3.16)$$

Z rys. 3.5a wynika, że:

$$\frac{v_f}{v} = \text{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (3.17)$$

Uwzględniając tożsamość:

$$\sqrt{1 + \text{tg}^2 \frac{\alpha}{2}} = \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (3.18)$$

w (3.16), po scałkowaniu w granicach (od 0 do φ) otrzymuje się:

$$L = \frac{d}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} \varphi, \quad (3.19)$$

a po podstawieniu zależności (3.14) będzie:

$$L = \frac{\pi d}{\cos \frac{\alpha}{2}} \frac{n}{f}. \quad (3.20)$$

Wykorzystując zależności geometryczne, przedstawione na rys. 3.5b, uwzględniające przesunięcie śladów narzędzia l_p , wartość L można także wyznaczyć z zależności [7]:

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{d}{L} \pm \frac{l_p}{L},$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{H} 2h,$$

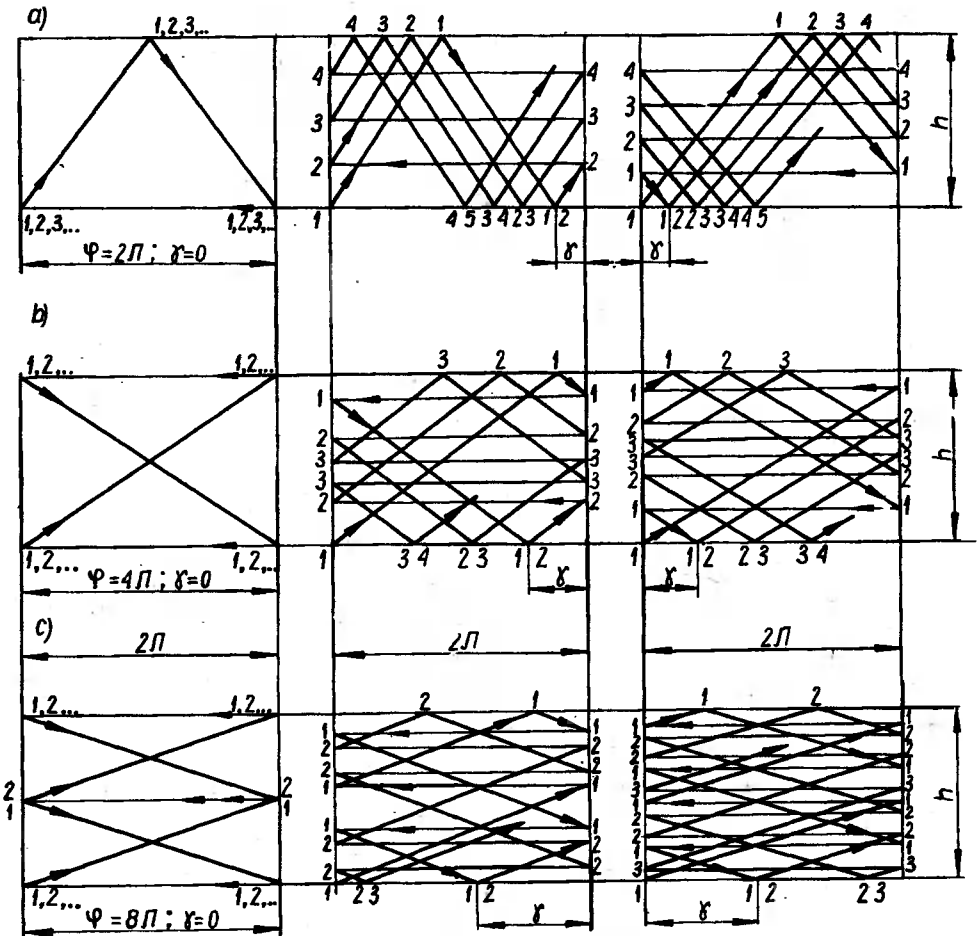
a stąd:

$$L = \frac{2h}{H} \frac{\pi d}{\cos \frac{\alpha}{2}} \pm \frac{l_p}{\cos \frac{\alpha}{2}}, \quad (3.21)$$

gdzie: H – długość skoku linii śrubowej,

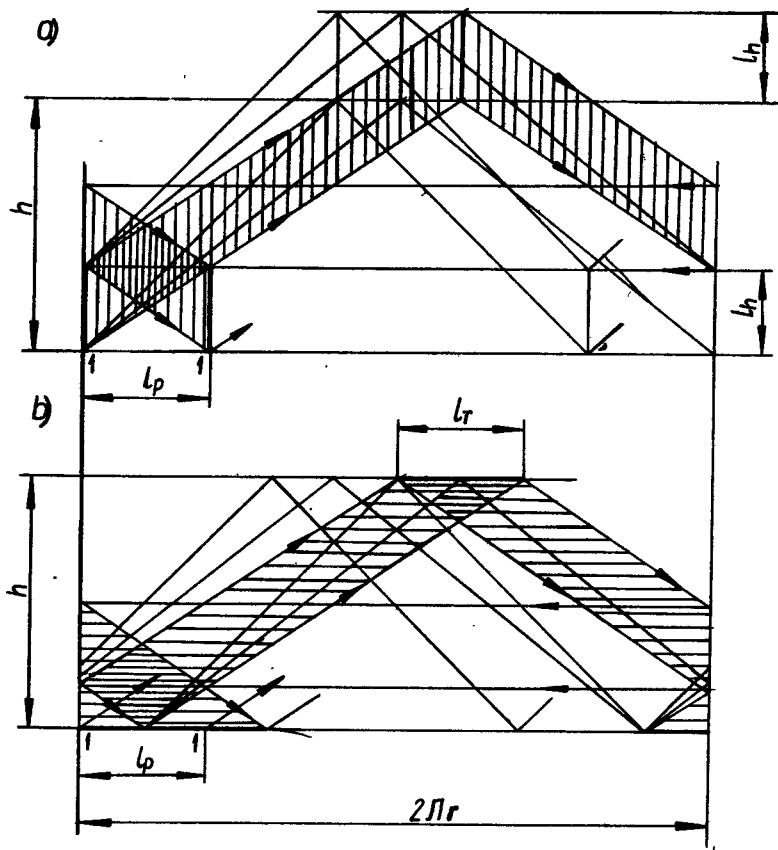
l_p – długość przesunięcia śladów narzędzia.

Rysunek 3.6 przedstawia kilka przykładów trajektorii narzędzia punktowego,



Rys. 3.6. Przykłady trajektorii oraz kątów γ przesunięcia śladów narzędzia punktowego dla przypadków:

a) $\varphi = 2\pi \pm \gamma$, b) $\varphi = 4\pi \pm \gamma$, c) $\varphi = 8\pi \pm \gamma$



Rys. 3.7. Pojęcie przesunięcia l_p śladów narzędzia odcinkowego: a) odcinek l_p równoległy do tworzącej, b) odcinek l_n normalny do tworzącej

a rys. 3.7 narzędzia odcinkowego o odcinku l_p równoległym (rys. 3.7a) lub normalnym l_n (rys. 3.7b) do tworzącej walca. Z rysunków tych, a szczególnie z rys. 3.6 wynika, że jeżeli liczba podwójnych skoków f na jeden obrót narzędzia lub liczba pełnych obrotów k na jeden podwójny skok h narzędzia są stałe, czyli $\varphi = \frac{2\pi}{f} = \text{const}$ lub $\varphi = k2\pi = \text{const}$,

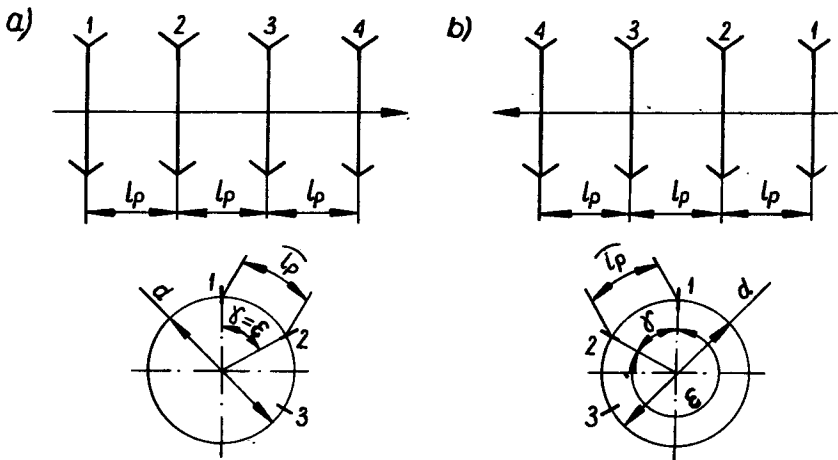
wówczas narzędzie będzie poruszało się po tych samych trajektoriach i nie utworzy pomieszczenia kinematycznego, zapewniającego realizację procesu. Należy dążyć do tego, aby narzędzie poruszało się po takiej trajektorii, która zapewni, że narzędzie natrafi na poprzednie ślady jedynie po dużej liczbie skoków.

Wartość przesunięcia śladów obróbki l_p można ustalić z zależności:

$$l_p = \frac{d}{2}\gamma, \quad (3.22)$$

gdzie: γ – kąt środkowy przesunięcia śladów obróbki, odpowiadający łukowi długości l_p .

Jak wynika z rys. 3.8, wystąpić mogą dwa szczególne przypadki [50]:



Rys. 3.8. Interpretacja geometryczna kąta ε przesunięcia śladów narzędzia odcinkowego l_p : a) $\gamma = \varepsilon$, b) $\gamma = 2\pi - \varepsilon$

$$\gamma = \varepsilon \text{ dla } 0 < \varepsilon < \pi, \quad (3.23)$$

$$\gamma = 2\pi - \varepsilon \text{ dla } \pi < \varepsilon < 2\pi. \quad (3.24)$$

Wartość kąta ε można wyrazić wzorem:

$$\varepsilon = \varphi - k2\pi, \quad (3.25)$$

gdzie: k – liczba pełnych obrotów narzędzia na jeden podwójny skok.

Po podstawieniu zależności (3.14) do wzoru (3.25) ostatecznie otrzymuje się:

$$\varepsilon = 2\pi \left(\frac{n}{f} - k \right). \quad (3.26)$$

Wykorzystując zależność (3.22) można obliczyć wartość przesunięcia l_p dla przypadków oznaczonych wzorami (3.23) i (3.24). Wartości tych przesunięć będą:

$$l_p = \pi d \left(\frac{n}{f} - k \right) \text{ dla } 0 < \varepsilon < \pi, \quad (3.27)$$

$$l_p = \pi d \left(1 + k - \frac{n}{f} \right) \text{ dla } \pi < \varepsilon < 2\pi. \quad (3.28)$$

Bardzo często uznaje się [61], że wartość przesunięcia l_p powinna wynosić:

$$l_p = e_d \pi d \quad (3.29)$$

lub

$$l_p \leq \left(\frac{\pi d}{z} - l_r \right), \quad (3.30)$$

gdzie: e_d – liczba ($0 < e_d < 1$) oznaczająca o jaką część obwodu zostaną przesunięte ślady narzędzia,

l_r – szerokość pilnika ściernego,
 z – liczba pilników.

Niekiedy, zamiast przesunięcia l_p , używa się dla wyrażenia tych samych związków, także długości skoku linii śrubowej H (rys. 3.5b). Wówczas:

$$h = (k + e_d)H = (k + e_d)\pi d \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

gdzie: k – liczba naturalna.

Wartość przesunięcia l_p , w przypadku narzędzi ($l_h < h$), można ustalić za pomocą rys. 3.9, na którym widoczne jest, że w zależności od parametrów kinematycznych ślady i liczba n_t oddziaływań narzędzia są różne. Wynika z tego zatem, że dla wykonania prawidłowej obróbki wszystkie fragmenty obrabianej powierzchni muszą podlegać tej samej liczbie n_t oddziaływań narzędzia.

Z rys. 3.9a wynika, że jeżeli $l_p > \frac{l_h}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$, to na obrabianej powierzchni znajdzie się

szereg miejsc, na które narzędzie nie będzie oddziaływało, w innych zaś będzie oddziaływało tylko jeden lub dwa razy. W tym przypadku, w okresie jednego cyklu obróbkowego, określonego jako:

$$0 \leq (\pi d - \sum l_p) < l_p, \quad (3.31)$$

liczba oddziaływań n_t narzędzia na długości $l_c = h - l_h$ będzie: $n_t = 0, 1, 2$. Analizując w ten sposób przypadek z rys. 3.9b można zauważyć, że dla $l_p = \frac{l_h}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$ na całej obrabianej

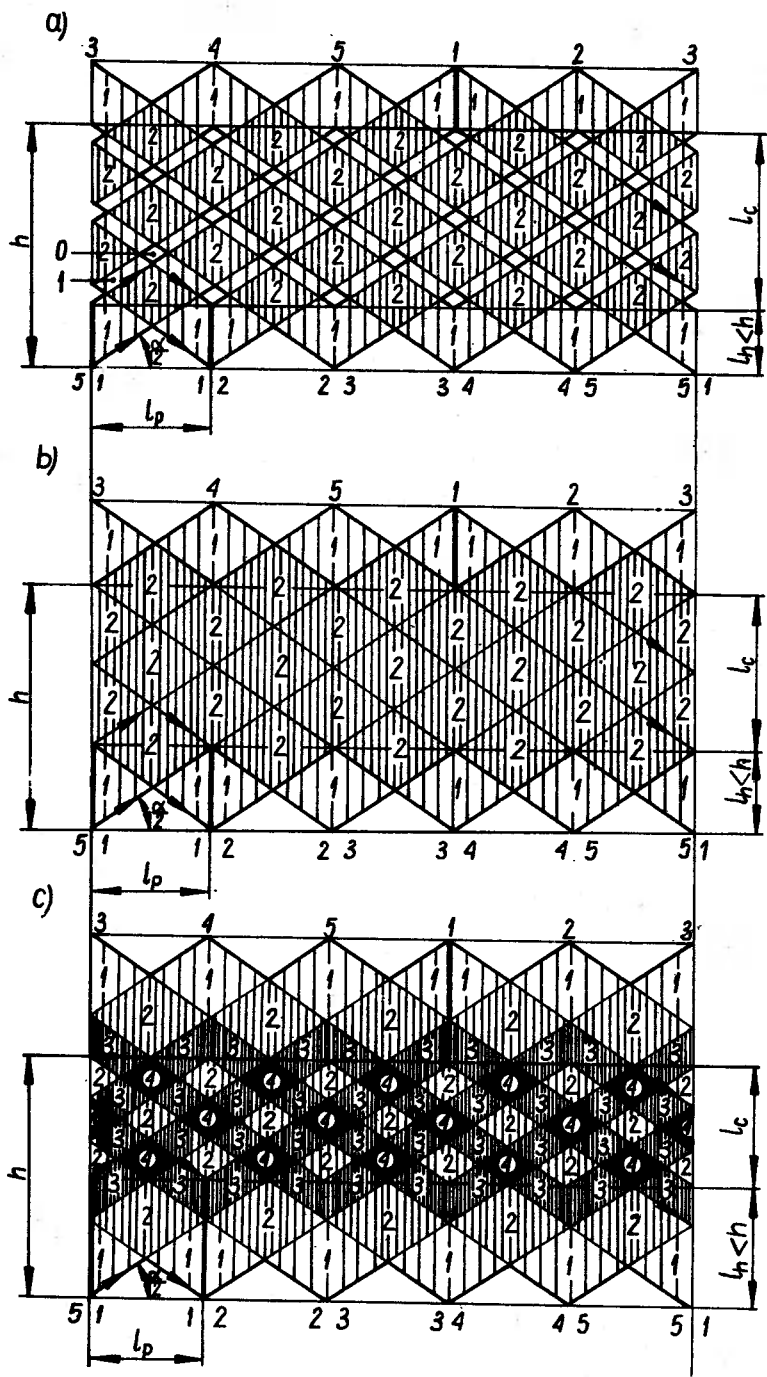
powierzchni o długości $h - l_h$, $n_t = 2$. Na rys. 3.9c wykazano, że jeżeli $\frac{l_h}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} < l_p < \frac{l_h}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$,

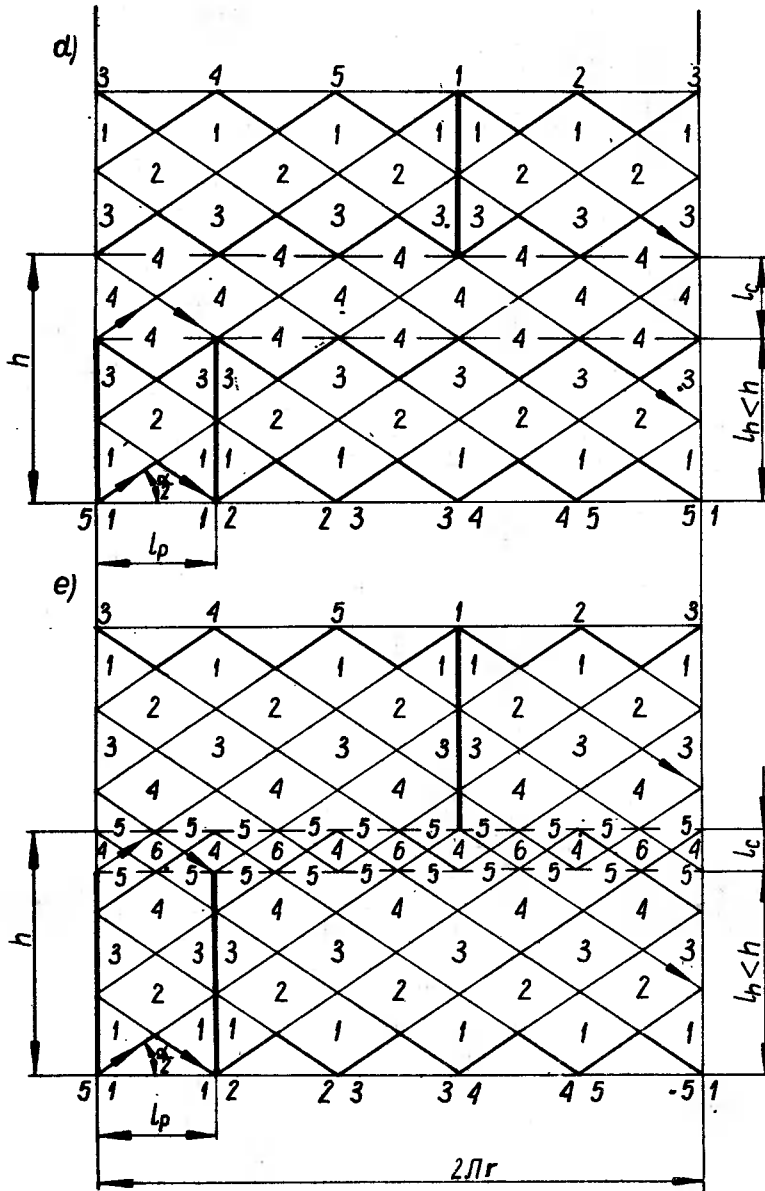
wówczas $n_t = 2, 3, 4$. Z przykładów na rys. 3.9d ÷ e wynika: dla $l_p = \frac{l_h}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$, $n_t = 4$; dla

$\frac{l_h}{3 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} < l_p < \frac{l_h}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$, $n_t = 4, 5, 6$. Ciąg tych zestawień prowadzi do ustalenia prawidłowości:

$$l_p > \frac{l_h}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \dots n_t = 0, 1, 2,$$

$$l_p = \frac{l_h}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \dots n_t = 2,$$





Rys. 3.9. Zróznicowanie liczb n , oddziaływań narzędzia odcinkowego l_c ($l_c < h$) dla przypadku: $h = \text{const}$, $\alpha = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$, $\gamma = \text{const}$, $l_p = \text{const}$

$$\frac{l_h}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} < l_p < \frac{l_h}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \dots n_t = 2, 3, 4,$$

$$l_p = \frac{l_h}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \dots n_t = 4,$$

$$\frac{l_h}{3 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} < l_p < \frac{l_h}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \dots n_t = 4, 5, 6,$$

$$l_p = \frac{l_h}{3 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \dots n_t = 6,$$

$$l_p = \frac{l_h}{m \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \dots n_t = 2m, \quad (3.32)$$

$$\frac{l_h}{(m+1) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} < l_p < \frac{l_h}{m \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \dots n_t = 2m, 2m+1, 2(m+1), \quad (3.33)$$

gdzie: m – liczba naturalna.

Znając prędkość obwodową v i posuwową v_f , wartość $\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ można ustalić z zależności (3.17):

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{2hf}{\pi dn}. \quad (3.34)$$

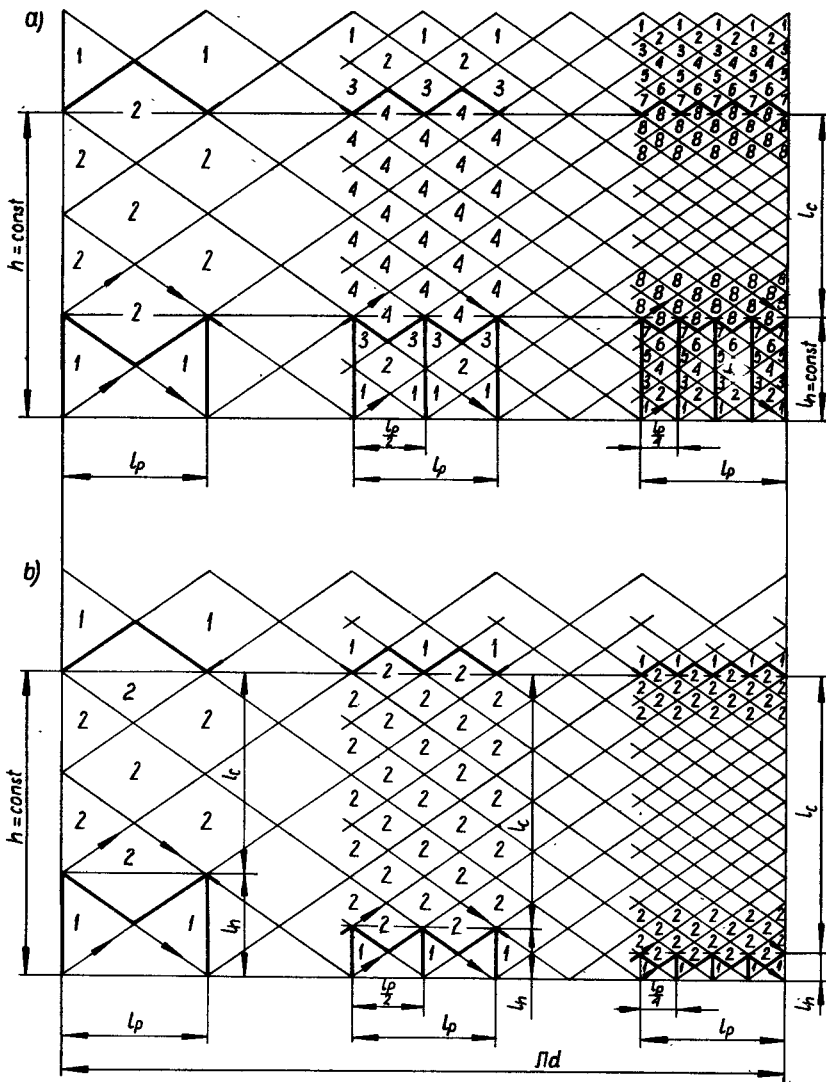
Wówczas l_p , wyrażone zależnością (3.32), przyjmuje postać:

$$l_p = \frac{\pi d l_h n}{2mhf}. \quad (3.35)$$

Wzór (3.35) obowiązuje wtedy, gdy w dwóch kolejnych podwójnych skokach narzędzia ślady nakładają się. Ma to miejsce w przypadku, gdy

$$2\pi \frac{n}{f} > \pi \text{ lub } \frac{n}{f} > \frac{1}{2}.$$

Rozpatrując przypadek pokazany na rys. 3.9, łatwo zauważyć, że otrzymane pola oddziaływań można uzyskać za pomocą jednego narzędzia odcinkowego l_h , wykonującego k_1 podwójnych skoków, lub za pomocą z odcinków l_h , rozmieszczonych na obwodzie o równomiernej podziałce $t_0 = \frac{\pi d}{z} = l_p$, podczas wykonania przez na-



Rys. 3.10. Wpływ liczby z oraz l_h na liczbę n_i oddziaływań narzędzia ($\alpha = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$, $\gamma = \text{const}$, $h = \text{const}$, $l_h < h$): a – zmiana liczby narzędzi z, b – zmiana z i l_h

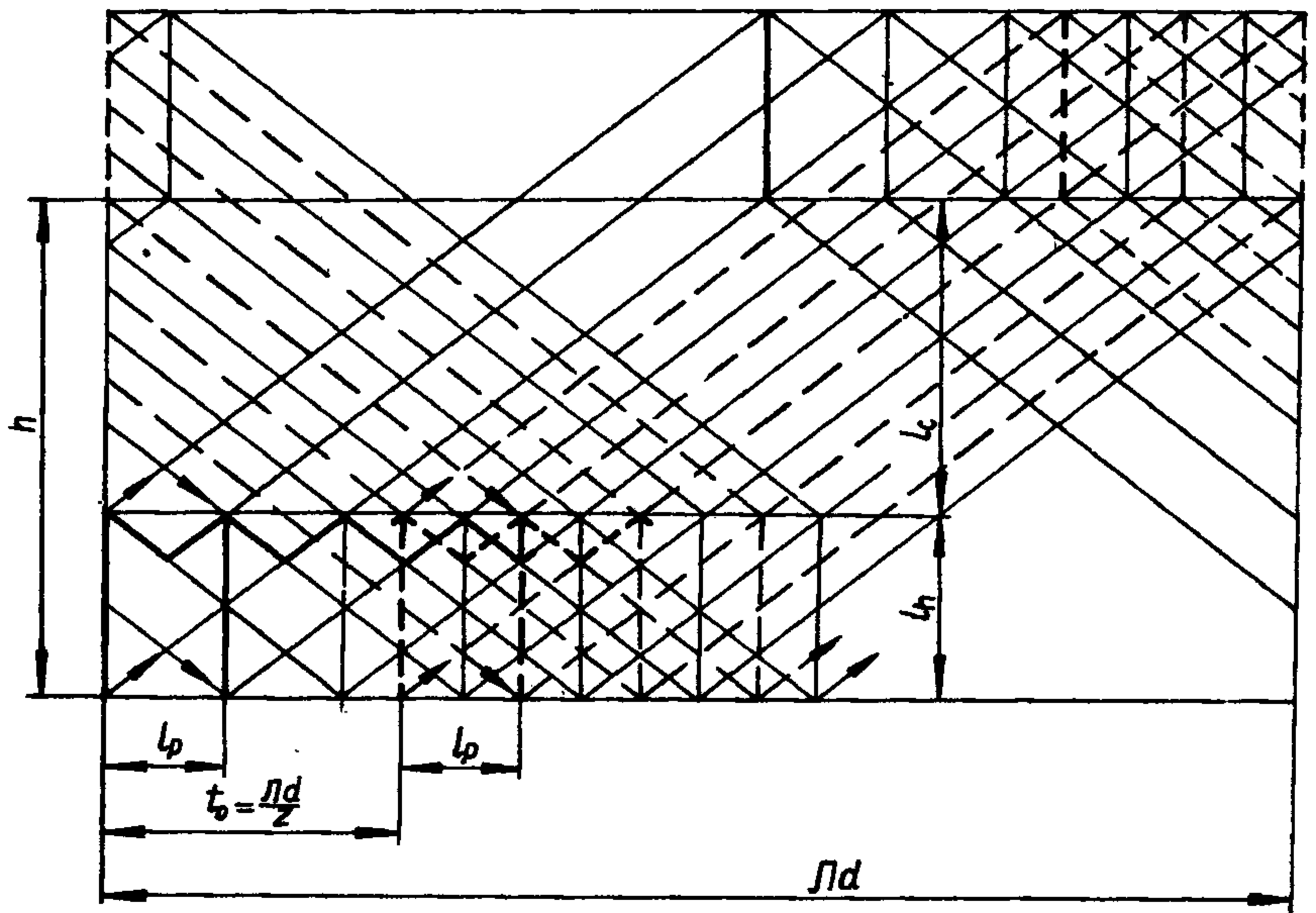
rzędzie jednego podwójnego skoku, odpowiadającego kątowi obrotu φ . Można to wyrazić zależnością:

$$\varphi k_1 = \varphi z \quad (3.36)$$

lub

$$k_1 = z,$$

gdzie: k_1 – liczba podwójnych skoków pojedynczego narzędzia odcinkowego l_h .



Rys. 3.11. Interpretacja geometryczna podziałki $t_0 > l_p$

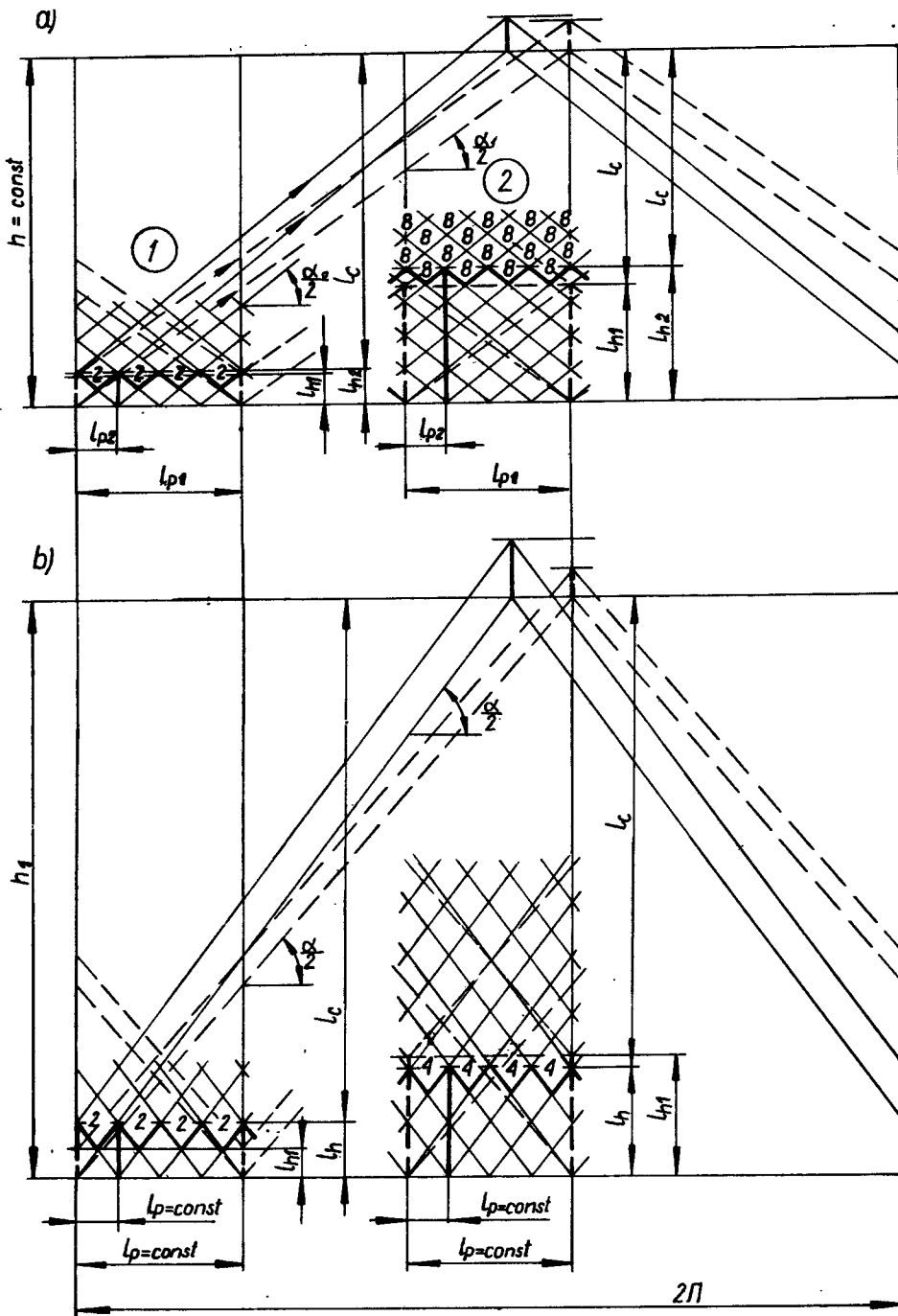
W omawianym przykładzie (rys. 3.9) poszczególne wartości wynoszą: $\varphi = 2\pi \frac{n}{f} = 2\pi \frac{1,2}{1}$, $\varepsilon = 2\pi \left(\frac{n}{f} - k \right) = \frac{2\pi}{5} = \gamma$, gdyż $k = 1$. Dla $k_1 = 5$, oznacza to, że $\varepsilon = \gamma = 0$ — co wynika z zależności (3.25).

Wówczas, gdy $t_0 \neq l_p$ wystąpić mogą dwa przypadki:

$$\begin{aligned} t_0 &< l_p \\ t_0 &> l_p \end{aligned}$$

Przypadek $t_0 < l_p$ pokazano na rys. 3.10. Odpowiada on zwiększeniu liczby z narzędzi odcinkowych l_h w stosunku do przypadku omawianego wyżej. Prowadzi to w konsekwencji do zwiększenia liczby n , oddziaływań narzędzia na długości $l_c = h - l_h$.

Wynika ona w tym przypadku z krotności $\frac{l_p}{m}$. Z przedstawionych wywodów wynika, że chcąc na długości $l_c = h - l_h$ uzyskać zwiększoną liczbę oddziaływań narzędzia, można zamiast zwiększenia liczby k_1 , zwiększyć liczbę z narzędzi odcinkowych l_h . Dla zachowania stałej liczby oddziaływań narzędzia, wynikającej z liczby k_1 , można, po zwiększeniu liczby narzędzi z (odpowiadać temu może zwiększenie szerokości narzędzia) zmniejszyć ich długość o krotność $\frac{l_p}{m}$, znacznie powiększając tym samym długość l_c , na której wystąpi stała liczba oddziaływań narzędzia. W skrajnym przypadku prowadzi to do narzędzi 3/1 lub nawet 1/1 pokazanych na rys. 3.4. Przypadek, w którym $t_0 > l_p$ przedstawiono na rys. 3.11. Może on być rozpatrywany jako narzędzie o liczbie z elementarnych narzędzi jednoodcinkowych, w którym każde z nich, po spełnieniu



Rys. 3.12. Wpływ l_p , h oraz l_h (dla $l_h < h$) na liczbę n_i oddziaływań narzędzia: a) $h = \text{const}$, b) $l_p = \text{const}$

zależności (3.31), tworzy swoją siatkę oddziaływań, przesuniętą względem poprzedniej o wartość t_0 .

W rozpatrywanych do tej pory przypadkach wartość przesunięcia l_p oraz skok h są stałe. Rozpatrywano natomiast wpływ l_h dla przypadku $l_h < h$, na liczbę n_t oddziaływań narzędzia.

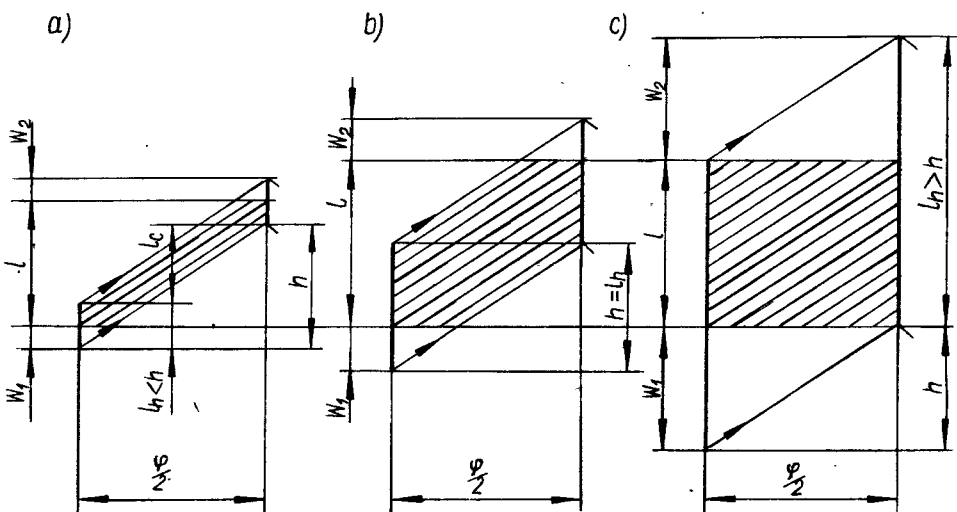
Należy zauważyć, że dla przypadku: $h = \text{const}$, $l_h = \text{const}$, można, zmieniając wartość l_p , uzyskać różne liczby oddziaływań narzędzia, jak to pokazano na rys. 3.12a.

Z rysunku tego wynika, że jeżeli $l_p > \frac{l_h}{\alpha \cdot \frac{\alpha}{2}}$ (co daje liczbę oddziaływań narzędzia

$n_t = 0, 1, 2$ – przypadek 1), można przez zmniejszenie wartości l_p uzyskać liczbę oddziaływań $n_t = 2$. W przypadku 2, gdy wartość $n_t = 2$, można, przez zmianę wartości l_p , liczbę tę powiększyć w przybliżeniu o krotność m , wynikającą z poprzedniej i zmienionej wartości l_p . Zmiana wartości l_p jest wynikiem zmiany kąta φ , zdefiniowanego zależnością (3.14). Zmiana kąta φ wymaga zmiany stosunku $\frac{n}{f}$, a ta zmienia kąt

$\frac{\alpha}{2}$ wyrażony zależnością (3.17). Stąd wynika, że każdorazowa zmiana kąta φ , powodująca zmianę l_p , wnosi także zmianę kąta α (jeżeli: $h = \text{const}$, $d = \text{const}$), a ta dla zachowania określonej liczby m wymaga także zmiany wartości l_h . Zależności te stają się jeszcze bardziej widoczne, jeżeli zmianom tym towarzyszy także zmiana skoku h (rys. 3.12b). Z powyższych rozważań wynika, że na liczbę oddziaływań narzędzia n_t wywierają wpływ: $\frac{n}{f}$, l_h oraz h .

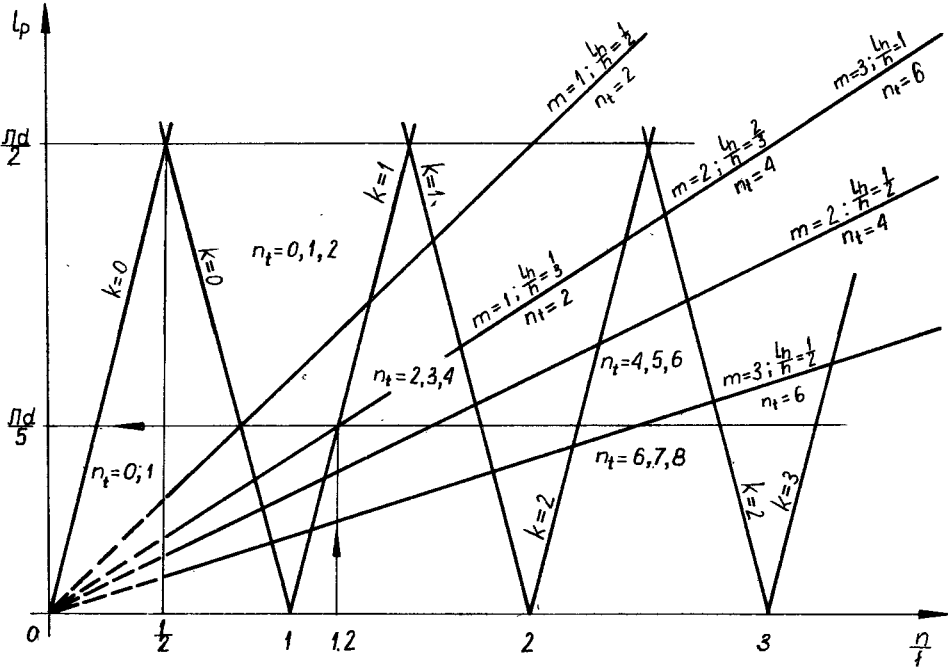
Rozpatrując przypadek, w którym są znane: d oraz l_h , natomiast h jest wyliczane ze wzoru (rys. 3.13):



Rys. 3.13. Pojęcie długości l obrabianego otworu, dobiegu w_1 i wybiegu w_2 narzędzia oraz długości drogi elementu narzędzia w obrabianym otworze: a) $l_h < h$, b) $l_h = h$, c) $l_h > h$

$$h = l + w_1 + w_2 - l_m \quad (3.37)$$

gdzie: w_1, w_2 – długości dobiegu i wybiegu narzędzia, wówczas, korzystając z zależności (3.27), (3.28) i (3.35), można przedstawić graficznie przebieg l_p w funkcji $\frac{n}{f}$ (rys. 3.14) dla określonych stosunków $\frac{l_h}{h}$ z uwzględnieniem liczby



Rys. 3.14. Przesunięcie l_p w funkcji $\frac{n}{f}$ z uwzględnieniem liczby m oraz stosunku $\frac{l_h}{h}$

m. Na wykresie tym linią cieniłą zaznaczono przypadek pokazany na rys. 3.9. Ogólniejsze zależności wyprowadzono niżej.

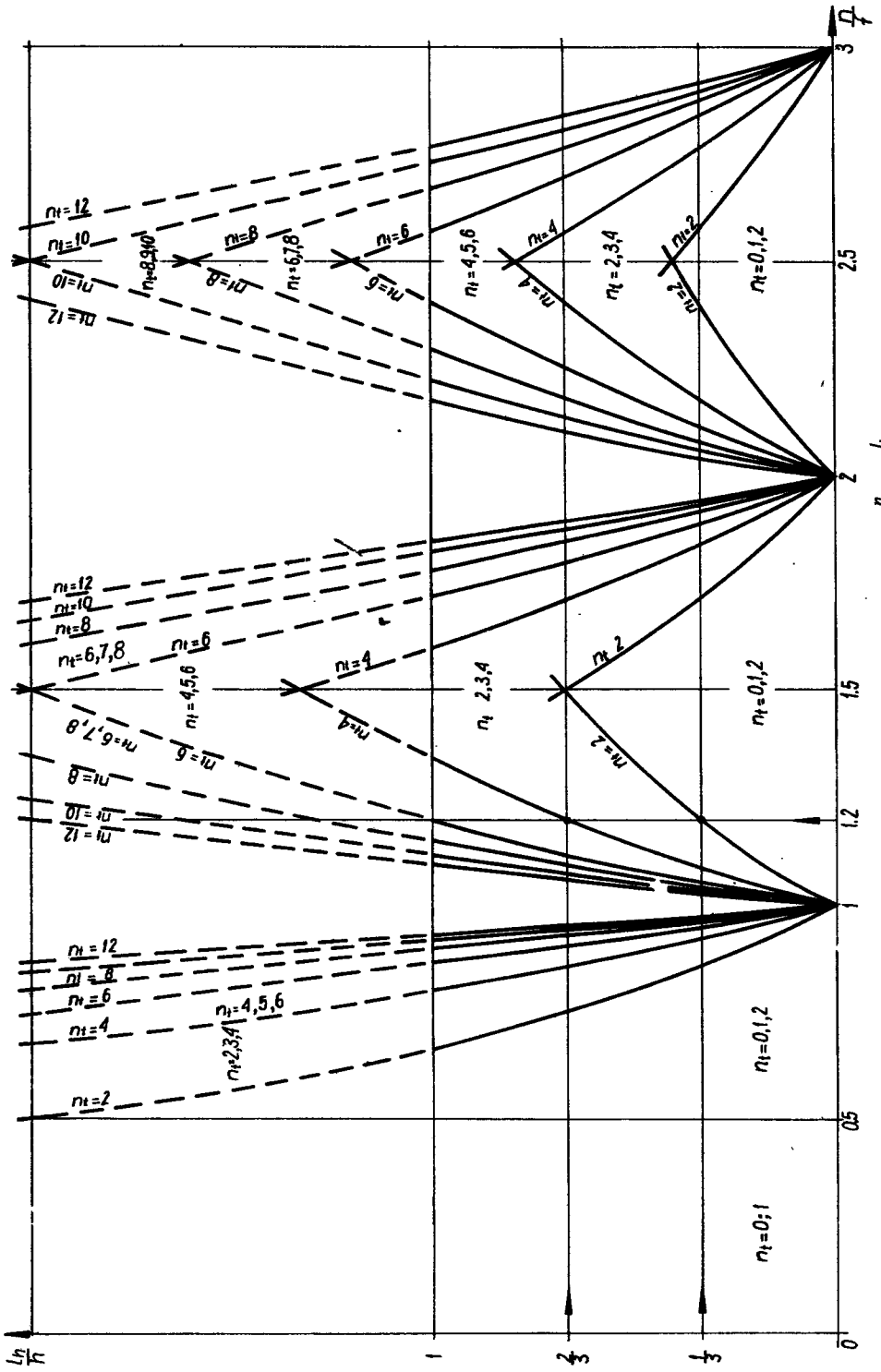
Zapewnienie możliwie równej liczby n_i oddziaływań narzędzia na całej długości l obrabianej powierzchni spełnia warunek postulujący, aby na każdy punkt walcowej powierzchni o długości $l_c = (h - l_h)$ narzędzie działało $n_i = 2m$ razy. Będzie to spełnione, po uwzględnieniu zależności (3.27), (3.28), (3.32) i (3.34), jeżeli:

$$\frac{l_h}{m \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \pi d \left(\frac{n}{f} - k \right) \quad (3.38)$$

$$\frac{l_h}{m \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \pi d \left(1 + k - \frac{n}{f} \right) \quad (3.39)$$

Po przekształceniach dla przypadku $0 < \varepsilon < \pi$ otrzymuje się:





Rys. 3.15. Liczba n , oddziaływan narzędzia w funkcji j oraz $\frac{h}{n}$

$$\frac{l_h}{h} = 2m \left(1 - \frac{k}{\frac{n}{f}} \right); \text{ dla: } k < \frac{n}{f} < \frac{2k+1}{2}, l_h \leq h; \quad (3.40)$$

a dla przypadku $\pi < \varepsilon < 2\pi$ będzie:

$$\frac{l_h}{h} = 2m \left(\frac{k+1}{\frac{n}{f}} - 1 \right); \text{ dla: } \frac{2k+1}{2} < \frac{n}{f} < (k+1), l_h \leq h. \quad (3.41)$$

Należy zaznaczyć, że konieczne jest, aby:

$$\frac{n}{f} \neq 0, 1, 2, 3, \dots, k, k+1, \dots$$

Nie spełnienie tego warunku powoduje, że narzędzie poruszać się będzie zawsze po tej samej trajektorii, wobec czego pewna określona część powierzchni obrabianej może pozostać nieobrobiona. Graficzne przedstawienie stosunku $\frac{l_h}{h}$ w funkcji $\frac{n}{f}$ uwidoczniło na rys. 3.15. Najwyższe punkty krzywych, odpowiadające tym samym wartościom n , są przynależne hiperbolom:

$$\frac{l_h}{h} = \frac{2m}{2k+1}. \quad (3.42)$$

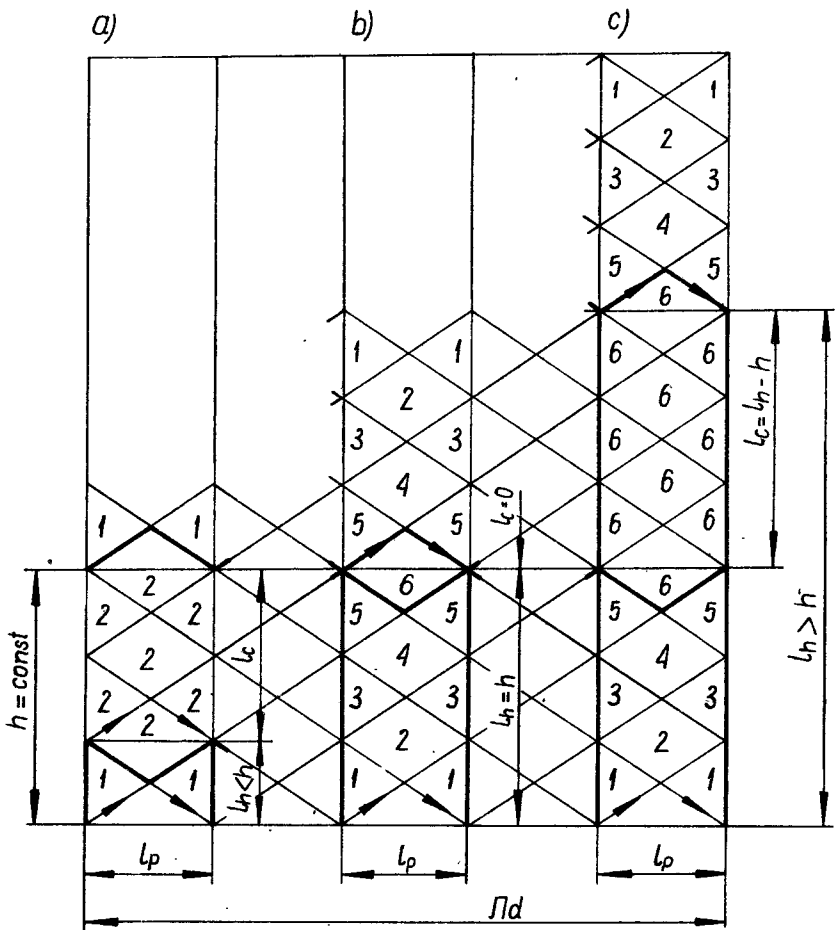
Linia cienką zaznaczono przypadek pokazany na rys. 3.9b i d, odpowiadający $\frac{n}{f} = 1, 2$ oraz: $\frac{l_h}{h} = \frac{1}{3}, \frac{l_h}{h} = \frac{2}{3}$.

Przeprowadzone do tej pory rozważania liczby n , oddziaływań narzędzia dotyczą przypadku $l_h < h$. Długość l_h w stosunku do h może przyjmować wartości (rys. 3.13; 3.16):

$$\begin{aligned} l_h &< h, \\ l_h &= h, \\ l_h &> h. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Z analizy przypadku $l_h < h$ wynika, że im l_h jest mniejsze w stosunku do h (przy dobraniu właściwego stosunku $\frac{n}{f}$), tym znacznie można powiększać długość l_c , odpowiadającą równej liczbie n , oddziaływań narzędzia.

Analiza przypadku $l_h = h$ (rys. 3.16b) wykazuje, że kształtowana powierzchnia, na skutek różnej liczby oddziaływań narzędzia odcinkowego l_h : ściernego, elektrochemicznego lub obu łącznie, w sposób naturalny będzie zniekształcana ($l_c = 0$), jeśli założoną postacią geometryczną jest walec. Przypadek ten może być jednak wykorzystywany, jeżeli kształtowana powierzchnia ma osiągnąć postać geometryczną inną od walcowej, np. baryłkową (siodłową).



Rys. 3.16. Zróżnicowanie liczby n_i oddziaływań narzędzia odcinkowego l_h w zależności od stosunku $\frac{l_h}{h}$ ($\alpha = \text{const}$, $\varphi = \text{const}$, $\gamma = \text{const}$, $h = \text{const}$, $l_p = \text{const}$): a) $l_h < h$, b) $l_h = h$, c) $l_h > h$

W przypadku, gdy $l_h > h$ (rys. 3.16c) wówczas znaczna część kształtowanej powierzchni jest również objęta jednakową liczbą oddziaływań narzędzia. Wynika ona z obranego stosunku $\frac{n}{f}$ liczby narzędzi z oraz liczby cykli obróbkowych, zdefiniowanych zależnością (3.31) i nie spełnia w całości zależności (3.40) i (3.41) przedstawionych na rys. 3.15. Stąd też dla $\frac{l_h}{h} > 1$ przebieg $\frac{l_h}{h}$ w funkcji $\frac{n}{f}$ dla określonych wartości n zaznaczono na rys. 3.15 linią przerywaną. Na podstawie powyższego można uznać, że jeżeli:

$$l_h - h = l, \quad (3.44)$$

wówczas cała powierzchnia obrabiana o długości l jest objęta jednakową liczbą oddziaływań narzędzia. Stwierdzenie to jest istotne i będzie wykorzystywane w przy

padku obróbki elektrochemicznej otworów o małej długości l . Narzędzie ściernie w tym przypadku będzie ulegało nierównomiernemu zużyciu (rys. 3.13c), uzależnionemu od wartości dobiegu w_1 i wybiegu w_2 .

Długość minimalnego dobiegu w_1 i wybiegu w_2 dla narzędzi $l_h < h$ wynika z rys. 3.7, 3.9, 3.10 i innych, i może być wyrażona zależnością:

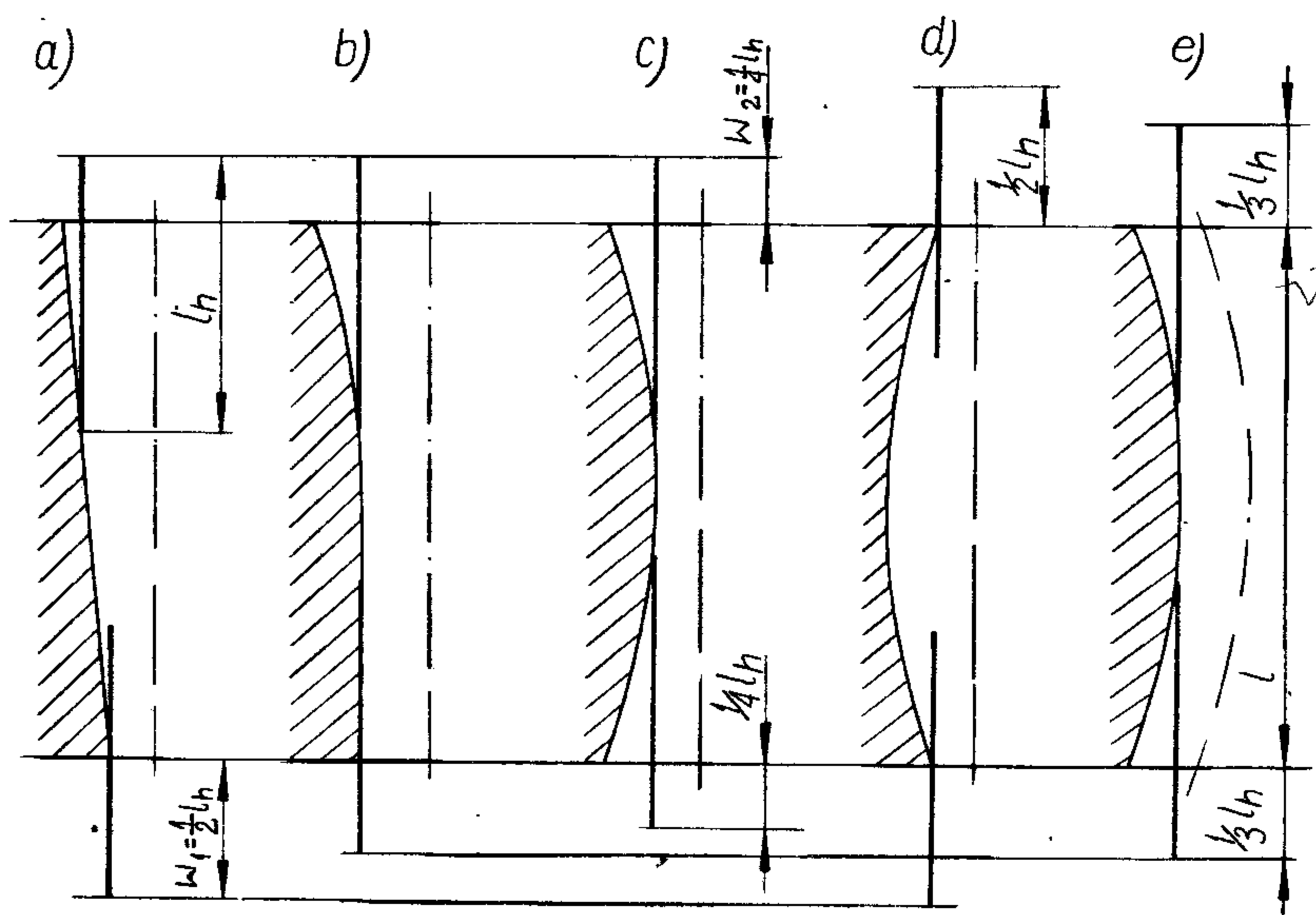
$$(w_1 = w_2) \geq \frac{l_h}{2m} \quad (3.45)$$

Nie ujmuje ona stosowanych w procesie HS zmian wartości w_1 i w_2 w celu usunięcia odchyłek makrogeometrii (rys. 3.17). Mogą one powstawać także w czasie obróbki na skutek zróżnicowanej liczby n_t oddziaływań narzędzia.

Ponieważ wybiegi w_1 i w_2 stanowią pewną część długości narzędzia l_h , można je przedstawić ogólnie jako:

$$\begin{aligned} w_1 &= k_1 l_h \\ w_2 &= k_2 l_h \end{aligned} \quad (3.46)$$

gdzie: k_1, k_2 – współczynniki zależne od wybiegu i dobiegu. Powinny one posiadać wartości: $0 \leq k_1 \leq 1; 0 \leq k_2 \leq 1$.



Rys. 3.17. Zalecane wybiegi w_1 i w_2 narzędzi ściernych l_h w zależności od odchyłek walcowości: a – stożkowość, b – kielichowość, c – siodłowość, d – baryłkowość, e – nieprostoliniowość [129]

Dla $l_h < h$ spełnienie warunku $k_1 = k_2 = 1$ pozwala uzyskać równą liczbę n_t oddziaływań narzędzia na całej długości l obrabianej powierzchni, jednak wnosi problemy konstrukcyjne w rozwiązaniu narzędzia. Wartości współczynników $k_1 = k_2 = 0$ pozwalają uzyskać równą liczbę n_t w przypadku, w którym $l_h = 0$, co może być rozpatrywane jako przypadek narzędzia odcinkowego o odcinku l_r normalnym do tworzącej walca. Wówczas zależność (3.37) przyjmuje postać:

$$h = l. \quad (3.47)$$

Dla zachowania równej liczby oddziaływań narzędzia musi być w tym przypadku spełniona zależność (rys. 3.7b):

$$l_p = l_r. \quad (3.48)$$

W praktyce wartości współczynników k_1 i k_2 dla narzędzia l_h przyjmuje się na ogół $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{3}$, rzadziej $\frac{1}{2}$. Uzależnia się je także od sposobu mocowania narzędzia we wrzecionie i stosunku $\frac{l_h - w}{d}$, odzwierciedlającego prowadzenie narzędzia w otworze. Jeżeli narzędzie połączone jest z wrzecionem przegubowo, wówczas: $\frac{l_h - w_1}{d} \geq 1,5$; $\frac{l_h - w_2}{d} \geq 1,5$.

Zmiana wartości w_1 i w_2 może odbywać się dla narzędzi $l_h < h$ bez lub ze zmianą wartości h . Zwiększanie w_1 , a zmniejszanie w_2 lub na odwrót, przy $h = \text{const}$, prowadzi w przypadku HS do deformowania powierzchni walcowych lub nadawania cech geometrycznych walca powierzchniom stożkowym (rys. 3.17a). Tłumaczy się to między innymi [129] zmianą intensywności obróbki ściernej, będącej wynikiem zmian nacisków jednostkowych p na narzędzie, w funkcji wybiegu lub dobiegu. Zmiana wartości w_1 i w_2 , lub tylko jednej z nich, wymaga każdorazowo, dla stałej wartości l_h , także zmiany h . Stąd też, dla zachowania stałej liczby n , oddziaływań narzędzia powinna ona także powodować zmianę $\frac{n}{f}$ (rys. 3.15). Zmiana wartości tylko w_1 lub w_2 prowadzi do usuwania odchyłek makrogeometrii, zwanych kielichowością (rys. 3.17b). Jednoczesna zmiana wartości w_1 i w_2 umożliwia usunięcie odchyłek pokazanych na rys. 3.17c+d. W przypadku, gdy $w_1 = w_2 = h$ (rys. 3.13c) zależność (3.37) przyjmuje postać wyrażoną wzorem (3.44). Powyższe będzie sprzyjało poprawianiu prostoliniowości kształtowanego walca (rys. 3.17e).

Skoro w_1 i w_2 można przedstawić za pomocą (3.46), wówczas zależność (3.37) przyjmie postać:

$$h = l + k_1 l_h + k_2 l_h - l_h$$

a po podstawieniu do zależności (3.44) i przekształceniach będzie:

$$l_h = \frac{2l}{2 - k_1 - k_2}$$

Jeżeli $k_1 = k_2 = k_3$, wówczas

$$l_h = \frac{l}{1 - k_3}. \quad (3.49)$$

Zależność (3.49) wykazuje, że każda wartość $0 \leq k_3 < 1$ umożliwi uzyskanie równej liczby n , oddziaływań narzędzia, pod warunkiem, że jest spełniona zależność (3.31).

W przypadku poruszania się odcinka l_h z prędkością \bar{v} i \bar{v}_r (rys. 3.18) w narzędziu jedno- lub wieloodcinkowym, wyznaczy on powierzchnię F_1 , której elementarną wartość można określić zależnością [100]:

$$dF_1 = l_h \cdot dl_r, \quad (3.50)$$

gdzie:

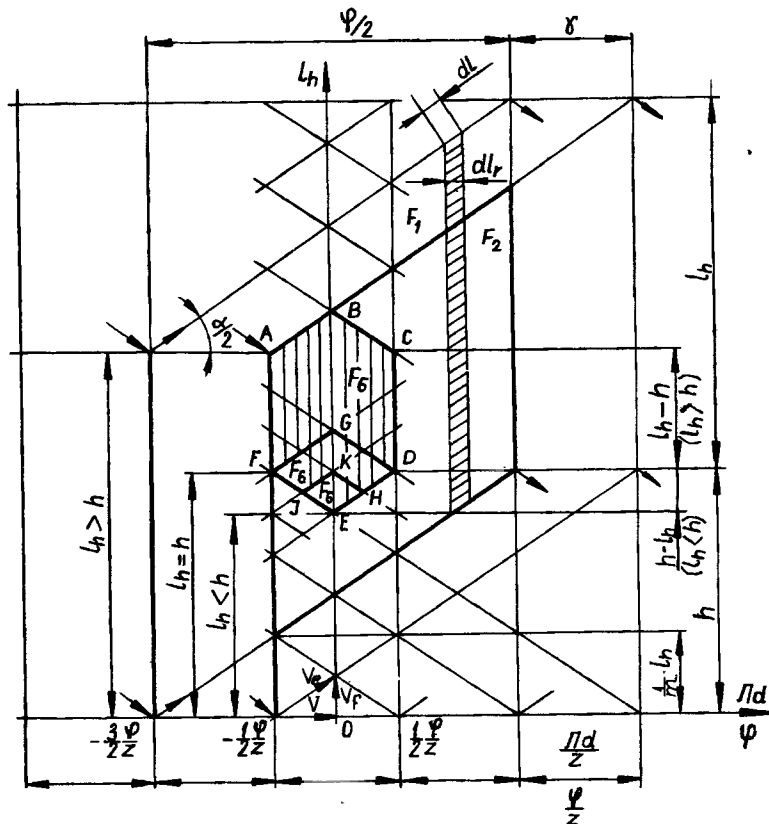
$$dl_r = dL \cdot \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (3.51)$$

Podstawiając do (3.51) zależność (3.16) otrzymuje się:

$$dl_r = \frac{d}{2} \cdot d\varphi. \quad (3.52)$$

Ostatecznie równanie (3.50) przyjmuje postać:

$$dF_1 = l_h \frac{d}{2} \cdot d\varphi. \quad (3.53)$$



Rys. 3.18. Interpretacja geometryczna sposobu obliczania powierzchni o zróżnicowanej liczbie n , oddziaływań narzędzia odcinkowego l_h

Po scałkowaniu równania (3.53) w granicach $\left[-\frac{3\varphi}{2z}; \frac{3\varphi}{2z}\right]$ pole powierzchni F_1 wyznacza zależność:

$$F_1 = \frac{3}{2} l_h \frac{d}{z} \varphi, \quad (3.54)$$

gdzie: $\frac{\varphi}{z}$ – podziałka kątowa pomiędzy narzędziami odcinkowymi l_h ; wartość ta odpowiada kątowi γ w przypadku narzędzia jednoodcinkowego, określonemu zależnościami (3.23) i (3.24).

Po podstawieniu do wzoru (3.54) zależności (3.14) pole powierzchni F_1 wyniesie:

$$F_1 = 3 \frac{\pi d}{z} l_h \frac{n}{f}. \quad (3.55)$$

Podczas tworzenia powierzchni F_1 , narzędzie odcinkowe poprzedzające obejmie swoim oddziaływaniem pewien obszar tej powierzchni, oznaczony na rys. 3.18 jako F_2 . Oznacza to, że powierzchnia ta będzie obrabiana po raz drugi. Można ją wyznaczyć z zależności:

$$dF_2 = \left(l_h - \frac{1}{m} l_h \right) \cdot dl_r. \quad (3.56)$$

Po podstawieniu do równania (3.56) zależności (3.52) oraz scałkowaniu w granicach $\left[-\frac{1}{2} \frac{\varphi}{z}; \frac{3}{2} \frac{\varphi}{z}\right]$ otrzymuje się:

$$F_2 = \left(1 - \frac{1}{m} \right) l_h \frac{d}{z} \varphi; \quad (3.57)$$

a po podstawieniu zależności (3.14) wzór na F_2 ostatecznie przyjmuje postać:

$$F_2 = 2 \left(1 - \frac{1}{m} \right) \frac{\pi d}{z} l_h \frac{n}{f}. \quad (3.58)$$

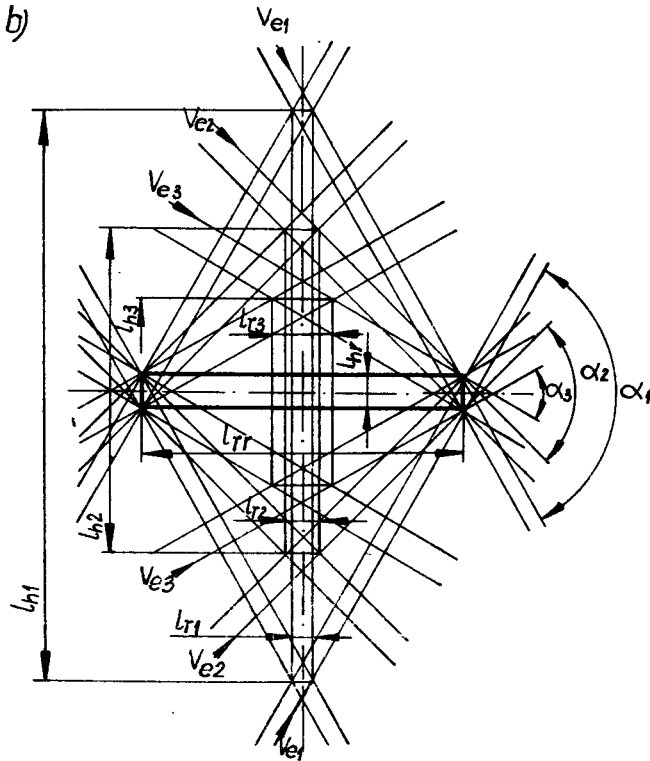
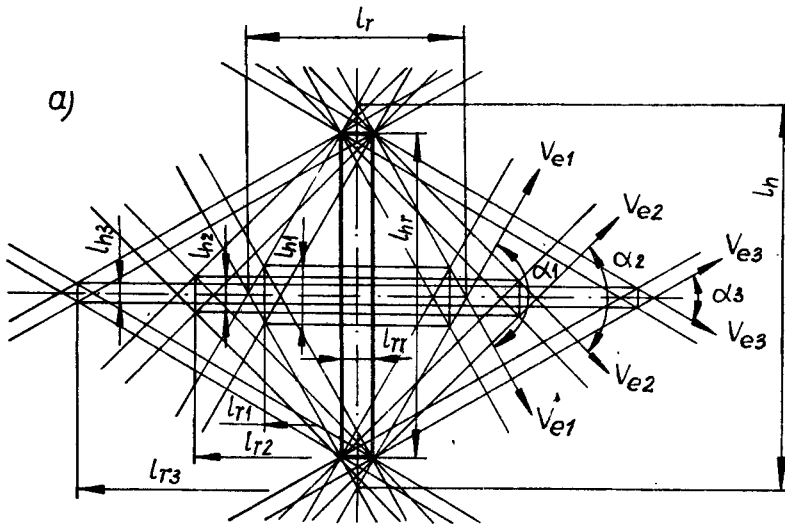
Wartość m można wyznaczyć z zależności (3.32):

$$m = \frac{l_h}{l_p \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}. \quad (3.59)$$

W omawianym przypadku $l_p = \frac{\pi d}{z}$. Wówczas:

$$m = \frac{l_h}{\frac{\pi d}{z} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}. \quad (3.60)$$

Po podstawieniu do (3.60) zależności (3.34) otrzymuje się:



Rys. 3.19. Równoważność pól powierzchni oddziaływań narzędzi podczas honowania dwukierunkowego:
 a) dla narzędzia $l_h \gg l_r$, b) $l_r \gg l_h$

$$\frac{1}{m} = \frac{2hf}{z l_h n}. \quad (3.61)$$

Z rysunków 3.7, 3.8, 3.9, 3.16 oraz 3.18 wynika, że podczas wykonania przez wielościnkowe narzędzie jednego pełnego obrotu o kąt φ lub przez jednościnkowe określonej liczby podwójnych skoków, wyznaczonej stosunkiem $\frac{2\pi}{\gamma}$, pewna część kształtowanej powierzchni spotyka się w czasie jednego cyklu obróbkowego, określonego zależnością (3.31), z wielokrotnym oddziaływaniem narzędzia. Pole powierzchni F_6 , dla przypadku $l_h > h$, oznaczone na rys. 3.18 wierzchołkami A, B, C, D, E, F, można ustalić z zależności:

$$F_6 = \frac{\pi d}{z}(l_h - h) + \frac{1}{m} l_h \cdot dl_r. \quad (3.62)$$

Po podstawieniu zależności (3.52) i obliczeniach otrzymuje się:

$$F_6 = \frac{1}{m} l_h \frac{d\varphi}{4z} + \frac{\pi d}{z}(l_h - h), \quad (3.63)$$

a po podstawieniu zależności (3.14) wyrażenie (3.63) przyjmuje ostateczną postać:

$$F_6 = \frac{\pi d}{2z} \frac{1}{m} l_h \frac{n}{f} + \frac{\pi d}{z}(l_h - h). \quad (3.64)$$

W przypadku, gdy $l_h = h$ (powierzchnia F, G, D, E na rys. 3.18) równanie (3.64) przyjmuje postać:

$$F_6 = \frac{\pi d}{2z} \frac{1}{m} l_h \frac{n}{f}. \quad (3.65)$$

Jeżeli $l_h < h$, wówczas dla przypadku:

$$h - l_h = \frac{1}{2} \frac{1}{m} l_h$$

pole powierzchni F_6 (J, K, H, E na rys. 3.18) można wyznaczyć z zależności:

$$F_6 = \frac{1}{4} \frac{\pi d}{2z} \frac{1}{m} l_h \frac{n}{f}. \quad (3.66)$$

W przypadku, gdy $h - l_h = \frac{1}{m} l_h$, wówczas w czasie jednego cyklu obróbkowego, wyznaczonego zależnością (3.31), wartość $F_6 = 0$.

W rozpatrywanych do tej pory narzędziach brano pod uwagę: l_r dla $l_r = 0$ lub l_r dla $l_h = 0$. Uczyniono to świadomie, dla uproszczenia rozważań. Z rys. 3.7, a szczególnie z rys. 3.19 widać, że identyczne ślady oddziaływań można uzyskać dla obu narzędzi, pod warunkiem, że w obu przypadkach kąt $\alpha = \text{const}$. Wówczas:

$$l_r = \frac{l_h}{\text{tg} \frac{\alpha}{2}}. \quad (3.67)$$

W podobny sposób można wyznaczyć cechy geometryczne narzędzi realnych, o długości l_{hr} i szerokości l_{rr} . Wówczas wartość l_{hr} wyniesie:

$$l_{hr} = l_h - l_{rr} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (3.68)$$

Możliwa jest także transformacja narzędzia o cechach geometrycznych $l_{hr} \wedge l_{rr}$ w narzędzia o cechach: $l_{h1} \wedge l_{r1}$, $l_{h2} \wedge l_{r2}$, $l_{h3} \wedge l_{r3}$, w przypadkach gdy: $\alpha = \alpha_1$, $\alpha = \alpha_2$, $\alpha = \alpha_3$. Pamiętać przy tym należy, że zmiana wartości kąta α wnosi także zmiany l_h , jak to pokazano na rys. 3.19a. W podobny sposób można także rozpatrywać transformację odwrotną, którą zinterpretowano geometrycznie na rys. 3.19b.

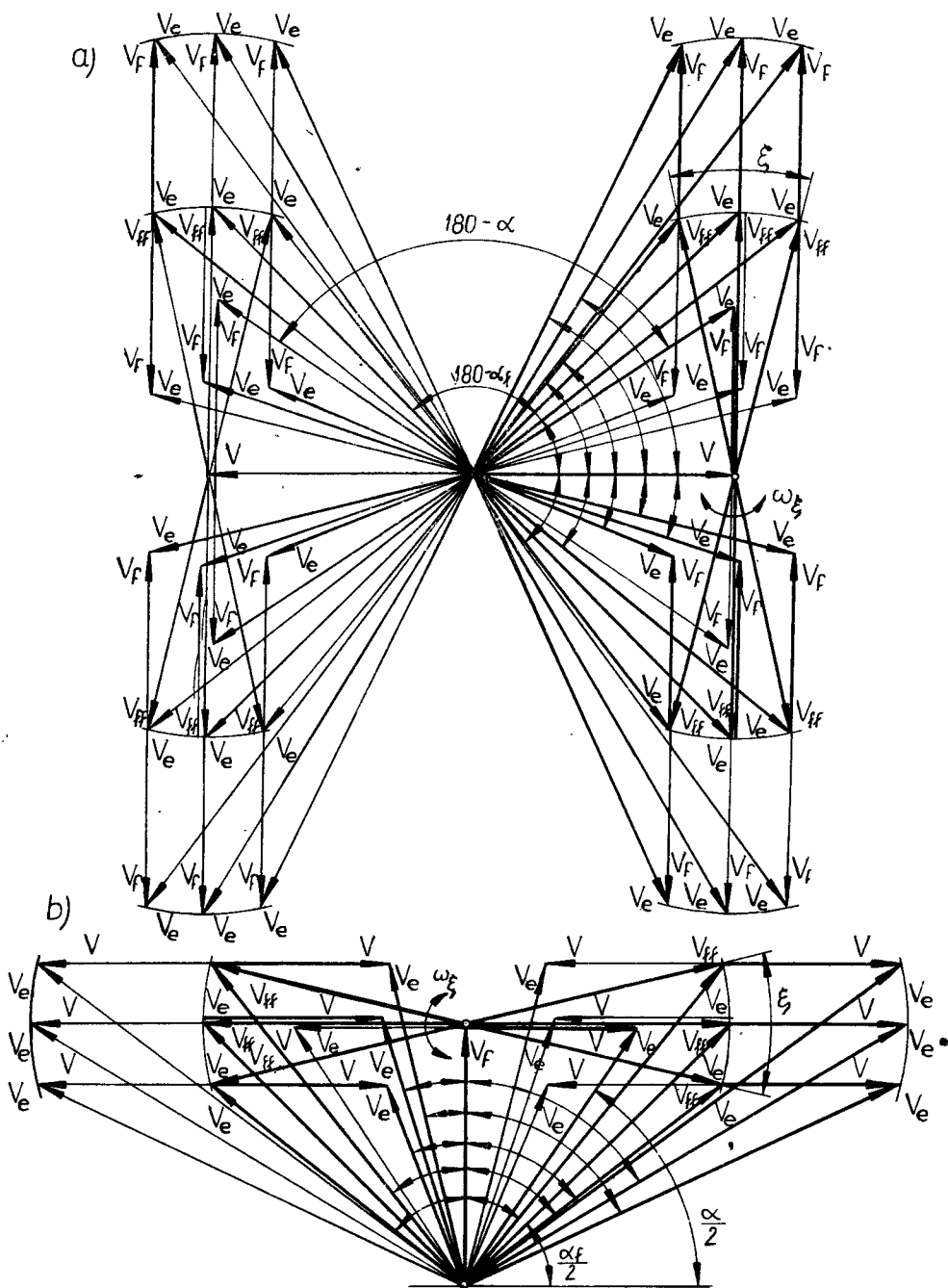
Ślady oddziaływań narzędzi o cechach geometrycznych innych niż l_h lub l_r , np. stanowiące fragment linii śrubowej, które można analizować podobnie jak wyżej – nie są dalej rozpatrywane.

W omawianych do tej pory przypadkach honowania narzędzie porusza się względem obrabianego przedmiotu najczęściej z prędkościami analogowymi $\bar{v} \wedge \bar{v}_f$. Na rys. 3.3 pokazano, że jedna z prędkości może przyjmować wartości dyskretne lub być równa zeru. Ze względu na cechy geometryczne walca obrotowego, wektor prędkości \bar{v}_f najczęściej wykonuje zwroty, natomiast wektor prędkości \bar{v} tych zwrotów nie wykonuje. Łatwo zauważyć, że jedna z prędkości \bar{v} lub \bar{v}_f może być zastąpiona przez prędkość oscylacyjną \bar{v}_{ff} . Można też na tę prędkość nałożyć wektor prędkości \bar{v}_{ff} (rys. 3.20 i 3.21). Zwykle zastępowanie lub nakładanie na jedną z prędkości \bar{v} lub \bar{v}_f prędkości oscylacyjnej \bar{v}_{ff} prowadzi do nowego procesu – w tym przypadku superfinitzu (dogłazanie oscylacyjne). Proces obróbki ściernej można także zrealizować za pomocą obrócenia lub obracania wektora \bar{v}_{ff} o pewien kąt ξ względem \bar{v} lub \bar{v}_f (rys. 3.20 i 3.21). Nosi on wówczas nazwę mikrofiniszu. W przypadku obrócenia wektora \bar{v}_{ff} o pewien stały kąt ξ , mikrofinisz ten nosi nazwę skośnego, natomiast w przypadku ciągłego obracania wektora \bar{v}_{ff} z prędkością ω_ξ – mikrofiniszu kąтового [109, 115]. Rysunek 3.20 przedstawia wykres prędkości dla honowania, superfinitzu i mikrofiniszu, a rys. 3.21 kilka możliwych trajektorii punktu narzędzia dla omawianych przypadków.

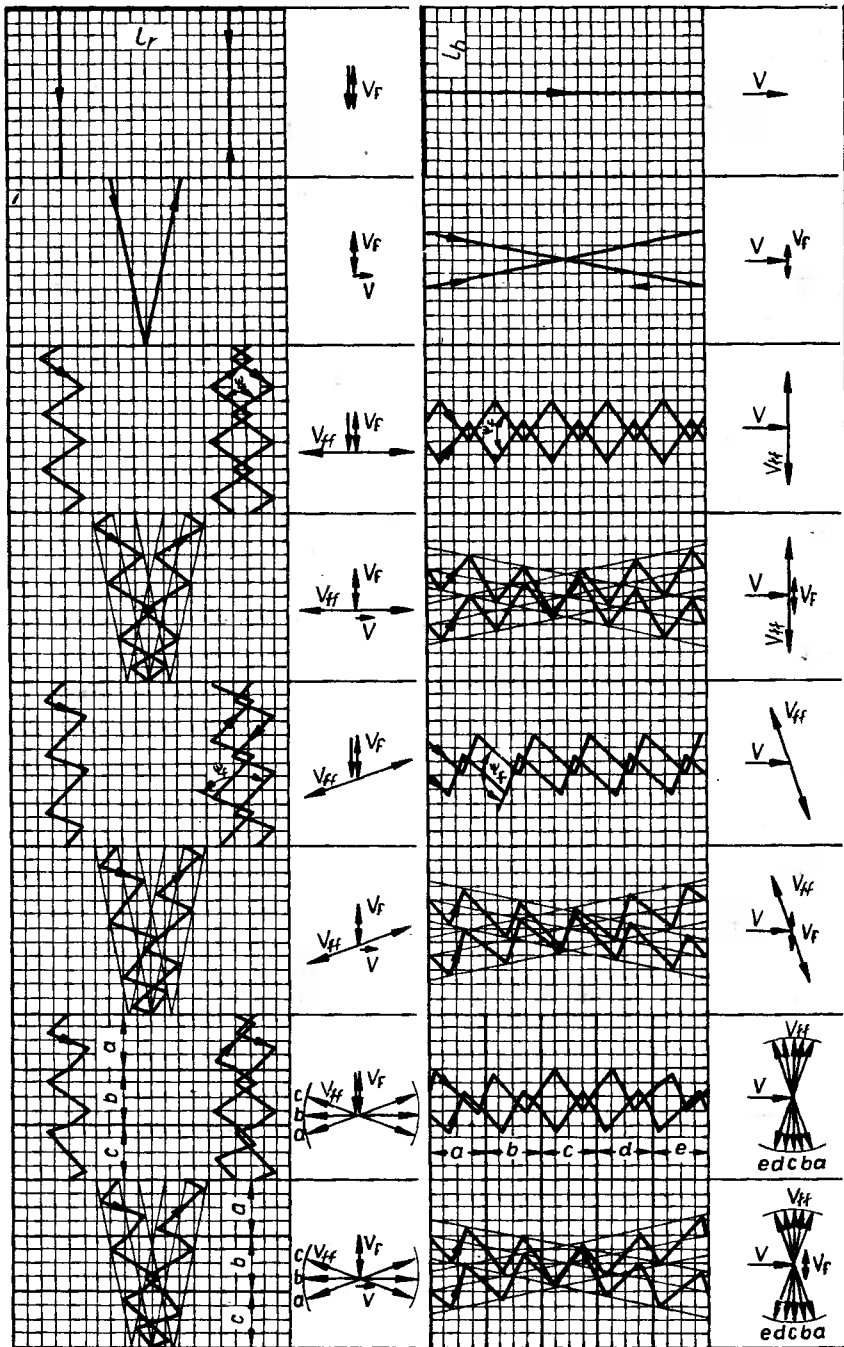
W przypadku superfinitzu jak i mikrofiniszu ślady obróbki nie powinny nakładać się (co omówiono wyżej). Wynika stąd wniosek, że liczba fal o długości λ na obwodzie πd (lub skoku h narzędzia) obrabianej powierzchni powinna być niepełną wielokrotnością całkowitą:

$$\begin{aligned} (m_f + e_f)\lambda &= \pi d, \\ (m_f + e_f)\lambda &= h, \end{aligned} \quad (3.69)$$

gdzie: m_f – liczba pełnych fal oscylacji na obwodzie πd lub długości skoku h ,
 e_f – liczba zawarta w przedziale $0 < e_f < 1$, zazwyczaj przyjmowana $e_f \approx 0,5$,
 λ – długość fali oscylacji.



Rys. 3.20. Wykres prędkości dla honowania, superfiniszu i mikrofiniszu: a – prędkość \bar{v}_{ff} , dodana do prędkości \bar{v}_j , b – prędkość \bar{v}_{ff} , dodana do prędkości \bar{v} z pominięciem zmiany kierunku \bar{v}_j . Linia grubą zaznaczono prędkości dla jednego kierunku \bar{v} i \bar{v}_j



Rys. 3.21. Kilka możliwych trajektorii punktu narzędzia ściernego podczas kształtowania powierzchni o postaci walca obrotowego (dla skokowych zmian prędkości)

Z rys. 3.20 wynika, że w przypadku superfiniszu wypadkowa prędkość \bar{v}_{ef} będzie mogła być ustalona z zależności:

$$v_{ef} = \sqrt{v_f^2 + (v_{ff} \pm v)^2} \quad (3.70)$$

lub

$$v_{ef} = \sqrt{v^2 + (v_{ff} \pm v_f)^2}, \quad (3.71)$$

gdzie: v_{ef} – wypadkowa prędkość skrawania dla superfiniszu.

Zależność (3.71) jest eksponowana w literaturze, szczególnie w przypadku omawiania obróbki powierzchni zewnętrznych.

Ustalenie wypadkowych prędkości \bar{v}_e w przypadku mikrofiniszu sprowadza się do prostych obliczeń, nie wymagających wyprowadzeń. Należy zauważyć, że w zależności od kąta ξ obrotu wektora \bar{v}_{ff} oraz zwrotu \bar{v} lub \bar{v}_f wypadkowe prędkości \bar{v}_e ulegają zmianie, a wraz z nimi odpowiednie kąty α_f skrzyżowania śladów narzędzia. Kąty te zaznaczono odpowiednio parami na rys. 3.20.

Wartość kąta skrzyżowania śladów narzędzia w superfiniszu można obliczyć w dwojaki sposób [61]. W pierwszym przypadku kąt przecinania się śladów z normalną do tworzącej będzie wynosił:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha_f}{2} = \frac{v_f}{v_{ff} \pm v}. \quad (3.72)$$

W przypadku drugim przyjmuje się umowny kąt ψ_f skrzyżowania dwóch torów śladów, gdy tory te są przesunięte o połowę skoku h_f oscylacji oraz o wartość $e_f = 0,5$. Wartość tego kąta, dla przebiegu prędkości jak na rys. 3.21, można wyznaczyć z zależności:

$$\operatorname{tg} \frac{\psi_f}{2} = 2 \frac{h_f}{\lambda}, \quad (3.73)$$

gdzie: h_f – skok (amplituda) oscylacji.

W podobny sposób, jak wyżej, można ustalić kąty α_f oraz ψ_f dla mikrofiniszu skośnego oraz kąтового, które w tym ostatnim przypadku ulegają ciągłym zmianom wraz ze zmianą kąta ξ położenia wektora \bar{v}_{ff} . Na rys. 3.21 pokazano trajektorie śladów, dla chwilowych położań a, b, c, d, e wektora \bar{v}_{ff} .

3.3. HONOWANIE JEDNOKIERUNKOWE

W rozdziale 3.1, omawiającym podstawowe sposoby kształtowania cech geometrycznych powierzchni o postaci walca obrotowego, zwrócono uwagę, że w przypadku gdy (3.1):

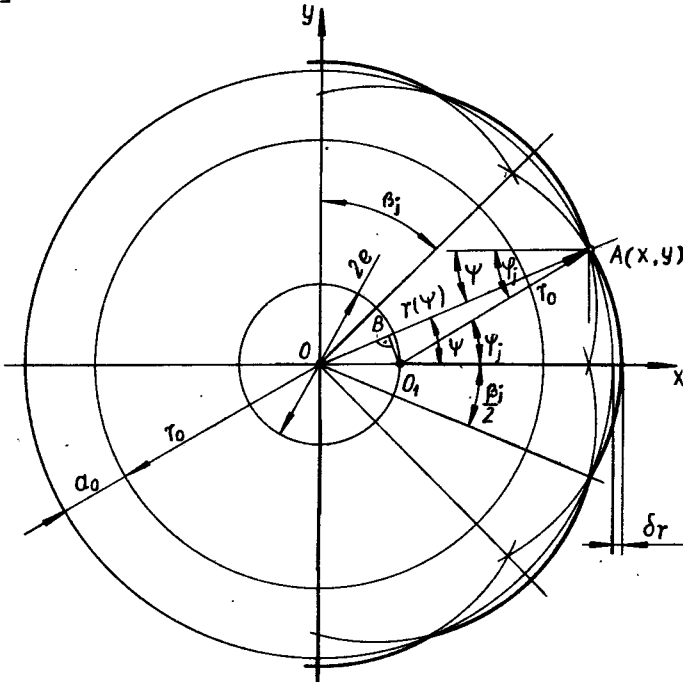
$$\bar{v}_f \neq 0 \text{ a } \bar{v} = 0 \text{ lub } \bar{v} = \bar{v}_{oc}$$

lub

$$\bar{v} \neq 0 \text{ a } \bar{v}_f = 0 \text{ lub } \bar{v}_f = \bar{v}_{jc}$$

wówczas ślady narzędzia ściernego są równoległe lub prostopadłe do osi walca. Taki przypadek jest określany jako honowanie jednokierunkowe wzdłużne (HJW) lub poprzeczne (HJP).

Przypadek HJP, pokazany na rys. 3.2, jest na tyle prosty, że nie wymaga oddzielnego omawiania. Konieczne jest jednak zwrócenie uwagi na to, aby ślady narzędzia ściernego nie przebiegały po tych samych trajektoriach. Można to uzyskać np. za pomocą wprowadzenia wektora oscylacji \vec{v}_{ff} , równoległego do osi obrabianego walca (rys. 3.20 i 3.21). Spotyka się to rozwiązanie w konstrukcjach niektórych obrabiarek [10, 55, 112].



Rys. 3.22. Podstawowe zależności wielolukowości otworów HJW za pomocą narzędzia, gdzie $\Sigma l_i > 2\pi r_0$

Honowanie jednokierunkowe wzdłużne (HJW), poza aspektami natury trybologicznej, co zostanie omówione w dalszej części pracy, jest szczególnie przydatne do obróbki otworów np. z rowkami wpustowymi i w tych wszystkich przypadkach, gdy długość narzędzia ściernego lub elektrody ma być możliwie mała. W rozpatrywanych na rys. 3.1 i 3.2 narzędziach odcinkowych l_r i l_h , zależność tę można zapisać:

$$l_r < l_h \tag{3.74}$$

gdzie:

$$l_r = \pi d. \tag{3.75}$$

Z zależności (3.74) i (3.75) wynika, że zastosowanie HJW ze względu na minimalną długość narzędzia będzie wtedy korzystne, gdy:

$$\frac{l}{d} > \pi. \tag{3.76}$$

Analizując rys. 3.1, a szczególnie przypadki 1/2 i 2/2 pokazane na tym rysunku, łatwo zauważyć, że HJW w sposób naturalny prowadzi do powstawania otworów wielołukowych (rys. 3.22).

Wartość odchyłki okrągłości (wielołukowości) δ_r , można wyznaczyć z zależności (rys. 3.22) [107]:

$$\delta_r = \left| \bar{r}(\psi = 0) \right| - \left| \bar{r}\left(\psi = \frac{\beta_j}{2}\right) \right|, \quad (3.77)$$

gdzie: δ_r – odchyłka okrągłości, wielołukowość,

$r(\psi)$ – promień wodzący punktu $A(x, y)$,

$\beta_j = \frac{2\pi}{z}$ – podziałka kątowa narzędzia,

z – liczba narzędzi, umożliwiająca uzyskanie zamkniętej linii wielołukowej (rys. 3.23b).

Promień $r(\psi)$ można wyznaczyć z zależności trygonometrycznych (rys. 3.22):

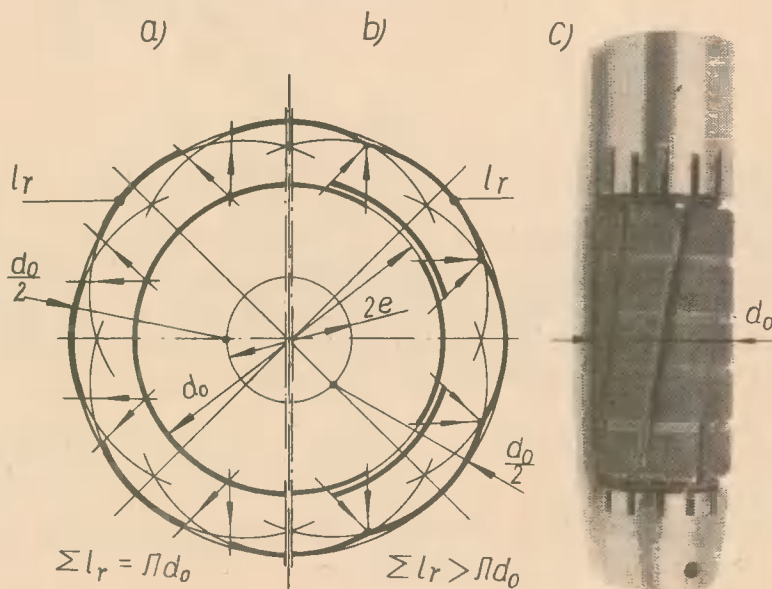
$$r(\psi) = e \cdot \cos \psi + r_0 \cdot \cos(\varphi_j - \psi), \quad (3.78)$$

gdzie: e – mimośród,

r_0 – początkowy promień krzywizny narzędzia.

Wartość kąta φ_j można wyznaczyć z równania:

$$\varphi_j = \arctg \frac{y_A}{x_A - e}, \quad (3.79)$$



Rys. 3.23. Narzędzia umożliwiające HJW: a) $\sum l_r = \pi d_0$, b) $\sum l_r > \pi d_0$, c) przykład ściernego narzędzia segmentowego, gdzie $\sum l_r > \pi d_0$. Narzędzie z przykładu c jest konstrukcji autora [27, 39, 107]

gdzie:

$$y_A = x_A \cdot \operatorname{tg} \psi, \quad (3.80)$$

$$(x_A - e)^2 = r_0^2 - x_A^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \psi. \quad (3.81)$$

Współrzedną x_A można wyznaczyć z równania (3.81), które po przekształceniach przyjmuje postać:

$$(1 + \operatorname{tg}^2 \psi)x_A^2 - 2ex_A - (r_0^2 - e^2) = 0. \quad (3.82)$$

Rozwiązując równanie (3.82), wartość x_A wyniesie:

$$x_A = \frac{e + [r_0^2 + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot (r_0^2 - e^2)]^{\frac{1}{2}}}{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}, \quad (3.83)$$

która po podstawieniu do zależności (3.80) pozwoli ustalić współrzedną y_A w postaci:

$$y_A = \frac{e + [r_0^2 + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot (r_0^2 - e^2)]^{\frac{1}{2}}}{1 + \operatorname{tg}^2 \psi} \cdot \operatorname{tg} \psi. \quad (3.84)$$

Podstawiając zależność (3.83) i (3.84) do wzoru (3.79) otrzymuje się wyrażenie na wartość kąta φ_j , która wyniesie:

$$\varphi_j = \operatorname{arctg} \frac{\frac{e + [r_0^2 + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot (r_0^2 - e^2)]^{\frac{1}{2}}}{1 + \operatorname{tg}^2 \psi} \cdot \operatorname{tg} \psi}{\frac{e + [r_0^2 + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot (r_0^2 - e^2)]^{\frac{1}{2}}}{1 + \operatorname{tg}^2 \psi} - e}, \quad (3.85)$$

a po uproszczeniu jest:

$$\varphi_j = \operatorname{arctg} \frac{\{e + [r_0^2 + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot (r_0^2 - e^2)]^{\frac{1}{2}}\} \operatorname{tg} \psi}{[r_0^2 + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot (r_0^2 - e^2)]^{\frac{1}{2}} - e \cdot \operatorname{tg}^2 \psi}. \quad (3.86)$$

Uwzględniając zależność (3.86) we wzorze (3.78), wartość $r(\psi)$ będzie:

$$r(\psi) = e \cdot \cos \psi + r_0 \cdot \cos \left\{ \operatorname{arctg} \frac{[e + \sqrt{r_0^2 + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot (r_0^2 - e^2)}] \operatorname{tg} \psi}{\sqrt{r_0^2 + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot (r_0^2 - e^2)} - e \cdot \operatorname{tg}^2 \psi} - \psi \right\}, \quad (3.87)$$

a dla $r(\psi = 0)$, z zależności (3.87), wartość ta wyniesie:

$$r(\psi = 0) = e + r_0. \quad (3.88)$$

Zakładając, że trwałość narzędzia jest na tyle duża, że pozwala przyjąć:

$$e = a_0 \quad (3.89)$$

$$r_0 = \frac{d_0}{2},$$

gdzie: a_0 – naddatek na obróbkę,

d_0 – początkowa średnica narzędzia, odpowiadająca początkowej średnicy obrabianego otworu,

wówczas zależność (3.77) można sprowadzić do postaci:

$$\delta_r = \left| a_0 \cdot \cos \psi + \frac{d_0}{2} \cdot \cos \left\{ \arctg \frac{\left[a_0 + \sqrt{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot \left[\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - a_0^2}\right]} \cdot \operatorname{tg} \psi}{\sqrt{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 + \operatorname{tg}^2 \psi \cdot \left[\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - a_0^2}\right]} - a_0 \cdot \operatorname{tg}^2 \psi} \right\} - \psi \right| -$$

$$- \left| a_0 \cdot \cos \frac{\beta_j}{2} + \right.$$

$$\left. + \frac{d_0}{2} \cdot \cos \left\{ \arctg \frac{\left[a_0 + \sqrt{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 + \operatorname{tg}^2 \frac{\beta_j}{2} \cdot \left[\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - a_0^2}\right]} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta_j}{2} - \frac{\beta_j}{2} \right\} \right| \quad (3.90)$$

Po przyjęciu $\psi = 0$:

$$\delta_r = a_0 \left(1 - \left| \cos \frac{\beta_j}{2} \right| \right) + \frac{d_0}{2} \left(1 - \right.$$

$$\left. - \left| \cos \left\{ \arctg \frac{\left[a_0 + \sqrt{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 + \operatorname{tg}^2 \frac{\beta_j}{2} \cdot \left[\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - a_0^2}\right]} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta_j}{2} - \frac{\beta_j}{2} \right\} \right| \right) \right) \quad (3.91)$$

Z zależności (3.91) wynika, że w przypadku gdy $a_0 = 0$, wówczas:

$$\delta_r = \frac{d_0}{2} \left\{ 1 - \left| \cos \left[\arctg \left(\operatorname{tg} \frac{\beta_j}{2} \right) - \frac{\beta_j}{2} \right] \right| \right\} = 0, \quad (3.92)$$

co wypływa także z przesłanek logicznych.

W przypadku gdy $\beta_j \rightarrow 0$, co oznacza $z \rightarrow \infty$ (3.77), wówczas jak to wynika z zależności (3.91) lub rys. 3.22

$$\delta_r \rightarrow 0.$$

Jeżeli

$$\begin{aligned} a_0 &\neq 0, \\ \beta_j &= 2\pi, \end{aligned} \quad (3.93)$$

$$\delta_r = a_0 \left(1 - \left| \cos \frac{\beta_j}{2m} \right| \right) + \frac{d_0}{2} \left(1 - \left| \cos \left[\arctg \frac{a_0 + \sqrt{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 + \operatorname{tg}^2 \frac{\beta_j}{2m} \cdot \left[\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - a_0^2}\right]}{\sqrt{\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 + \operatorname{tg}^2 \frac{\beta_j}{2m} \cdot \left[\left(\frac{d_0}{2}\right)^2 - a_0^2}\right]} - a_0 \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\beta_j}{2m}} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta_j}{2m} - \frac{\beta_j}{2m} \right] \right| \right) \quad (3.96)$$

Wartość δ_r , ustalona z zależności (3.96), powinna pokrywać ustaloną część pola tolerancji T wykonania otworu.

4. WPŁYW SPOSOBU DOPROWADZENIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA SPADKI NAPIĘĆ W SZCZELINIE MIĘDZYELEKTRODOWEJ

Z analizy teoretycznej, przedstawionej w rozdziale III.3 wynika, że długości elektrod stosowanych w ECH można ogólnie podzielić na:

$$l_h \geq l + h, \quad (4.1)$$

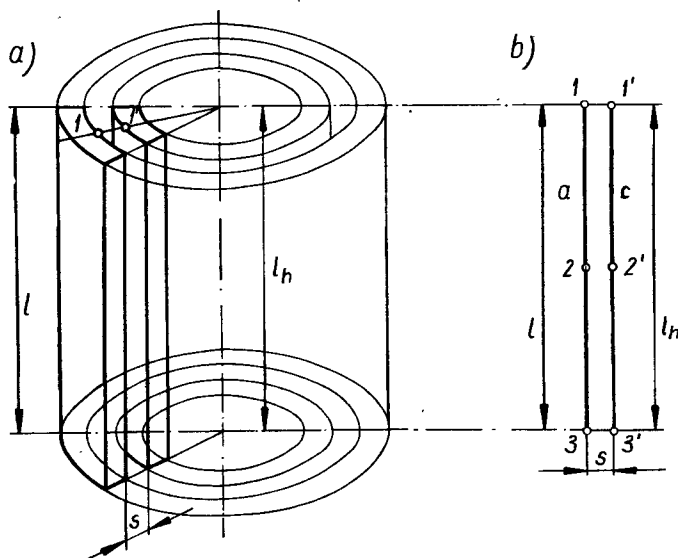
$$l_h \leq l, \quad (4.2)$$

gdzie: l_h – długość katody,

l – długość honowanego otworu (anody),

h – długość skoku katody.

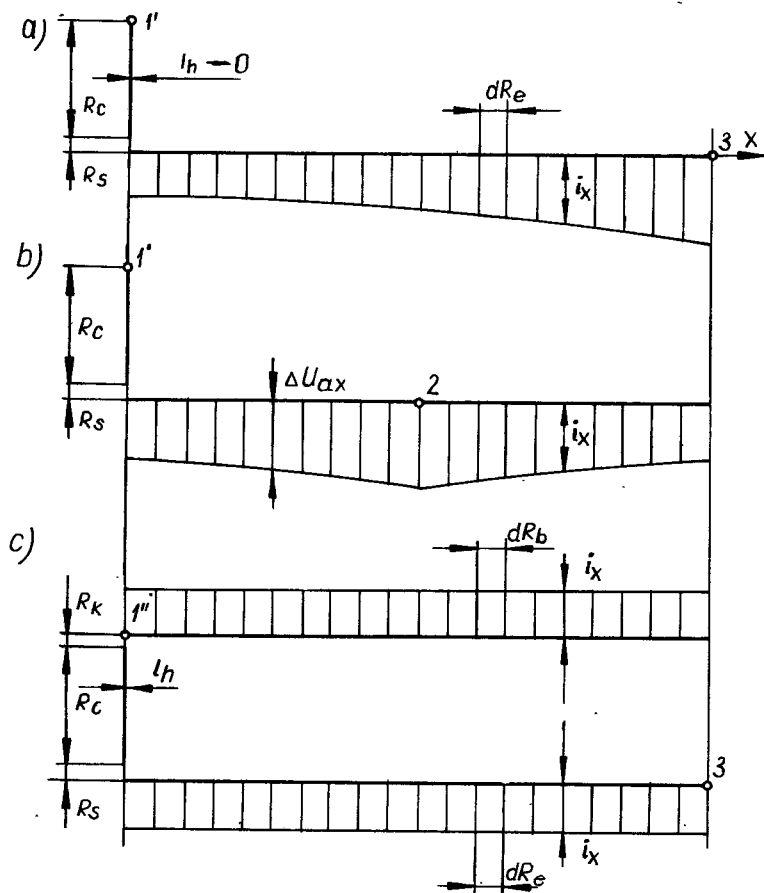
Zależność (4.1) w ECH, ze względu na konstrukcję narzędzia, dotyczy obróbki otworów krótkich i nie będzie dalej rozpatrywana, ponieważ jest charakterystyczna.



Rys. 4.1. Model szczeliny międzyelektrodowej w ECH: a – geometryczny, b – ideowy, z zaznaczonymi kilkoma charakterystycznymi przypadkami zasilania

dla większości przypadków stosowania ECM (rys. 4.1a), w których długości elektrod są na tyle małe, że nie istnieje potrzeba uwzględniania sposobu doprowadzenia energii elektrycznej i jego wpływu na podłużny spadek napięcia w szczelinie międzyelektrodowej [4, 68, 99].

W przypadku rozpatrywania modelu szczeliny międzyelektrodowej (rys. 4.1) dla



Rys. 4.2. Wpływ sposobu doprowadzenia energii elektrycznej na natężenie prądu i_x dla elektrody $l_h \rightarrow 0$ oraz kilku wybranych przypadków zasilania: a – zasilanie 3–1', b – zasilanie 2–1', c – zasilanie przez dodatkową rezystancję kompensującą R_k ,

warunku $l_h \ll l$ (4.2), a szczególnie dla przypadku $l_h \rightarrow 0$, co przedstawiono na rys. 4.2a, można zauważyć, że jeżeli:

$$s = \text{const}, \quad \kappa = \text{const}, \quad j = \text{const}, \quad (4.3)$$

gdzie: s – grubość szczeliny międzyelektrodowej,

κ – przewodność właściwa elektrolitu,

j – jednostkowa gęstość prądu obciążenia katody,

wówczas:

$$i_x = \frac{U_{ca}}{R_c + R_s + R_{ex}}, \quad (4.4)$$

gdzie: i_x – natężenie prądu elektrycznego płynącego w obwodzie, w zależności od położenia x katody,

U_{ca} – napięcie międzyelektrodowe,

R_c – rezystancja katody,

R_s – rezystancja poprzeczna szczeliny międzyelektrodowej,

R_{ex} – rezystancja anody, w zależności od położenia x katody.

Przyjmując:

$$U_{ca} = \text{const},$$

$$R_c = \text{const} = 0, \quad (4.5)$$

$$R_{ex} = R_e \left(1 - \frac{x}{l}\right),$$

gdzie: R_e – rezystancja anody, odpowiadająca rezystancji przedmiotu obrabianego,

x – położenie katody względem anody,

wówczas:

$$i_x = \frac{U_{ca}}{R_s + R_e \left(1 - \frac{x}{l}\right)}. \quad (4.6)$$

Z wyrażenia (4.6) wynika, że dla $x = l$, wartość i_x osiąga maksimum:

$$i_{x=l} = \frac{U_{ca}}{R_s}, \quad (4.7)$$

natomiast dla $x = 0$, jest najmniejsza:

$$i_{x=0} = \frac{U_{ca}}{R_s + R_e}. \quad (4.8)$$

Zasadność zależności (4.6) można wykazać przykładem obliczeniowym przyjmując:

- | | |
|--|-------------------------------------|
| – napięcie międzyelektrodowe | $U_{ca} = 10 \text{ V},$ |
| – rezystancję właściwą materiału honowanego cylindra | $\rho_p = 10^{-4} \Omega\text{cm},$ |
| – rezystancję właściwą elektrolitu | $\rho_s = 10 \Omega\text{cm},$ |
| – grubość szczeliny międzyelektrodowej | $s = 10^{-2} \text{ cm},$ |
| – długość honowanego cylindra | $l = 10^2 \text{ cm},$ |
| – pole powierzchni katody | $F_e = 20 \text{ cm}^2,$ |
| – pole przekroju poprzecznego cylindra | $F_{pp} = 20 \text{ cm}^2.$ |

Poszczególne rezystancje wyniosą:

$$R_s = 5 \cdot 10^{-3} \Omega, \quad R_e = 5 \cdot 10^{-4} \Omega,$$

a odpowiadające im natężenia prądów są:

$$i_{x=l} = i_{\max} = 2000 \text{ A}, \quad i_{x=0} = i_{\min} = 1818,18 \text{ A}.$$

Obliczona zmiana natężenia prądu wynosi ok. 10%. W przypadku przyjęcia $l = 10^3$ cm zmiana ta wyniesie 50%. Należy dodać, że przyjęte pola przekroju cylindra F_{pp} , jak i pole powierzchni katody F_e , są zbliżone do przypadku występującego w badaniach doświadczalnych omówionego w rozdziale IV.

Zmianom wartości i_x (4.6) towarzyszy poprzeczny spadek napięcia ΔU_s na rezystancji R_s , który w przypadku przyjęcia założeń (4.5) można określić następująco:

$$\Delta U_s = i_x R_s \quad (4.9)$$

a po podstawieniu zależności (4.6):

$$\Delta U_s = \frac{U_{ca}}{1 + \frac{R_e}{R_s} \left(1 - \frac{x}{l}\right)} \quad (4.10)$$

Rysunek 4.2a przedstawia interpretację geometryczną zmian natężenia prądu elektrycznego i_x , wyznaczonego z zależności (4.6). Odpowiada jej także postać spadku napięcia ΔU_s , wyznaczonego z zależności (4.10). Podobną analizę, jak wyżej, można także przeprowadzić dla doprowadzenia energii elektrycznej w miejscach 2–1' (rys. 4.2b).

Analizując zależności: (4.6), (4.10) oraz rys. 4.2a i 4.2b można zauważyć, że rezystancja R_e obrabianego przedmiotu może wpływać na odchyłki makrogeometrii kształtowanej powierzchni o postaci walca obrotowego, bez względu na miejsce doprowadzenia energii elektrycznej. Można temu przeciwdziałać przez bocznikowanie R_e dodatkową rezystancją $R_d \ll R_e$, czyniąc tym samym doprowadzenie energii elektrycznej do obrabianego przedmiotu ekwipotencjalnym, bądź też przez wprowadzenie dodatkowej R_b , kompensującej zmiany rezystancji R_e .

W przypadku zasilania energią elektryczną, pokazanym na rys. 4.2c, wartość natężenia prądu i_x można wyznaczyć z zależności:

$$i_x = \frac{U_{ca}}{R_{bx} + R_k + R_c + R_s + R_{ex}} \quad (4.11)$$

gdzie: R_{bx} – rezystancja kompensatora, w zależności od położenia x katody,

R_k – rezystancja komutatora,

R_b – rezystancja kompensatora.

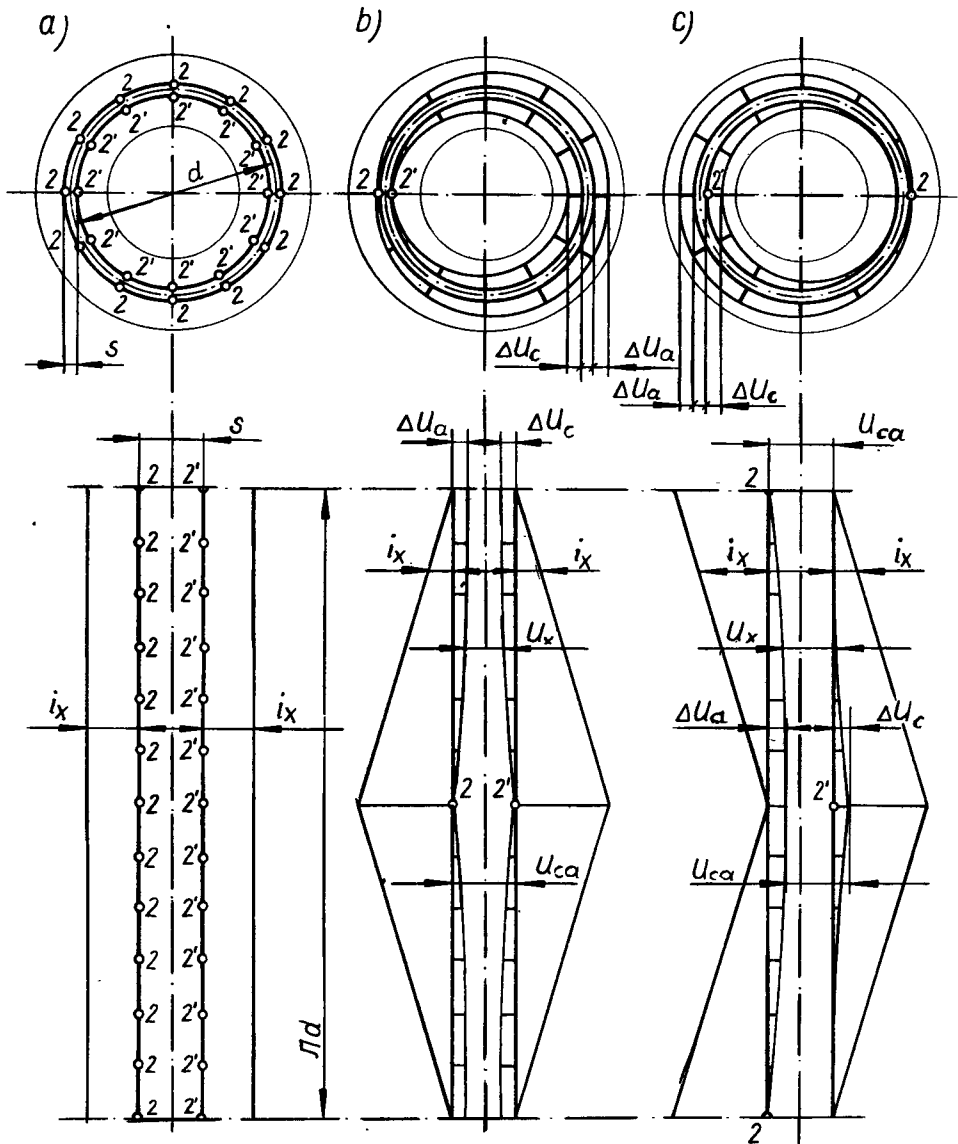
Podstawiając do (4.11):

$$R_{bx} = R_b \frac{x}{l}, \quad (4.12)$$

$$R_{ex} = R_e \left(1 - \frac{x}{l}\right),$$

wówczas:

$$i_x = \frac{U_{ca}}{R_b \frac{x}{l} + R_k + R_c + R_s + R_e \left(1 - \frac{x}{l}\right)} \quad (4.13)$$



Rys. 4.3. Wpływ poprzecznego sposobu doprowadzenia energii elektrycznej na natężenie prądu i_x oraz spadki napięć w szczelinie międzyelektrodowej (U_x) ΔU_a oraz ΔU_c , dla kilku wybranych przypadków zasilania: a – zasilanie współśrodkowe, b – jednostronnie niesymetryczne, c – dwustronnie niesymetryczne

W przypadku szczególnym, gdy:

$$R_e = R_b = R = \text{const},$$

oraz:

$$U_{ca} = \text{const},$$

$$R_k = \text{const},$$

$$\begin{aligned} R_s &= \text{const}, \\ R_c &= \text{const} = 0, \end{aligned}$$

wówczas:

$$i_x = \frac{U_{ca}}{R_k + R_s + R} = \text{const}, \quad (4.14)$$

co oznacza, że również poprzeczny spadek napięcia ΔU_s na szczelinie międzyelektrodowej będzie stały, jak to wynika z zależności (4.9). Nie odbywa to się jednak bez dodatkowych strat energetycznych na R_s oraz R_k , co można zauważyć na rys. 4.2.

Rozpatrując przekroje poprzeczne obrabianego przedmiotu i narzędzia (rys. 4.3), dla założeń (4.3), można zauważyć, że współśrodkowe doprowadzenie energii elektrycznej (rys. 4.3a) pozwala uzyskać równe natężenia prądów jak i spadki napięć w każdym miejscu szczeliny międzyelektrodowej. Jeżeli doprowadzenie energii elektrycznej jest jednostronnie lub dwustronnie niesymetryczne, wówczas pojawia się obwodowy rozptył prądów oraz towarzyszące jemu obwodowe spadki napięcia (rys. 4.3b i 4.3c), które można wyznaczyć ze znanych zależności. Z obliczeń wynika, że spadki napięcia w szczelinie międzyelektrodowej, na skutek obwodowego rozptyłu prądów, nie są znaczne i powinny być brane pod uwagę jedynie przy ECH otworów o dużych średnicach i małych dopuszczalnych odchyłkach okrągłości.

Powyższe rozważania znalazły odzwierciedlenie w patentach autora (nr: 208148, 207596, 207717) [27].

5. WPŁYW RUCHU ORAZ SPOSOBU DOPROWADZENIA ELEKTROLITU NA ODWZOROWANIE CECH GEOMETRYCZNYCH KATODY

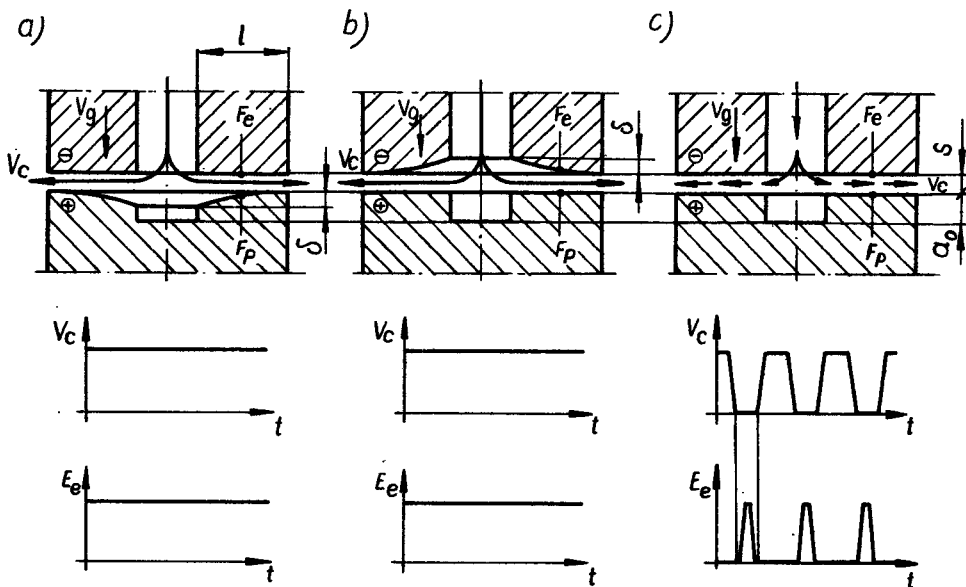
Rozpatrując w procesie ECM pole powierzchni kształtującej katody F_e na tle pola powierzchni kształtowanej F_p , można najogólniej przyjąć, że:

$$F_e \geq F_p, \quad (5.1)$$

$$F_e < F_p, \quad (5.2)$$

gdzie: F_e, F_p – pole powierzchni: kształtującej (e), kształtowanej (p).

Dla ukształtowania obrabianej powierzchni F_p w przypadku spełniającym zależność (5.1), nie jest wymagany styczny ruch katody i przedmiotu obrabianego. Niezbędny może się okazać ruch w kierunku normalnym do kształtowanej powierzchni, ciągly lub dyskretny, w celu usunięcia nadmiaru obróbkowego a_0 (rys. 5.1). Przypadek ten jest najczęściej omawiany w literaturze dotyczącej ECM, zwłaszcza w zakresie zmian przewodności κ przepływającego elektrolitu w funkcji długości l szczeliny międzyelektrodowej, powodującej zróżnicowanie prędkości roztwarzania kształtowanej powierzchni. Prowadzi to do braku odwzorowania cech geometrycznych katody w kształtowanej powierzchni. Wartość δ na rys. 5.1a, wyznaczona jest charakterystyczną powierzchnią, pojawiającą się w ECM w przypadku użycia do jej kształtowania płaskiej katody. W wielu przypadkach trudność spowodowaną brakiem odwzorowa-



Rys. 5.1. Wpływ ruchu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej na odwzorowanie cech geometrycznych katody w ECM: a – powstawanie odchyłki δ , b – korekcja elektrody o wartość δ , c – odwzorowanie za pomocą ECMc

nia cech geometrycznych katody, związaną z ruchem elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej, pokonuje się przez nadanie katodzie takich pierwotnych cech geometrycznych w kierunku przepływającego elektrolitu, które zapewnią, pomimo istniejących zmian przewodności κ elektrolitu, pożądane cechy geometryczne kształtowanej powierzchni (rys. 5.1b) [4, 68, 98, 99].

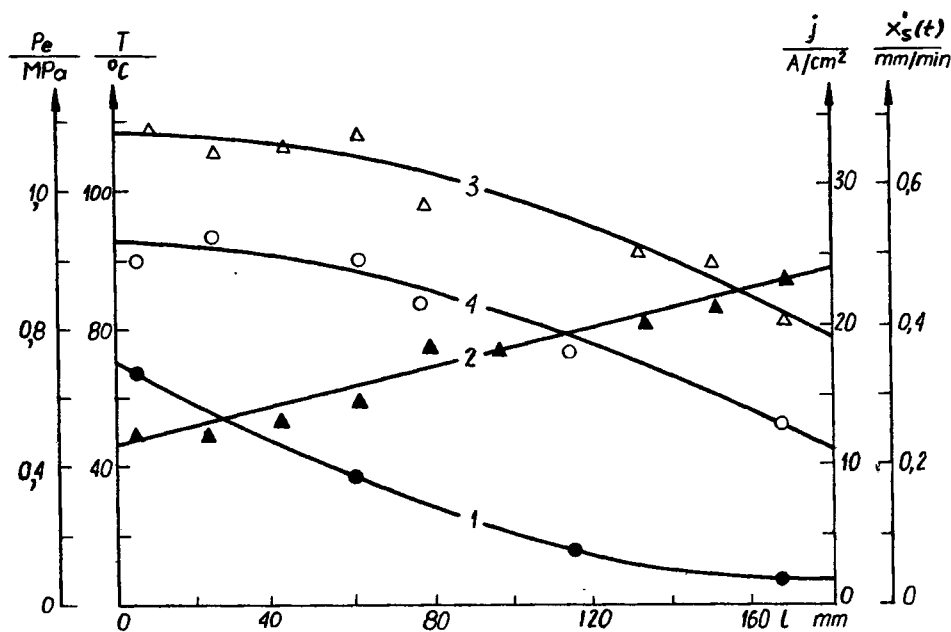
Zmianę przewodności κ przepływającego elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej można ustalić empirycznie (rys. 5.2) [np. 66] lub wyznaczyć analitycznie. W większości prac dotyczących ECM przyjmuje się, że przewodność κ elektrolitu zależy głównie od jego temperatury oraz koncentracji objętościowej C_H wydzielającego się gazu (wodoru). Przewodność κ wyraża się zależnością [4, 68, 80, 97]:

$$\kappa = \kappa_e(1 + \omega \cdot \Delta T)(1 - C_H)^{1,5}, \quad (5.3)$$

gdzie: κ_e – przewodność elektrolitu na wlocie do szczeliny międzyelektrodowej,
 ΔT – przyrost temperatury elektrolitu,
 ω – temperaturowy współczynnik przewodnictwa elektrycznego,
 C_H – koncentracja objętościowa gazu (wodoru).

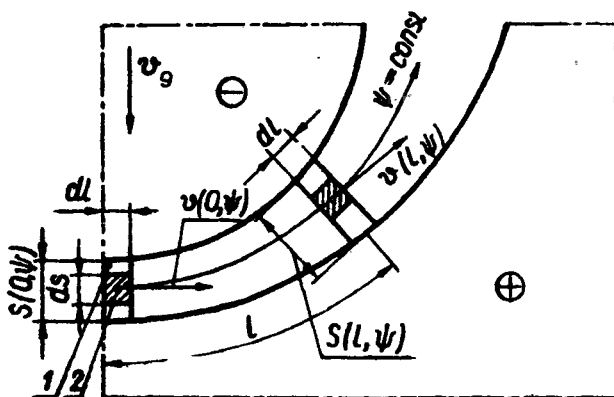
Zależność (5.3), z uwagi na złożoność omawianego procesu, analizuje się najczęściej w stanie ustalonym ECM, przy następujących założeniach upraszczających [99]:

- temperatura, koncentracja produktów reakcji elektrodowych, właściwości fizyczne elektrolitu oraz prędkość jego przepływu są stałe w przekroju poprzecznym szczeliny i równe odpowiednim wartościom średnim, co równoznaczne jest z przyjęciem jednowymiarowego (w kierunku przepływu elektrolitu) modelu obliczeń,



Rys. 5.2. Zmiany w szczeliny międzyelektrodowej ECM wywołane przepływającym elektrolitem: gęstości prądu (3), prędkości rozwarzania (4), temperatury (2), ciśnienia (1) [66]

- transport ciepła i masy odbywa się tylko na drodze dyfuzji i konwekcji,
- pomija się ciepło wydzielające się na skutek reakcji chemicznych, tarcia wewnętrznego w przepływającym elektrolicie oraz ciepło odprowadzane przez elektrody,
- znany jest rozkład średniej prędkości i ciśnienia statycznego elektrolitu w szczeliny międzyelektrodowej wzdłuż linii prądu ψ przepływu elektrolitu (rys. 5.3),



Rys. 5.3. Elementarna struga elektrolitu wyznaczona przez linię prądu przepływu elektrolitu $\psi = \text{const}$: 1 - elementarna objętość elektrolitu, 2 - element elektrolitu [99]

- elektrolit jest elektrycznie obojętny,
 - pole elektryczne w szczelinie międzyelektrodowej jest bezźródłowe; rozkład potencjału pola elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej jest liniowy.
- W świetle powyższego, zależność (5.3) można zapisać:

$$\kappa = \kappa_e \{1 + \omega [T(l, \psi) - T_e]\} [1 - C_H(l, \psi)]^{1,5}, \quad (5.4)$$

gdzie: T_e – temperatura elektrolitu na wlocie do szczeliny międzyelektrodowej.

Rozkład temperatury, ustalony z bilansu cieplnego dla elementu elektrolitu poruszającego się ze średnią prędkością wzdłuż linii prądu, przyjmie postać [99]:

$$T(l, \psi) = T_e + \int_0^l \frac{\kappa(l, \psi) \cdot U^2(l, \psi)}{v_c(l, \psi) \cdot s^2(l, \psi) \cdot c(l, \psi) \cdot \rho_c(l, \psi)} \cdot dl, \quad (5.5)$$

gdzie: U – napięcie międzyelektrodowe,

v_c – prędkość przepływu elektrolitu,

s – grubość szczeliny,

c – ciepło właściwe elektrolitu,

ρ_c – gęstość mieszaniny: elektrolit + produkty reakcji elektrodowych.

Rozkład koncentracji objętościowej C_H wydzielającego się gazu (wodoru) ustalono z prawa zachowania masy. Zakładając, że gaz jest doskonały w sensie termodynamicznym oraz uwzględniając warunki brzegowe na wlocie do szczeliny, zależność na koncentrację gazu w przekroju o współrzędnej l (rys. 5.3) można napisać:

$$C_H(l, \psi) = k_H \cdot R_H \int_0^l \frac{\eta_H(l, \psi) \cdot U(l, \psi) \cdot T(l, \psi) \cdot \kappa(l, \psi)}{p_e(l, \psi) \cdot s^2(l, \psi) \cdot v_c(l, \psi)} \cdot dl, \quad (5.6)$$

gdzie: k_H – masowy równoważnik elektrochemiczny gazu,

R_H – stała gazowa,

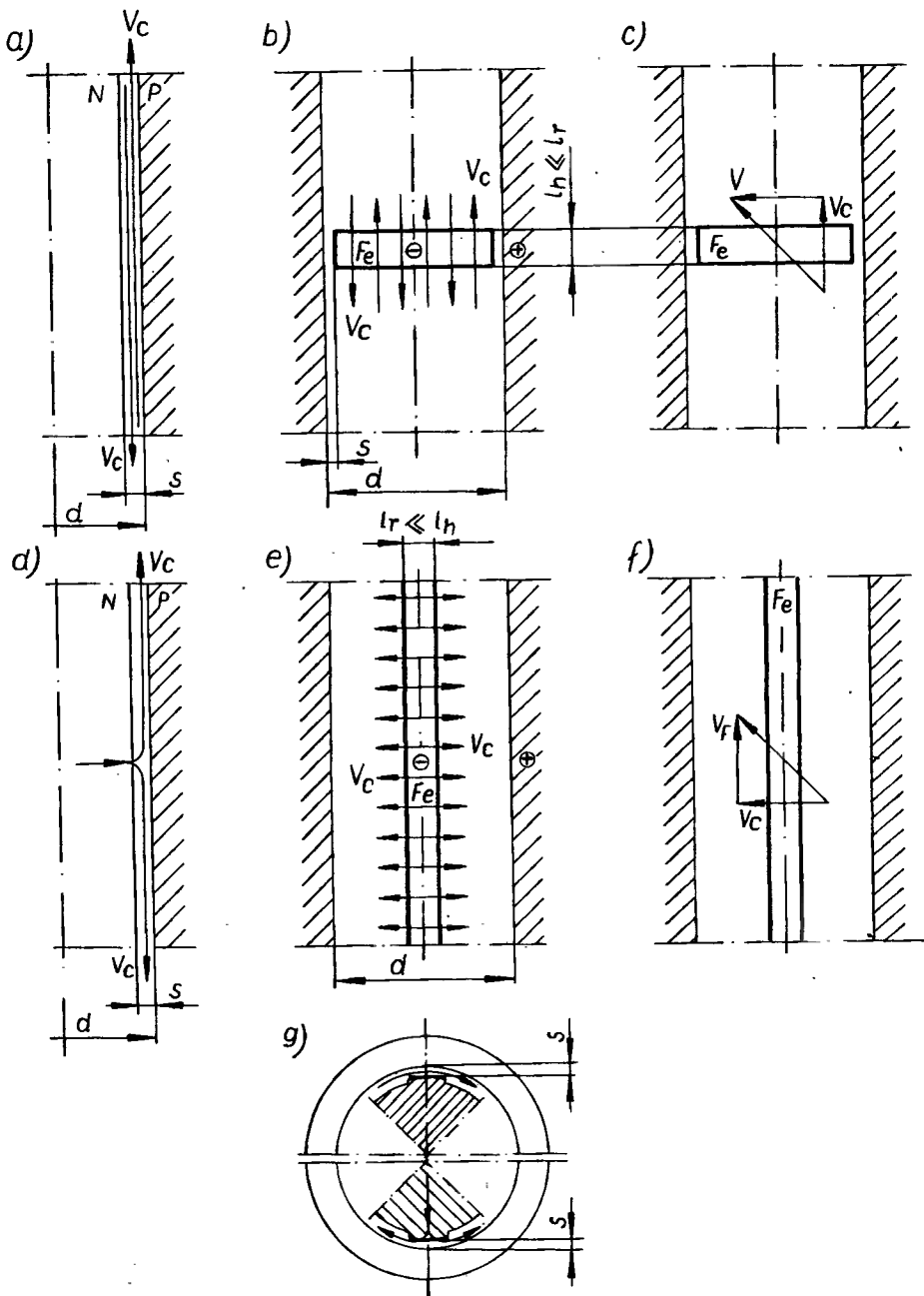
η_H – sprawność reakcji wydzielania gazu,

p_e – ciśnienie elektrolitu.

Podstawiając zależność (5.5) i (5.6) do wzoru (5.4) otrzymuje się wzór na przewodność κ elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej w postaci:

$$\kappa(l, \psi) = \kappa_e \left[1 + \omega \int_0^l \frac{\kappa(l, \psi) \cdot U^2(l, \psi)}{v_c(l, \psi) \cdot s^2(l, \psi) \cdot c(l, \psi) \cdot \rho_c(l, \psi)} \cdot dl \right] \cdot \left[1 - k_H \cdot R_H \int_0^l \frac{\eta_H(l, \psi) \cdot U(l, \psi) \cdot T(l, \psi) \cdot \kappa(l, \psi)}{p_e(l, \psi) \cdot s^2(l, \psi) \cdot v_c(l, \psi)} \cdot dl \right]^{1,5}. \quad (5.7)$$

Z zależności (5.4), (5.5), (5.6) i (5.7) wynika, że brak odwzorowania katody w ECM można częściowo zmniejszyć przez ujednorodnienie koncentracji gazu (wodoru) w szczelinie za pomocą: nagazowywania elektrolitu, minimalizacji wydzielania się gazu przez obróbkę przy podwyższonym ciśnieniu lub stosowania elektrolitów gazujących



Rys. 5.4. Wpływ sposobu doprowadzenia elektrolitu do strefy obróbki w ECH na wybór postaci katody ze względu na zależność (5.8): a – elektrolit doprowadzony do przedmiotu, b – katoda o postaci pierścienia, c – wpływ \bar{v} na długość l przepływu elektrolitu, d – elektrolit doprowadzony do strefy obróbki przez narzędzie z wypływem podłużnym, e – katoda o postaci wydłużonego prostokąta, f – wpływ \bar{v} na długość l przepływu elektrolitu, g – jednostronny i dwustronny wypływ poprzeczny elektrolitu

słabo [80]. Szersze zastosowanie w ECM elektrolitów nie gazujących (bezwodnych) powinno wartość odchyłki δ poważnie zmniejszyć.

Ruch elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej powoduje także przemieszczanie się w kierunku jego przepływu produktów erozji, najczęściej nieprzewodzących energii elektrycznej. zmiany ciśnienia elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej jak również zmiany jego temperatury wywołane dyfuzją i konwekcją ciepła (problem unoszenia ciepła na skutek przepływu prądu elektrycznego autor omówił w pracach [5, 11, 22, 24, 25]). Dopiero całkowite wyeliminowanie ruchu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej pozwala uzyskać stałą wartość jego przewodności w szczelinie, a tym samym poprawne odwzorowanie cech geometrycznych katody w kształtowanej powierzchni anody. Prowadzi to w sposób naturalny do elektrochemicznej obróbki impulsowej (ECMc) (rys. 5.1c). Innym rozwiązaniem (częściowym) może być przyjęcie ruchu elektrolitu ze stałą prędkością v_c oraz dyskretnego przepływu E_e [70]. Szybki rozwój ECMc w ostatnim okresie czasu jest dowodem świadomego omijania złożonych problemów hydrodynamicznych, związanych z ruchem elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej.

Wpływ ruchu elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej na powstawanie odchyłki δ można znacznie zmniejszyć przez właściwy wybór kierunku ruchu elektrolitu. Z zależności (5.7) oraz z rys. 5.2 wynika, że im droga l przepływu elektrolitu jest krótsza, tym odchyłka δ jest mniejsza. Można to zapisać zależnością:

$$\text{jeżeli } l \rightarrow 0 \text{ to } \delta \rightarrow 0. \quad (5.8)$$

Z zależności (5.8) wynika bardzo istotny wniosek dla ECH, polegający na wyborze takiego kierunku przepływu elektrolitu oraz na takim ukształtowaniu katody, aby jej długość w kierunku przepływu elektrolitu była możliwie mała [23, 111]. Można to uzyskać zarówno przez doprowadzenie elektrolitu do obrabianego przedmiotu (rys. 5.4a ÷ c), jak i do narzędzia (rys. 5.4d ÷ f). W przypadku doprowadzenia elektrolitu do katody, można wyróżnić trzy sposoby jego wypływu, które najogólniej można podzielić na: podłużny (rys. 5.4d), poprzeczny (rys. 5.4e) oraz poprzeczno-podłużny, będący kombinacją obu. Wypływ poprzeczny elektrolitu można jeszcze podzielić na jednostronny lub dwustronny (rys. 5.4g).

W pokazanych na rys. 5.4 katodach ich powierzchnie można wyznaczyć z zależności:

$$F_e = l_h \pi (d - 2s), \quad (5.9)$$

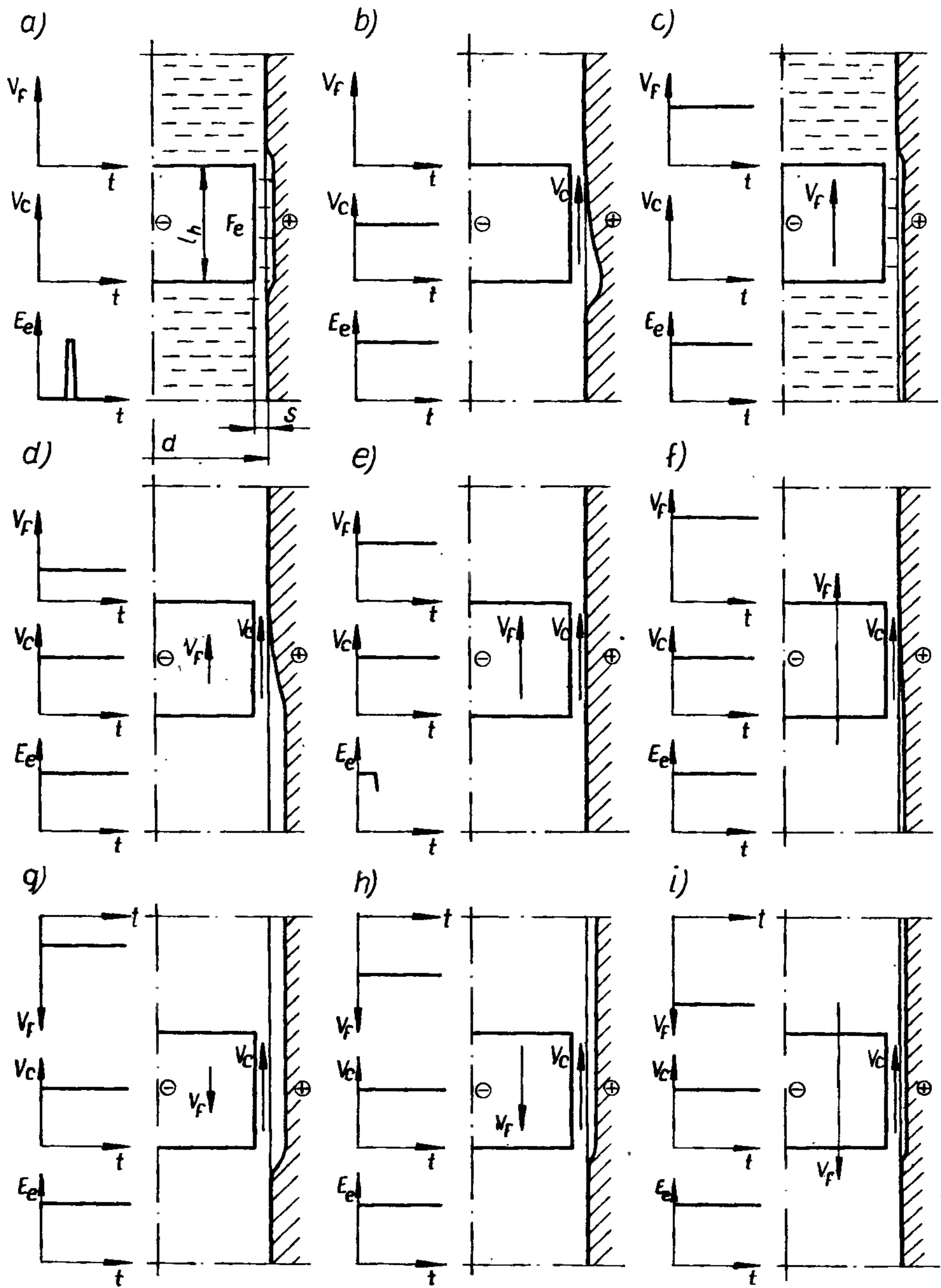
$$F_e = z l_r l_n, \quad (5.10)$$

gdzie: l_h – długość drogi przepływającego elektrolitu w przypadku HJW oraz doprowadzenia elektrolitu do obrabianego przedmiotu (rys. 5.4b),

l_r – długość drogi przepływającego elektrolitu w przypadku HJP oraz doprowadzenia elektrolitu do katody (rys. 5.4e).

Długość drogi l_h lub l_r przepływającego elektrolitu ulega wydłużeniu podczas honowania dwukierunkowego na skutek wprowadzenia prędkości \bar{v} (rys. 5.4c) lub \bar{v}_f (rys. 5.4f) [85].

Rozpatrując nierówność (5.2), typową dla ECH, a szczególnie podczas obróbki otworów, gdzie $l/d \gg 1,5$, niezbędny okazuje się ruch katody z prędkością \bar{v}_f . Ruch



Rys. 5.5. Wpływ prędkości \bar{v}_f katody oraz prędkości \bar{v}_c elektrolitu na kształtowanie powierzchni o postaci walca obrotowego za pomocą katody o postaci walca obrotowego ($l_k \ll l_r$): a) $\bar{v}_f = 0, \bar{v}_c = 0$; b) $\bar{v}_f = 0, \bar{v}_c > 0$; c) $\bar{v}_f > 0, \bar{v}_c = 0$; (d ÷ f) $\bar{v}_f > 0, \bar{v}_c > 0$, zasilanie współbieżne; (g ÷ i) $\bar{v}_f > 0, \bar{v}_c > 0$, zasilanie przeciwbieżne

katody w kierunku normalnym do obranej powierzchni z prędkością \bar{v}_g (rys. 5.1) lub jego brak jest przedmiotem rozważań w rozdziale III.7. Wpływ czasu oddziaływania katody na obrabianą powierzchnię, związany z prędkością \bar{v}_f jest rozważany w rozdziale III.6.

Prędkość katody \bar{v}_f oraz elektrolitu \bar{v}_c względem kształtowanej powierzchni może przyjmować następujące wartości (rys. 5.5):

$$\bar{v}_f = 0, \bar{v}_c = 0, \quad (5.11)$$

$$\bar{v}_f = 0, \bar{v}_c \neq 0, \quad (5.12)$$

$$\bar{v}_f \neq 0, \bar{v}_c = 0, \quad (5.13)$$

$$\bar{v}_f \neq 0, \bar{v}_c \neq 0. \quad (5.14)$$

Przypadek określony zależnością (5.11) jest typowy dla ECMc i dalej, z racji stosowanej w ECH kinematyki, nie będzie rozpatrywany (rys. 5.5a). Możliwość wyrażona zależnością (5.12) jest typowa dla ECM i jest już wcześniej omówiona (rys. 5.5b). Zależność (5.13) umożliwia ECM, a także ECH, przy założeniu, że $\bar{v}_f = \text{const}$, a pozostałe parametry obróbki są tak dobrane, iż umożliwią zachodzenie reakcji elektrodowych (rys. 5.5c). Zastosowanie w tym przypadku ECMc jest możliwe, ale może prowadzić do nierównomiernego roztwarzania obrabianej powierzchni na skutek niekontrolowanego, rozplywu produktów reakcji elektrodowych. Przypadek określony zależnością (5.14) należy rozpatrywać z uwzględnieniem zwrotów \bar{v}_f i \bar{v}_c , które mogą być współbieżne (rys. 5.5d ÷ f) lub przeciwbieżne (rys. 5.5g ÷ i). W obu możliwościach może mieć miejsce:

$$\bar{v}_f < \bar{v}_c, \quad (5.15)$$

$$\bar{v}_f = \bar{v}_c, \quad (5.16)$$

$$\bar{v}_f > \bar{v}_c. \quad (5.17)$$

Szpecólnie niekorzystna może okazać się zależność (5.16) dla współbieżnych prędkości \bar{v}_f i \bar{v}_c , gdyż przypadek ten może prowadzić do powstawania „korków gazowych”, przerywających proces ECH (rys. 5.5e). Podobne rozważania można przeprowadzić także dla ECH z elektrolitem doprowadzonym do katody i jego wpływem poprzecznym jednostronnym lub dwustronnym. Wpływ poprzeczny dwustronny oraz prędkość obwodowa \bar{v} katody czynią obróbkę jednostronnie przeciwbieżną i jednostronnie współbieżną.

Konieczność stosowania w ECH prędkości \bar{v}_f i \bar{v} (rys. 3.1, 3.2) uwalnia autora od szerszego omawiania zjawisk hydrodynamicznych występujących w szczeliny międzyelektrodowej i ustalania ich wpływu na powstawanie odchyłki kształtu δ . Zakładając jednostajność \bar{v}_f i \bar{v} oraz stałość pozostałych parametrów wejściowych procesu, oczywistym wydaje się fakt równomiernego oddziaływania zjawisk międzyelektrodowych na całą kształtowaną powierzchnię. Zjawiska hydrodynamiczne decydować mogą tutaj jedynie o wydajności obróbki.

6. WPŁYW CZASU ODDZIAŁYWANIA KATODY NA PRZYROST ŚREDNICY KSZTAŁTOWANEGO OTWORU

Jak wynika z prawa Faradaya masę m substancji ulegającej redukcji można przedstawić w przypadku ogólnym jako:

$$m = k_1 \int_0^t i \cdot dt, \quad (6.1)$$

lub, gdy jest zachowana stała wartość natężenia prądu elektrycznego $i = I$, w postaci:

$$m = k_1 I t, \quad (6.2)$$

gdzie: m – masa substancji ulegająca redukcji,
 k_1 – współczynnik, zwany równoważnikiem elektrochemicznym,
 i – natężenie prądu elektrycznego,
 t – czas.

Przedstawiając stałą wartość natężenia prądu I jako:

$$I = j F_e, \quad (6.3)$$

gdzie: j – gęstość jednostkowa prądu elektrycznego,
 F_e – pole powierzchni katody,
zależność (6.2) przyjmuje postać:

$$m = k_1 j F_e t. \quad (6.4)$$

W dalszych rozważaniach przyjęto stałą gęstość jednostkową prądu elektrycznego j , wynikającą ze znanych zależności prawa Ohma (rys. 6.1):

$$I = \frac{U}{R}, \quad (6.5)$$

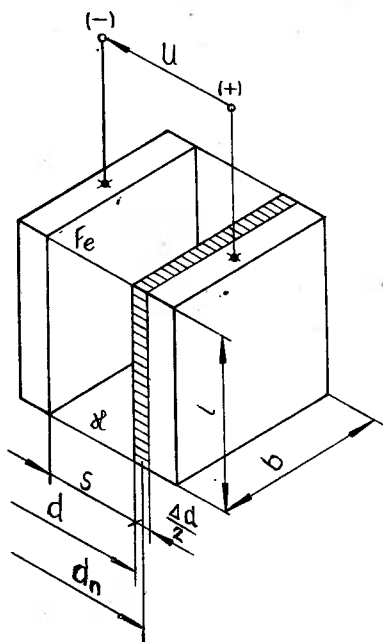
$$R = \frac{s}{\varrho F_e}, \quad (6.6)$$

gdzie: U – napięcie,
 R – rezystancja,
 ϱ – rezystancja właściwa,
 s – długość obwodu elektrycznego, w tym przypadku grubość szczeliny międzyelektrodowej.

Analizując rys. 6.1 można wykazać, że w przypadku obróbki otworów o postaci walca obrotowego:

$$m = \frac{\pi d_n \cdot \Delta d \cdot l c}{2g}, \quad (6.7)$$

gdzie: d_n – średnia średnica obrabianego otworu,
 Δd – przyrost średnicy,
 c – ciężar właściwy,
 g – przyspieszenie ziemskie,



Rys. 6.1. Interpretacja geometryczna zależności (6.9)

zaś pole powierzchni katody jest:

$$F_e = bl. \quad (6.8)$$

Z równań (6.4), (6.7) i (6.8) wynika następująca zależność [104]:

$$\Delta d \cdot l = kblt, \quad (6.9)$$

gdzie:

$$k = k_1 \frac{2g}{\pi d_n c} j.$$

Biorąc pod uwagę dowolny pierścień kołowy obrabianego otworu o wysokości dl , na który działa katoda o szerokości b i wysokości dl w czasie $t = t_e$, otrzymuje się:

$$\Delta d \cdot dl = kbt_e \cdot dl, \quad (6.10)$$

gdzie: b – szerokość katody. Wartość ta może być także równa: $b = \pi d$ – dla przypadku katody pierścieniowej, pokazanej na rys. 6.2d.

Po dalszych uproszczeniach (6.10) można ostatecznie napisać:

$$\Delta d = f(b, t_e) \quad (6.11)$$

lub dla $b = \text{const}$

$$\Delta d = f(t_e). \quad (6.12)$$

Analizując (6.11) można zauważyć, że:

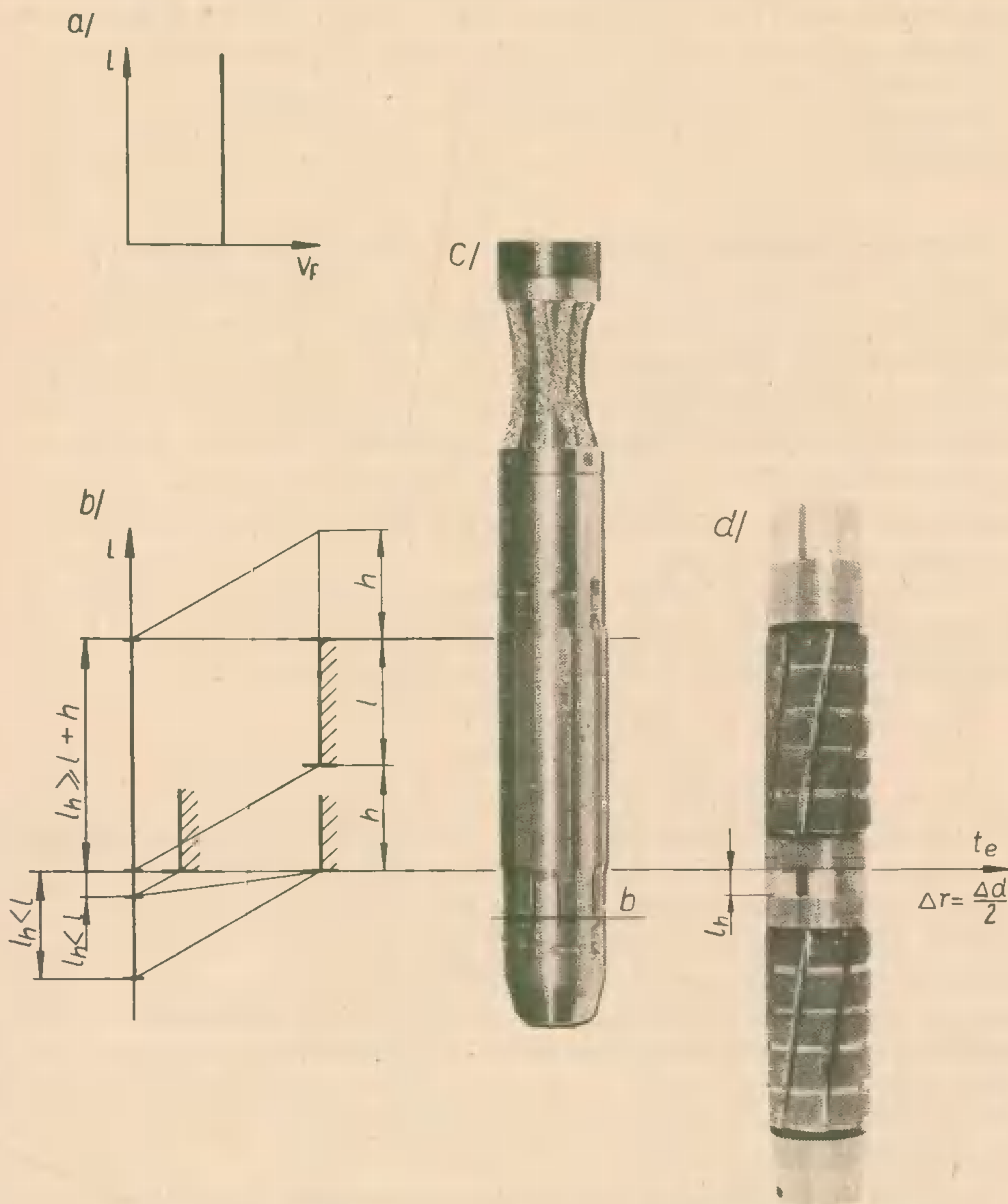
$$\Delta d = \text{const dla } b = \text{const jeżeli } t_e = \text{const}, \quad (6.13)$$

$$\Delta d \neq \text{const dla } b = \text{const jeżeli } t_e \neq \text{const}, \quad (6.14)$$

$$\Delta d = \text{const dla } b \neq \text{const jeżeli } t_e \neq \text{const}. \quad (6.15)$$

W przypadku obróbki otworów o postaci walca obrotowego przyrost średnicy Δd obrabianego otworu powinien być stały. Spełnienie tego warunku jest możliwe w przypadku zależności (6.13) i (6.15).

Z wyrażenia (6.13) wynika, że w przypadku stałej szerokości b katody, dla zachowania stałego przyrostu średnicy Δd obrabianego otworu, czas t_e oddziaływania katody powinien być stały. Przedstawiając czas t_e oddziaływania katody jako (rys. 6.2):



Rys. 6.2. Stały czas t_e oddziaływania katody i możliwości jego praktycznej realizacji: a – przebieg $v_f = f(l)$, b – czas t_e oddziaływania katody lub przyrost średnicy Δd obrabianego otworu, (c, d) – narzędzia konstrukcji autora [27, 39], umożliwiające realizację stałego czasu t_e oddziaływania katody

$$t_e = \frac{l_h}{v_f}, \quad (6.16)$$

gdzie: l_h – długość katody lub długość przesuwu katody,
 v_f – prędkość katody,

można zauważyć, że $t_e = \text{const}$ dla $l_h = \text{const}$, jeżeli na każdą elementarną długość dl obrabianego otworu będzie oddziaływała stała długość katody dl_h , co jest możliwe jeżeli $v_f = \text{const}$ na całej długości l obrabianego otworu (rys. 6.2a). Rys. 6.2b przedstawia stałe przyrosty Δd średnicy obrabianego otworu, odpowiadające stałemu czasowi t_e oddziaływania katody, możliwe do uzyskania za pomocą narzędzi pokazanych na rys. 6.2c i 2d [27, 39].

Narzędzie pokazane na rys. 6.2c posiada prostokątne elektrody o wymiarach $b \times l_h$, umożliwiające uzyskanie stałego czasu t_e oddziaływania katody w przypadku, gdy

$$l_h \geq l + h. \quad (6.17)$$

Narzędzie pokazane na rys. 6.2d posiada katodę pierścieniową o wymiarach $\pi d \times l_h$, opuszczającą kształtowany otwór w chwilach nawrotu (\bar{v}_f) narzędzia ($h \geq l + l_h$). Zilustrowane na rys. 6.2b różne wartości Δd obrabianych otworów wynikają z obranych wartości \bar{v}_f i l_h . W przypadku przyjęcia dla narzędzia pokazanego na rys. 6.2c skoku katody h , odpowiadającego l_h narzędzia z rys. 6.2d, oraz zastosowaniu stałych i równych w obu przypadkach wartości v_f , przyrost średnicy Δd obrabianego otworu będzie w obu przypadkach jednakowy. Wartość Δd dla obu pokazanych na rys. 6.2c ÷ d narzędzi może być także równa, pomimo różnych h oraz l_h , jeżeli przyjęte prędkości v_f będą w obu przypadkach różne.

Jeżeli dla katody $b = \text{const}$ czas oddziaływania katody $t_e \neq \text{const}$, wówczas, jak to wynika z zależności (6.14), $\Delta d \neq \text{const}$. Prowadzi to do powstania stożków na końcach obrabianego otworu (rys. 6.3b), pomimo przyjętej $v_f = \text{const}$ (rys. 6.3a).

Długości stożków l_s wynikają z zależności:

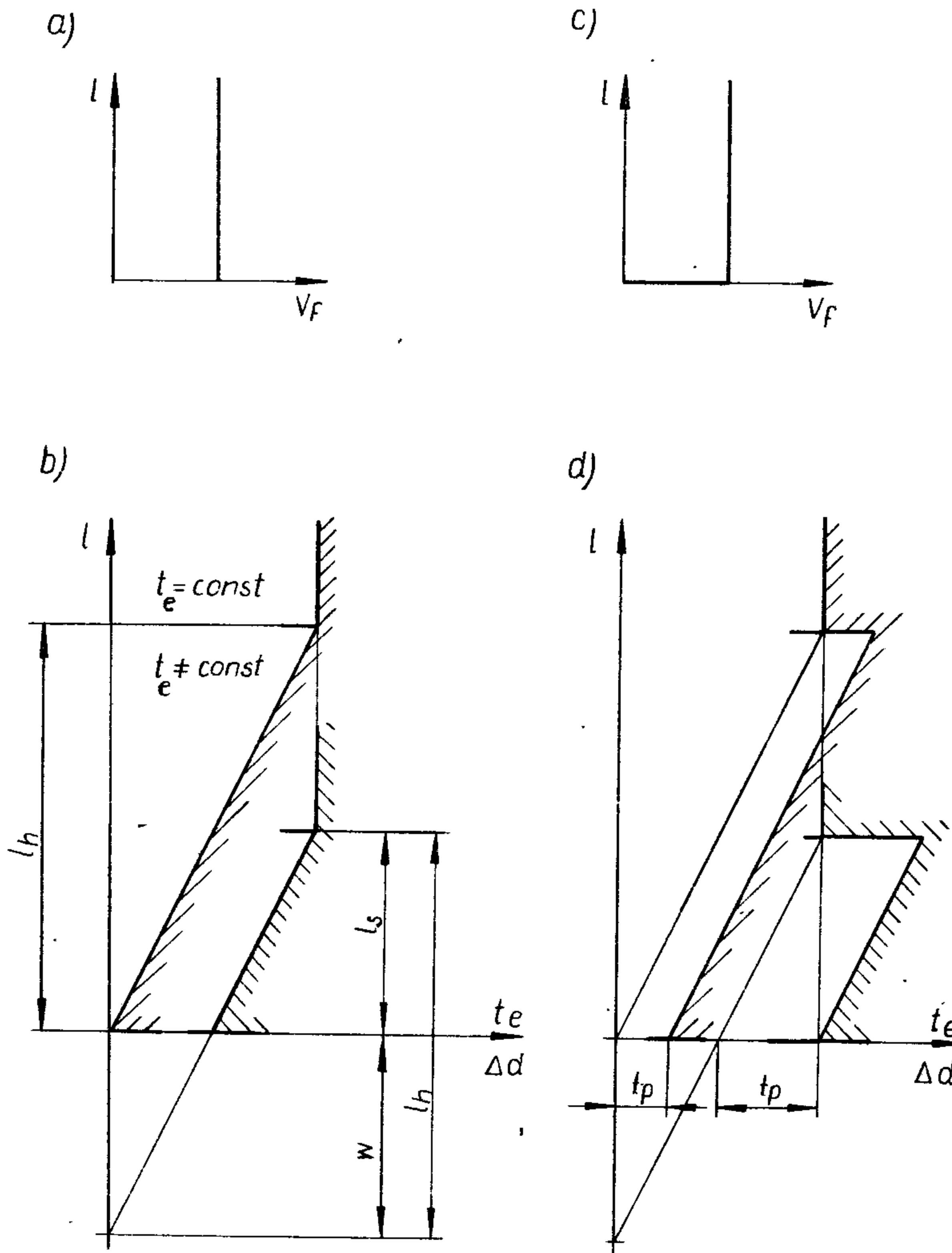
$$l_s = l_h - w, \quad (6.18)$$

gdzie: w – wybieg narzędzia.

Jak wynika z rys. 6.3b, najmniejsze średnice stożków będą przy czołach otworów ($\Delta d = 0$ dla $w = 0$). Wymiar tych średnic będzie wzrastał, jeżeli w będzie wzrastało.

Czas t_e oddziaływania katody ma istotny wpływ na ostateczną postać honowanego otworu. Przyjmując (dla narzędzia pokazanego na rys. 6.2c): $l_h = 100$ mm, $v_f = 0,1$ m/s; wówczas $t_e = 1$ s. Użycie tego narzędzia do ECH otworów, gdzie $l_h \ll l$ oraz $w = 0$, prowadzi do znacznych ich deformacji. Jak wykazały doświadczenia ECH z narzędziem z rys. 6.2d, dla warunków omówionych w rozdziale IV.3 (rys. 3.3d), średnicę honowanego otworu ($d = 50$ mm, $l = 100$ mm) w czasie $t_e = 1$ s przyrasta o wartość $\Delta d = 1,6$ μm . Wynika to z przyjęcia $\Delta m = 6,02$ g (dla $i = 500$ A, $t = 60$ s, $p = 1,6$ MPa oraz masy właściwej $7,5$ g/cm³).

Analizując rys. 6.3 można zauważyć, że najmniejszy wymiar stożka można powiększyć przez powiększenie czasu t_e oddziaływania katody za pomocą wprowadzenia czasu t_p postępu katody (rys. 6.3c). Wówczas sumaryczny czas t_e oddziaływania katody wyniesie:



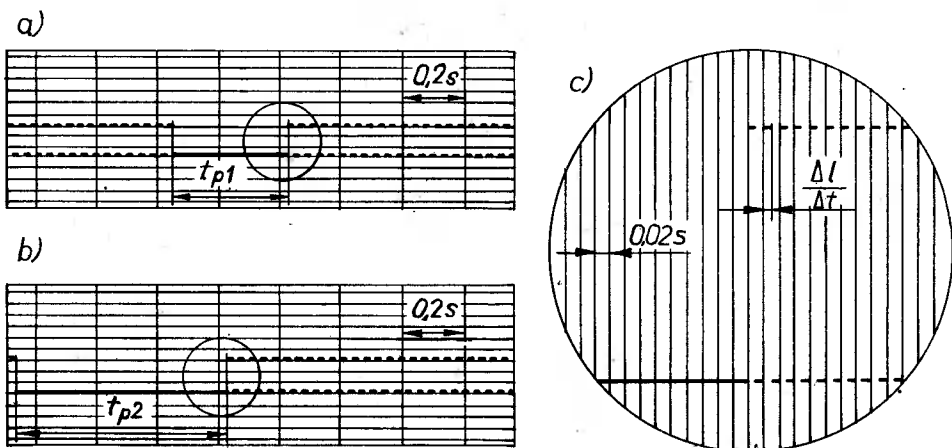
Rys. 6.3. Zmienny czas t_e oddziaływania katody dla $b = \text{const}$: (a, c) – przebieg $v_f = f(l)$, (b, d) – czas t_e oddziaływania katody lub przyrost średnicy Δd obrabianego otworu

$$t_e = \frac{l_h}{v_f} + t_p, \quad (6.19)$$

gdzie: t_p – czas postoju katody,

a odpowiadający temu czasowi przyrost Δd średnicy obrabianego otworu można przedstawić jak na rys. 6.3d.

Wprowadzenie czasu t_p postoju katody można uznać za dopuszczalne, gdyż rzeczywiste układy napędowe w obrabiarkach są zawsze obciążone inercją oraz „luzem w układzie”, wynikającym np. z czasów przesterowania rozdzielaczy hydraulicznych układu napędowego [126], luzów w przegubach łącznika narzędzia itp. Rys. 6.4 przedstawia różne rzeczywiste czasy t_p postoju katody w honownicy EHCA63 [13, 14, 18, 36], których wartość można łatwo regulować.



Rys. 6.4. Przykładowe, sterowane czasy t_p postoju katody w honownicy EHCA63 [13, 14, 18]:
(a, b) $t_{p2} > t_{p1}$, c) $v_f = f(t)$

Na podstawie zależności (6.14) można ostatecznie stwierdzić, że jeżeli $b = \text{const}$, $v_f = \text{const}$, wówczas $\Delta d \neq \text{const}$, gdyż $t_e \neq \text{const}$. Jeżeli jednak, zgodnie z zależnością (6.15), przyrost średnicy obrabianego otworu ma wynosić $\Delta d = \text{const}$, dla $t_e \neq \text{const}$, wówczas szerokość b katody powinna być również zmienna ($b \neq \text{const}$) i ograniczona krzywą $b = f(l)$ (rys. 6.5).

Przyjmując przebieg prędkości katody, jak na rys. 6.5c, można napisać, że [104]:

$$\Delta d_v + \Delta d_p = \Delta d, \quad (6.20)$$

gdzie: Δd_v – przyrost średnicy obrabianego otworu, uzyskany dla stałej prędkości katody $v_f = \text{const}$,

Δd_p – przyrost średnicy obrabianego otworu, uzyskany podczas postoju katody.

Przyrost średnicy Δd_v jest proporcjonalny do sumy częściowych szerokości katody $b = f(l)$ pomnożonej przez cząstkowy czas oddziaływania katody dt (rys. 6.5d), co można zapisać w postaci:

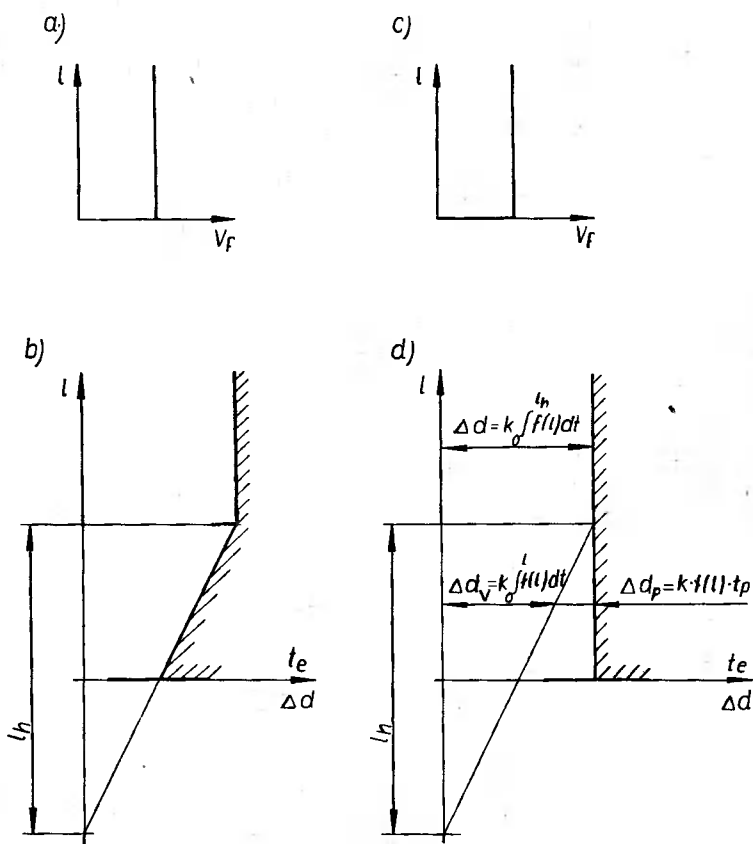
$$\Delta d_v = k \int_0^l f(l) \cdot dt. \quad (6.21)$$

Przyrost średnicy Δd_p jest proporcjonalny do szerokości katody $b = f(l)$ pomnożonej przez czas postoju katody t_p (rys. 6.5d), co można wyrazić zależnością:

$$\Delta d_p = k \cdot f(l) \cdot t_p. \quad (6.22)$$

Przyrost średnicy Δd obrabianego otworu, powstający przy przejściu całej powierzchni katody w środkowym obszarze obrabianego otworu (rys. 6.5d), otrzymuje się z zależności:

$$\Delta d = k \int_0^l f(l) \cdot dt, \quad (6.23)$$



Rys. 6.5. Przyrost średnicy Δd obrabianego otworu: (a, c) – przebieg $v_f = f(l)$, b – zmienny przyrost średnicy Δd dla $b = \text{const}$, d – stały przyrost średnicy Δd dla $b \neq \text{const}$

gdzie: k – współczynnik proporcjonalności,
 l – długość obrabianego otworu,
 l_h – długość katody.

Podstawiając zależności (6.21), (6.22), (6.23) do wyrażenia (6.20) otrzymuje się:

$$k \int_0^l f(l) \cdot dt + k \cdot f(l) \cdot t_p = k \int_0^{l_h} f(l) \cdot dt. \quad (6.24)$$

Przedstawiając różniczkę czasu dt jako:

$$dt = \frac{dl}{v_f} \quad (6.25)$$

i podstawiając do (6.24), ostatecznie po uproszczeniu otrzymuje się:

$$\frac{1}{v_f} \int_0^l f(l) \cdot dl + f(l) \cdot t_p = \frac{1}{v_f} \int_0^{l_h} f(l) \cdot dl. \quad (6.26)$$

Całka $\int_0^l f(l) \cdot dl$ jest znana; odpowiada polu powierzchni F_e przyjmowanej katody.

Zależność (6.26) można więc zapisać w postaci:

$$\frac{1}{v_j} \int_0^l f(l) \cdot dl + f(l) \cdot t_p = \frac{1}{v_j} F_e \quad (6.27)$$

Różniczkując równanie (6.27) względem l otrzymuje się:

$$\frac{1}{v_j} \cdot f(l) + f'(l) \cdot t_p = 0, \quad (6.28)$$

a po przekształceniu:

$$\frac{f'(l)}{f(l)} = -\frac{1}{v_j t_p} \quad (6.29)$$

Całkując wyrażenie (6.29) otrzymuje się:

$$\ln f(l) = -\frac{1}{v_j t_p} \cdot l + C, \quad (6.30)$$

a stąd:

$$f(l) = e^{-\frac{1}{v_j t_p} \cdot l + C}, \quad (6.31)$$

i ostatecznie:

$$f(l) = k_2 \cdot e^{-\frac{1}{v_j t_p} \cdot l}, \quad (6.32)$$

gdzie: $k_2 = e^C$. (6.33)

Stałą całkowania k_2 (6.33) wyznaczyć można z warunku, że dla $l = 0, f = f(0)$:
z wyrażenia (6.27) dla $l = 0$ otrzymuje się

$$f(0) \cdot t_p = \frac{1}{v_j} F_e \quad (6.34)$$

a z wyrażenia (6.32)

$$f(0) = k_2. \quad (6.35)$$

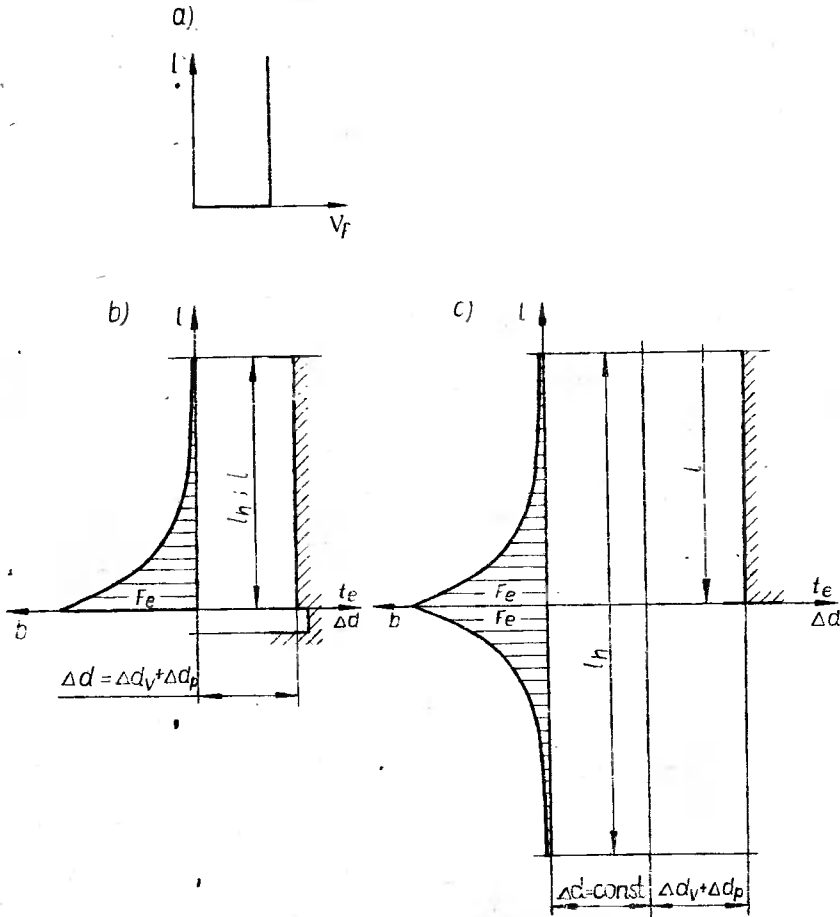
Z (6.34) i (6.35) jest:

$$k_2 = \frac{1}{v_j t_p} F_e \quad (6.36)$$

Podstawiając wyrażenie (6.36) do (6.32) otrzymuje się rozwiązanie równania (6.27)
w postaci:

$$f(l) = \frac{F_e}{v_f t_p} \cdot e^{-\frac{l}{v_f t_p}} \quad (6.37)$$

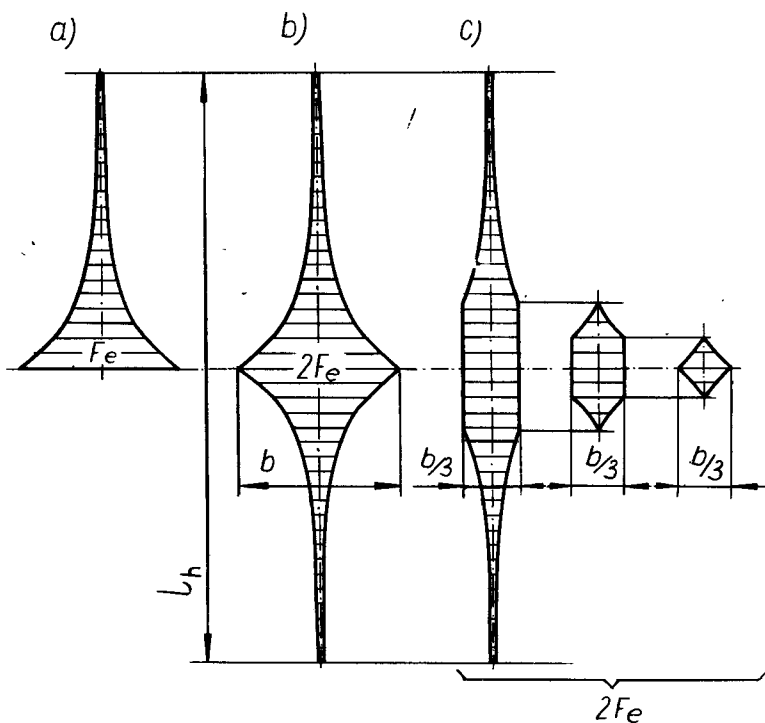
Rysunek 6.6 przedstawia interpretację geometryczną zależności (6.37). Katodę wykreślono w podziale 1:1,5 dla przyjętych wartości: $F_e = 400 \text{ mm}^2$, $v_f = 0,1 \text{ m/s}$, $t_p = 0,15 \text{ s}$. Maksymalna szerokość katody $b_{(l=0)} = 26,66 \text{ mm}$. Szerokość katody $b_{(l=50)} = 0,95 \text{ mm}$.



Rys. 6.6. Stały przyrost średnicy Δd obrabianego otworu uzyskany za pomocą katody o powierzchni $b = f(l)$:
 a – przebieg $v_f = f(l)$, b – postać geometryczna katody umożliwiająca obróbkę otworów nieprzelotowych,
 c – postać geometryczna katody do obróbki otworów przelotowych

Katoda o cechach geometrycznych zakreskowanej powierzchni F_e (rys. 6.6b), ograniczonej $b = f(l)$, umożliwia kształtowanie otworów nieprzelotowych o postaci walca obrotowego, pod warunkiem opuszczania obrabianego otworu. W przypadku kształtowania otworów przelotowych, powierzchnię katody, o cechach geometrycznych wyznaczonych zależnością (6.37), należy uzupełnić oustrzane odbicie w stosunku do jej osi poprzecznej (rys. 6.6c) oraz zapewnić taki sam czas postoju t_p w obu

położeniach nawrotnych katody. Pamiętać przy tym należy, że równanie (6.20) jest ułożone dla jednego przejścia narzędzia, stąd też czas t_p postoju katody należy w obu położeniach nawrotnych podwoić. Pokazany na rys. 6.6c przyrost średnicy Δd składa się z dwóch przyrostów: uzyskanego za pomocą katody ograniczonej zależnością (6.37) oraz stałego, spowodowanego uzupełnioną o lustrzane odbicie powierzchnią F_e katody, wprowadzoną w celu jednakowego ukształtowania obu końców obrabianego otworu. Wartości obu przyrostów są sobie równe. Rys. 6.7a przedstawia powierzchnię katody, wyznaczoną zależnością (6.37), rozłożoną symetrycznie względem osi równoległej do osi obrabianego otworu. Katoda ta jest wykorzystywana do obróbki otworów nieprzelotowych. Rys. 6.7b ilustruje powierzchnię katody wykorzystywaną do obróbki otworów przelotowych, a rys. 6.7c przykład rozłożenia powierzchni F_e katody na kilka elektrod.



Rys. 6.7. Postacie katod spełniające zależność (6.37), umożliwiające uzyskanie stałych przyrostów Δd średnicy obrabianego otworu: a – katoda do obróbki otworów nieprzelotowych, b – katoda do obróbki otworów przelotowych, c – przykład rozłożenia powierzchni katody na kilka elektrod [104]

Zależność (6.37) ustalono na podstawie równania (6.20), z uwzględnieniem czasu t_p postoju katody oraz stałej prędkości $v_f = \text{const}$ (rys. 6.5c), bez uwzględnienia czasu zużywanego na przyspieszenie ruchu katody do stałej wartości prędkości $v_f = \text{const}$. Na to uproszczenie pozwala rzeczywisty obiekt, w którym niezbędny czas potrzebny do uzyskania prędkości $v_f = \text{const}$ jest bardzo mały (rys. 6.4). W przypadku, gdy czas

ten jest jeszcze względnie mały, dodatkowe przyrosty średnicy Δd w pobliżu czół obrabianego otworu można pomniejszyć przez skrócenie czasu t_p . W innych przypadkach, gdy czas potrzebny do przyspieszenia katody jest długi lub prędkość $v_f = f(l)$, wówczas kształt katody należy każdorazowo ustalać stosownie do istniejących warunków.

Podobne efekty jak wyżej (uzyskiwania stałych przyrostów Δd średnicy obrabianego otworu dla $b \neq \text{const}$ oraz $t_p \neq \text{const}$), można uzyskać za pomocą zmian jednostkowych gęstości j prądu elektrycznego, jak to wynika z zależności (6.4). W przypadku przyjęcia: $b = \text{const}$, przebieg v_f jak na rys. 6.5c, szczelinę międzyelektrodową s (rys. 6.1) należy tak ukształtować, aby $j = f(l)$. Można to zapisać w sposób następujący:

$$\Delta d = \text{const} \text{ dla } b = \text{const} \text{ oraz } t_p \neq \text{const} \text{ jeżeli } j = f(l). \quad (6.38)$$

Z wyrażenia (6.38) wynika, że w przypadku $\kappa = \text{const}$ szczelina s powinna być tak ukształtowana, aby gęstość jednostkowa j spełniała zależność:

$$j = f(l), \quad (6.39)$$

czyli:
$$f(l) = \frac{F_{es}}{v_f t_p} \cdot e^{-\frac{1}{v_f t_p} l},$$

gdzie: F_{es} – pole przekroju szczeliny wzdłuż osi obrabianego otworu.

Ukształtowanie szczeliny, pozwalającej spełnić zależność (6.39), wymaga zastosowania ruchomych promieniowo elektrod. Rozwiązanie to wnosi trudności w zapewnieniu równomiernego zasilania elektrolitem strefy obróbki.

7. WPŁYW GRUBOŚCI SZCZELINY MIĘDZYELEKTRODOWEJ ORAZ WŁAŚCIWOŚCI ELEKTROLITU NA PRĘDKOŚĆ ZMNIEJSZANIA ODCHYLEŃ KSZTAŁTU

W procesie ECM elementarną objętość $d\vartheta$ roztworzonego w czasie dt materiału można wyznaczyć z zależności:

$$d\vartheta = \vartheta i \cdot dt, \quad (7.1)$$

gdzie: ϑ – objętość właściwa roztwarzania.

Jeśli z prawa Ohma wyznaczyć:

$$i = \frac{U}{R},$$

gdzie:

$$R = \varrho \frac{x}{F_e},$$

$$\varrho = \frac{1}{\kappa},$$

oraz podstawić do wzoru (7.1), wówczas:

$$d\vartheta = \frac{\vartheta U \kappa F_e}{x} \cdot dt, \quad (7.2)$$

gdzie: κ – przewodność właściwa elektrolitu,

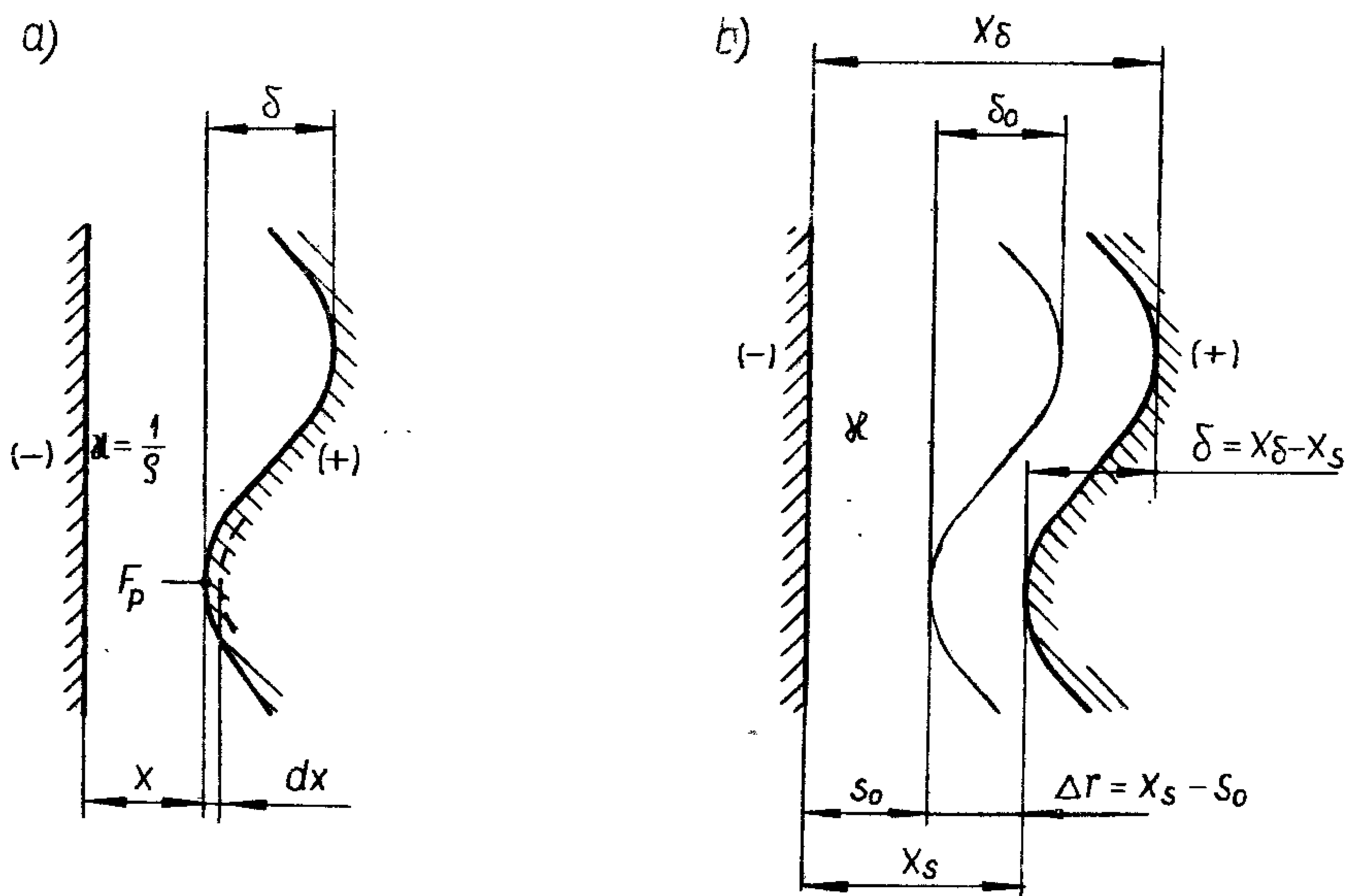
x – odległość między elektrodami,

F_e – pole powierzchni katody.

Elementarną objętość $d\vartheta$ roztworzonego w czasie dt materiału można wyznaczyć za pomocą rys. 7.1a, w postaci:

$$d\vartheta = F_p \cdot dx, \quad (7.3)$$

gdzie: F_p – pole powierzchni obrabianego przedmiotu, która w czasie dt odsuwa się na odległość dx .



Rys. 7.1. Interpretacja geometryczna: a – równania (7.6), b – równania (7.10), (7.11), (7.13) i (7.15)

Przyrównując zależności (7.3) i (7.2) otrzymuje się [67, 104]:

$$F_p \cdot dx = \frac{\vartheta U \kappa F_e}{x} \cdot dt. \quad (7.4)$$

Przyjmując:

$$\frac{F_e}{F_p} = c = 1,$$

$\kappa = \text{const}$, oraz elektrolit o właściwościach pasywujących słabo,

otrzymuje się:

$$dx = \frac{\vartheta U \kappa c}{x} \cdot dt. \quad (7.5)$$

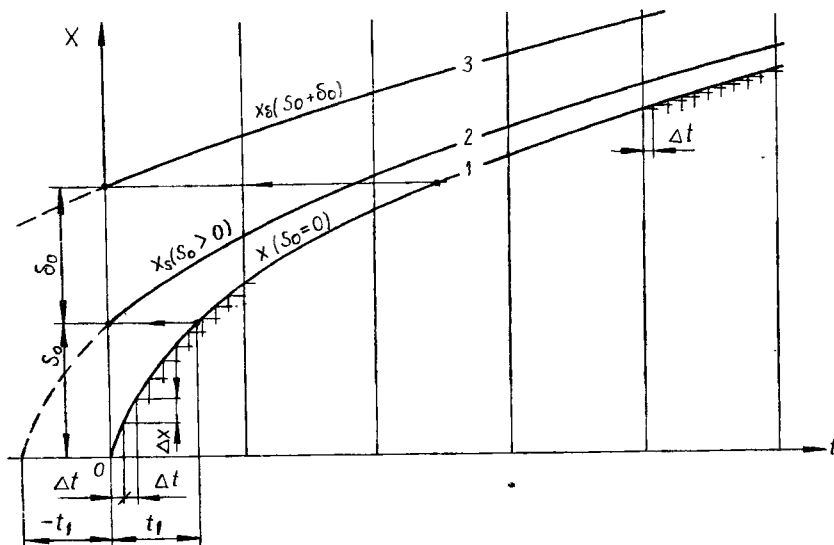
Rozdzielając zmienne oraz całkując zależność (7.5) otrzymuje się:

$$\int x \cdot dx = \int 9Ux \cdot dt, \quad (7.6)$$

$$\frac{x^2}{2} = 9Uxt + C, \quad (7.7)$$

$$x = \sqrt{29Uxt + 2C}. \quad (7.8)$$

Przebieg x (dla $C = 0$) przedstawiono przykładowo za pomocą teoretycznej (nie-realnej) krzywej 1 na rys. 7.2.



Rys. 7.2. Przebieg zmian $x = f(t)$ dla nieruchomej promieniowo katody, elektrolitów pasywnujących słabo oraz różnych grubości s szczeliny: $s_0 = 0$ – krzywa 1, $s_0 > 0$ – krzywa 2, $(s_0 + \delta_0)$ – krzywa 3

Po uwzględnieniu warunku początkowego (rys. 7.1b):

$$\text{dla } t = 0 \quad x = s_0,$$

gdzie: s_0 – grubość szczeliny początkowej,
rozwiązanie równania (7.6) przyjmie postać:

$$\frac{x^2}{2} = 9Uxt + \frac{s_0^2}{2}, \quad (7.9)$$

gdzie:

$$C = \frac{s_0^2}{2}.$$

Przemieszczenie x_s powierzchni obrabianej F_p , względem nieruchomej katody z początkową grubością szczeliny s_0 , można wyrazić:

$$x_s = \sqrt{29Uxt + s_0^2} \quad (7.10)$$

i przedstawić za pomocą krzywej 2 na rys. 7.2. Przemieszczenie x_s , powierzchni obciążonej odchyłką kształtu δ (rys. 7.1) i oddalonej od nieruchomej katody na odległość początkową $(s_0 + \delta_0)$, zgodnie z zależnością (7.10), można wyrazić równaniem:

$$x_s = \sqrt{2\vartheta U \kappa t + (s_0 + \delta_0)^2} \quad (7.11)$$

oraz zilustrować krzywą 3, pokazaną na rys. 7.2. Ponieważ krzywa 1 na rys. 7.2 przedstawia $x = f(t)$ dla $s_0 = 0$, to krzywe 2 i 3 na rys. 7.2, odpowiadające zależnościami (7.10) i (7.11), można uzyskać za pomocą równoległego przesunięcia krzywej 1 względem układu współrzędnych o wartość s_0 lub $(s_0 + \delta_0)$.

Rozpatrując rys. 7.1b można zauważyć, że zmiana promienia obrabianego otworu $\frac{\Delta d}{2} = \Delta r$ jest mniejsza o grubość szczeliny początkowej s_0 , co można wyrazić zależnością:

$$\Delta r = x_s - s_0 \quad (7.12)$$

i dalej:

$$\Delta r = \sqrt{2\vartheta U \kappa t + s_0^2} - s_0 \quad (7.13)$$

Chwilowa odchyłka kształtu $\delta = f(t)$, której wartość w czasie obróbki ulega zmianie, wynika z różnicy:

$$\delta(t) = x_\delta - x_s \quad (7.14)$$

a po uwzględnieniu równań (7.11) i (7.10):

$$\delta(t) = \sqrt{2\vartheta U \kappa t + (s_0 + \delta_0)^2} - \sqrt{2\vartheta U \kappa t + s_0^2} \quad (7.15)$$

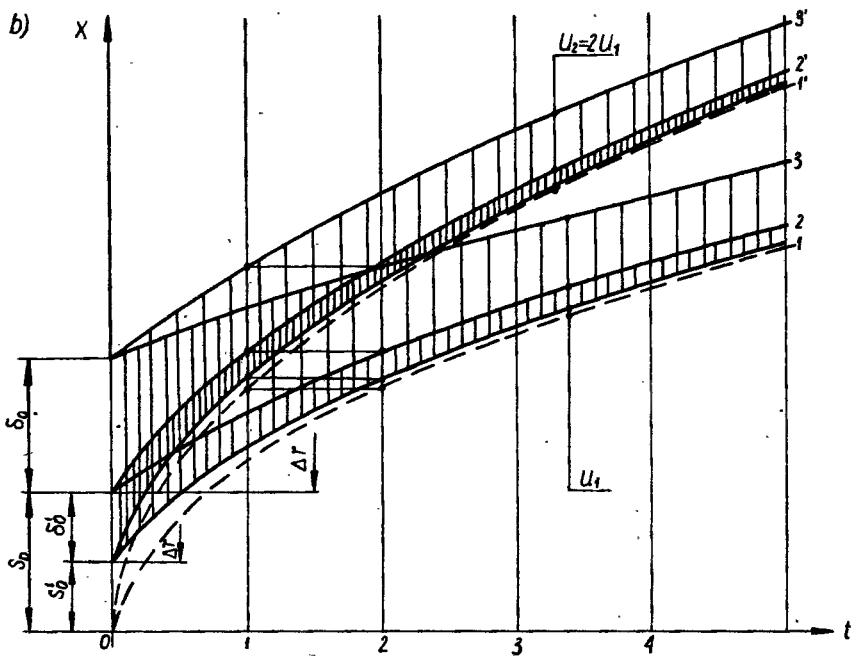
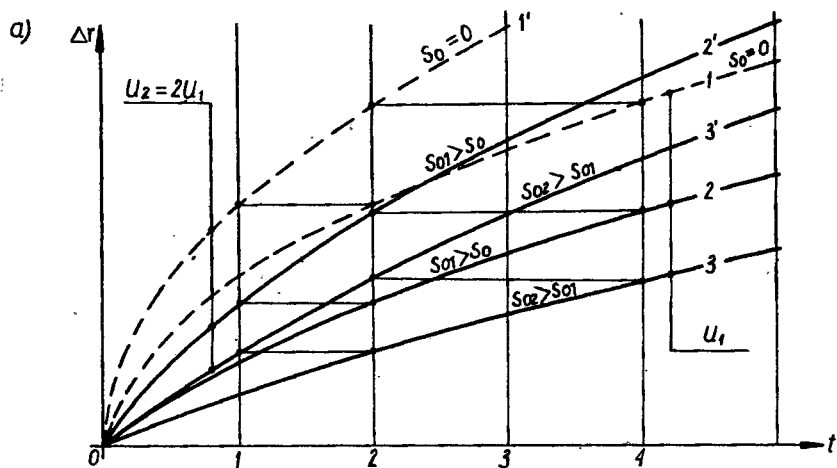
Rysunki 7.3 i 7.4 przedstawiają $\Delta r(t)$, $\delta(t)$ oraz $\delta(\Delta r)$, dla: $U_1, U_2 = 2U_1$, $\kappa = \text{const}$, $\vartheta = \text{const}$, różnych szczelin początkowych s_0 , nieruchomej promieniowo katody oraz elektrolitów pasywujących słabo. Wynika z nich, że:

- prędkość zmian Δr tylko na początku czasu t jest w znacznym stopniu zależna od grubości szczeliny początkowej s_0 i po upływie krótkiego czasu zbliża się do wartości prawie niezależnej od s_0 ,
- przyrost promienia Δr lub zmianę odchyłki kształtu δ można osiągnąć w połowie czasu t przez podwojenie przyłożonego napięcia U , przy założeniu: $\kappa = \text{const}$, $\vartheta = \text{const}$. Wynika to z zależności (7.8, 7.10, 7.11, 7.13, 7.15), na podstawie których można napisać:

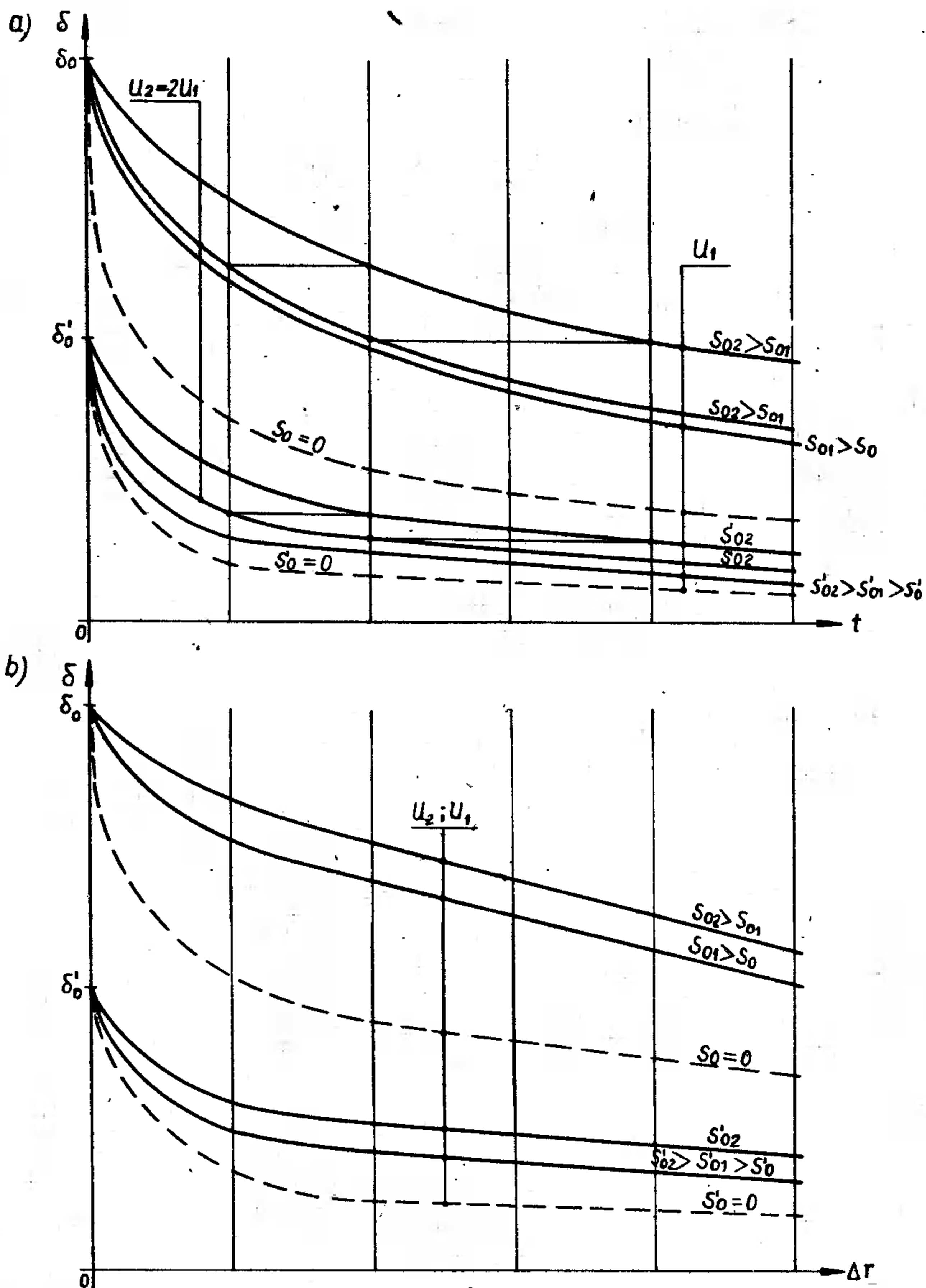
$$\begin{aligned} \Delta r &= f(\vartheta, U, \kappa, t) = \text{const}, \\ \delta &= f(\vartheta, U, \kappa, t) = \text{const}, \end{aligned} \quad (7.16)$$

co oznacza, że zmieniając odpowiednio proporcjonalnie: U , κ lub t , można spełnić zależność (7.16);

- zmniejszanie odchyłki kształtu δ odbywa się tym szybciej, im mniejsza jest grubość szczeliny początkowej s_0 ,
- prędkość zmniejszania odchyłki kształtu δ w zależności od t silnie maleje, ponie-



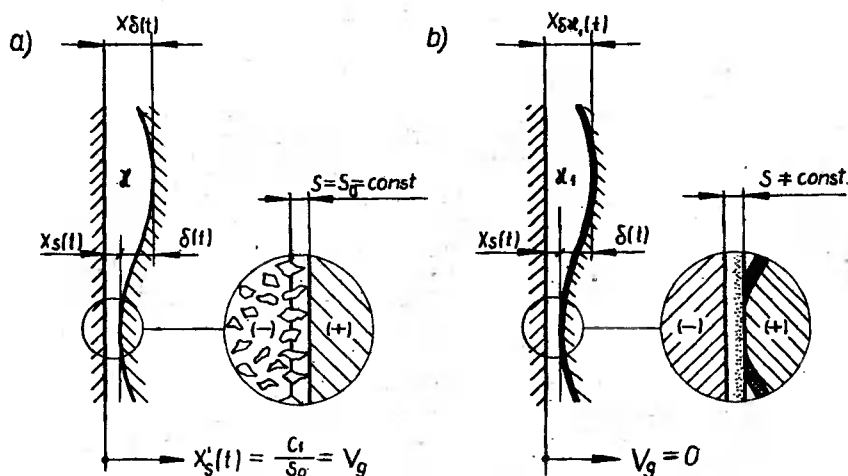
Rys. 7.3. Wpływ grubości szczeliny początkowej s_0 , napięcia U oraz czasu t obróbki, dla nieruchomej promieniowo katody oraz elektrolitów pasywnujących słabo, na: a – przyrost promienia Δr obrabianego otworu, b – zmianę odchyłki kształtu δ



Rys. 7.4. Przebieg zmian odchyłki kształtu $\delta(t)$ (a) oraz $\delta(\Delta r)$ (b) dla nieruchomej promieniowo katody oraz elektrolitów pasywnujących słabo

- waż wraz z postępującym rozwarzaniem iloraz rezystancji elektrycznej pomiędzy częściami powierzchni leżącymi bliżej (x_s) i dalej (x_b) od katody zmniejsza się i dąży do 1,
- wyrównywanie odchyłki kształtu δ w funkcji objętości zdejmowanego materiału (Δr) zależne jest jedynie od grubości szczeliny początkowej s_0 i odchyłki początkowej δ_0 . Powiększenie napięcia U lub przewodności κ , zgodnie z zależnością (7.16), powoduje szybsze wyrównywanie odchyłki δ , jednak wzrasta jednocześnie objętość materiału roztwarzanego;

- dla skutecznego poprawienia odchyłki kształtu δ , zarówno w funkcji czasu t jak również w funkcji Δr , obróbkę należy prowadzić z możliwie małą grubością szczeliny s_0 oraz zachowywać jej wartość w czasie obróbki. Prowadzi to do konieczności stosowania katody ruchomej promieniowo, odpowiednio do przemieszczania powierzchni (x_s), a zatem przyrostu średnicy Δd otworu lub stosowania elektrolitów pasywiających silnie (rys. 7.5a i b).



Rys. 7.5. Sposoby skutecznego poprawiania odchyłki kształtu δ w ECH: a – katoda ruchoma promieniowo i elektrolit pasywiający słabo, b – katoda nieruchoma promieniowo i elektrolit pasywiający silnie

Rozpatrując rys. 7.1, 7.2 oraz zależność (7.5) w postaci:

$$dx = \frac{9U\kappa c}{x} dt,$$

można zauważyć, że prędkość chwilowa $\frac{dx}{dt}$ dowolnego punktu $x(t)$ roztwarzanej powierzchni jest odwrotnie proporcjonalna do chwilowej odległości x pomiędzy obrabianą powierzchnią i katodą, co można zapisać:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{9U\kappa c}{x} \quad (7.17)$$

lub uogólniając:

$$x'(t) = \frac{c_1}{x}, \quad (7.18)$$

gdzie:

$$c_1 = 9U\kappa c. \quad (7.19)$$

Jeżeli katoda będzie w stałej odległości s_0 od najbliższej położonej powierzchni (x_s), wówczas prędkość roztwarzania tej powierzchni będzie:

$$x'_s(t) = \frac{c_1}{s_0} = v_g \quad (7.20)$$

a chwilowe przesunięcie katody $x_c(t)$ wyniesie:

$$x_c = \frac{c_1}{s_0} t. \quad (7.21)$$

Rozpatrując teoretycznie prędkość roztwarzania powierzchni obarczonej odchyłką kształtu $\delta[x'_\delta(t)]$ w stosunku do prędkości $x'_s(t)$, można napisać:

$$x'_\delta(t) > x'_s(t), \quad (7.22)$$

$$x'_\delta(t) = x'_s(t), \quad (7.23)$$

$$x'_\delta(t) < x'_s(t), \quad (7.24)$$

$$x'_\delta(t) = 0. \quad (7.25)$$

Zależność (7.22) jest fizycznie nierealna w przypadku stosowania podczas obróbki powierzchni o odległościach (x_s) i (x_c) tych samych parametrów obróbki (7.19), co wynika z zależności (7.17). Spełnienie zależności (7.23) jest możliwe tylko wtedy, gdy $\delta_0 = 0$. Zależność (7.24) jest do tej pory rozpatrywana (rys. 7.3 i 7.4) przy $x'_s(t) \neq \text{const}$.

Jeżeli przyjąć:

$$x'_s(t) = v_g = \text{const}, \quad (7.26)$$

wówczas prędkość roztwarzania powierzchni (x_δ), o odległości początkowej od katody:

$$x_\delta(t = 0) = s_0 + \delta_0, \quad (7.27)$$

zgodnie z zależnością (7.20), będzie:

$$x'_\delta(t) = \frac{c_1}{x_{(s+\delta)}(t)}, \quad (7.28)$$

gdzie:

$$x_{(s+\delta)}(t) = x_\delta(t) - x_s(t). \quad (7.29)$$

Podstawiając zależność (7.21) do (7.29), a tę ostatnią do (7.28), otrzymuje się:

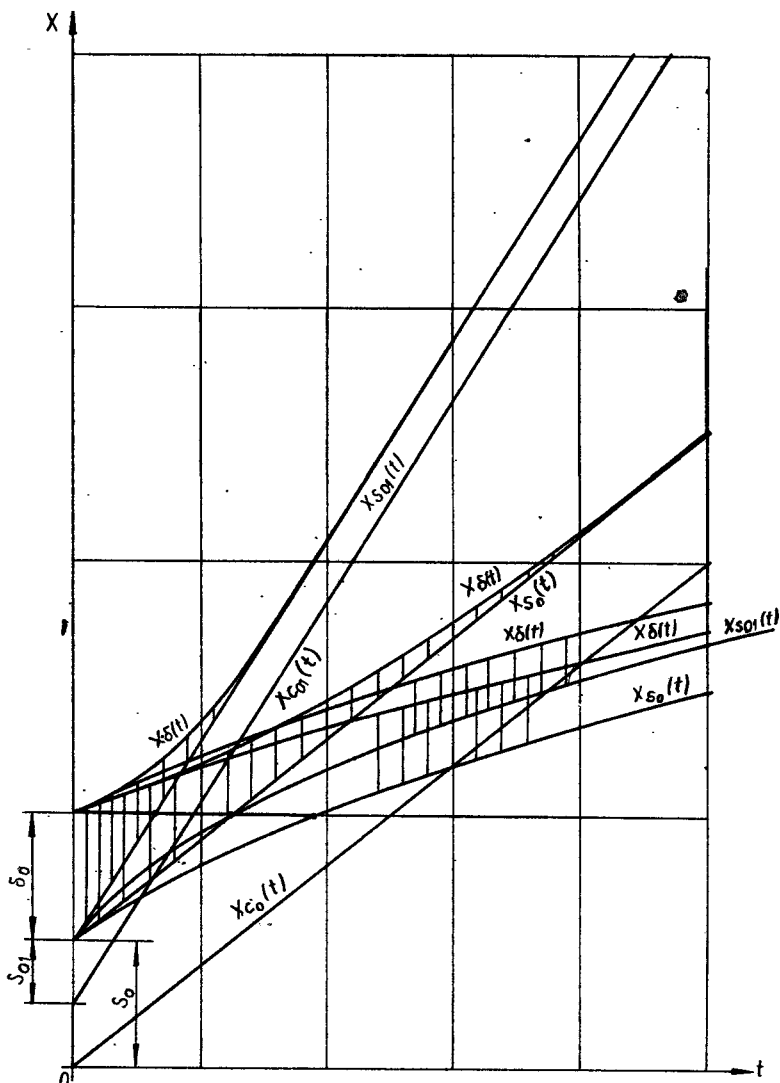
$$x'_\delta(t) = \frac{c_1}{x_\delta(t) - \frac{c_1}{s_0} t}. \quad (7.30)$$

Rozwiązując równanie (7.30) numerycznie:

$$x'_\delta(t) = \frac{c_1}{x_\delta(\Sigma \Delta t) - \frac{c_1}{s_0} (\Sigma \Delta t)}, \quad (7.31)$$

co może odpowiadać ECH z udziałem przewodzących energię elektryczną pilników z nasypem diamentowym (rys. 7.5a) lub wykorzystaniem oddzielnej katody ruchomej promieniowo, utrzymującej stałą odległość s_0 za pomocą dielektryka. Ten ostatni przypadek znacznie komplikuje rozwiązania konstrukcyjne narzędzi.

Dotychczasowe rozważania przeprowadzono dla elektrolitów pasywujących słabo, charakteryzujących się tym, że rozwarzanie odbywa się na całej powierzchni, w tym także na jej częściach obarczonych odchyłką kształtu δ . Prędkość rozwarzania $x'(t)$ jest tutaj odwrotnie proporcjonalna do chwilowej odległości x pomiędzy częściami obrabianej powierzchni i katodą, co wykazano zależnością (7.17). Jeżeli przyjąć do ECH elektrolity na tyle pasywujące silnie, że rozwarzanie obrabianej powierzchni



Rys. 7.7. Wpływ grubości s_0 szczeliny międzyelektrodowej na prędkość zmian odchyłki kształtu $\delta(t)$ dla nieruchomej i ruchomej promieniowo katody oraz elektrolitów pasywujących słabo i silnie

odbywa się tylko w tych jej częściach, z których narzędzie ściernie usuwa warstwy spasywowane (rys. 7.5b), wówczas przebieg zmian $\delta(t)$ będzie zawarty, w przypadku nieruchomej promieniowo katody, pomiędzy krzywą 2 i prostą 7 (rys. 7.6), zaś w przypadku ruchomej promieniowo katody pomiędzy prostymi 5 i 7, pokazanymi na tym rysunku. Łatwo teraz zauważyć, że prędkość zmian $\delta(t)$ jest zdecydowanie większa w tych przypadkach, niż w omówionych poprzednio. Zastosowanie elektrolitu pasywującego silnie umożliwia uproszczenie konstrukcji narzędzia na tyle, że można zrezygnować z ruchomej promieniowo katody, gdyż skrócenie czasu ECH przy jej występowaniu (proste 5 i 7 w porównaniu z prostą 7 i krzywą 2 na rys. 7.6) jest na tyle małe, że nie rekompensuje trudności w konstrukcji i eksploatacji takiego narzędzia.

Analizując rys. 7.6 i 7.7 można zauważyć, że zastosowanie elektrolitu pasywującego silnie oraz nieruchomej promieniowo katody umożliwia usunięcie odchyłki kształtu δ po czasie t , który można wyznaczyć z zależności:

$$x_{\delta}(t) = x_s(t), \quad (7.34)$$

przy czym:

$$x_{\delta}(t) = \text{const},$$

$$x_s(t) = \sqrt{2\vartheta U \kappa c t + s_0^2},$$

a po podstawieniu i przekształceniach będzie:

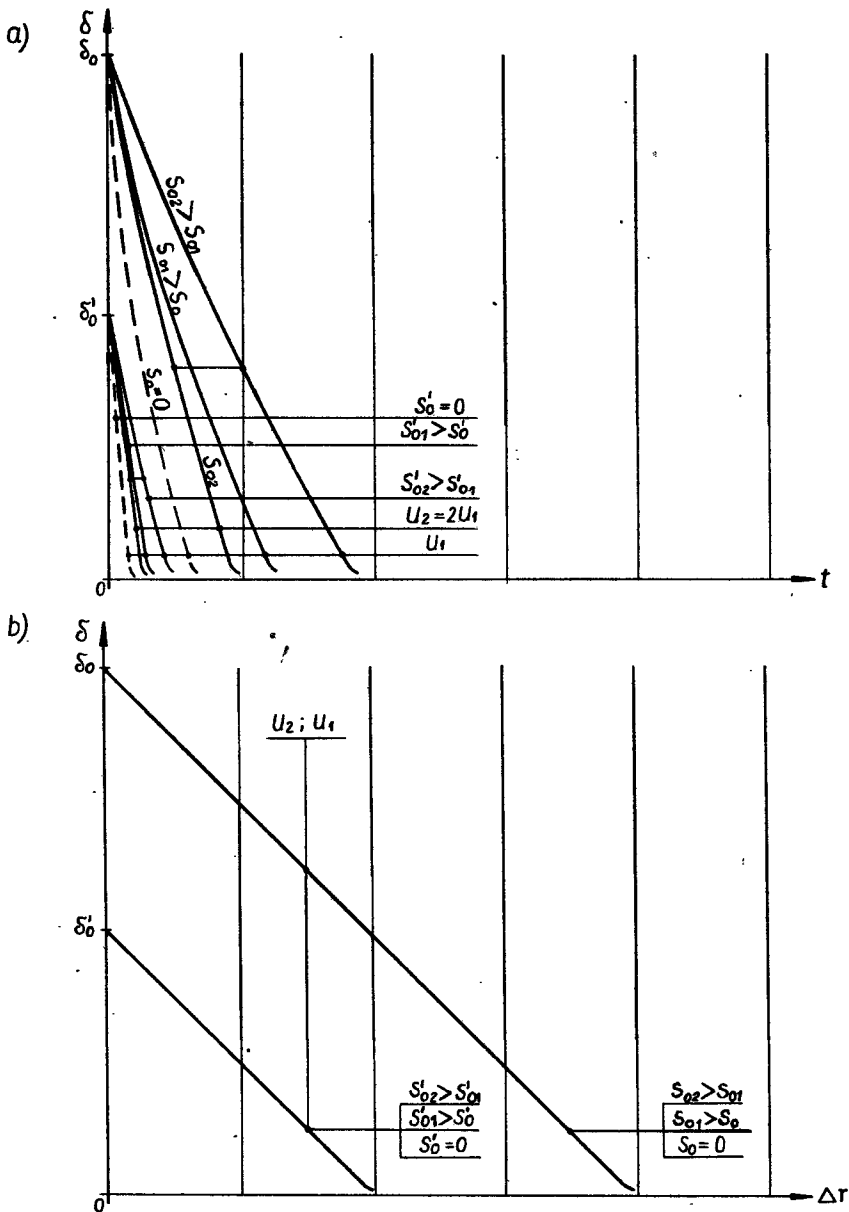
$$t = \frac{x_{\delta}^2 - s_0^2}{2\vartheta U \kappa c}. \quad (7.35)$$

Rysunek 7.8a przedstawia $\delta(t)$ dla przyjętych na rys. 7.2, 7.3, 7.4, 7.6 i 7.7 parametrów obróbki, a rys. 7.8b $\delta(\Delta r)$ dla tych samych wartości.

Opracowane programy obliczeniowe na maszynę matematyczną umożliwiają obliczenie i wykreślenie krzywych wg zależności: (7.8), (7.10), (7.11), (7.13), (7.15), (7.21), (7.32), dla rzeczywistych warunków ECH. Programy te opracowano w ramach realizacji Problemu Węzłowego 05.1.6 przez zespół badawczy, według koncepcji i pod kierownictwem autora [38].

Analizując rys. 7.6, 7.7 i 7.8 można zauważyć, że:

- zmiana odchyłki kształtu $\delta(t)$ jest tym większa, im mniejsza jest szczelina początkowa s_0 (rys. 7.7),
- największą prędkość zmian odchyłki kształtu δ można uzyskać dla przypadku ruchomej promieniowo katody oraz elektrolitów pasywujących silnie. Rozwiązanie to znacznie komplikuje konstrukcję i eksploatację narzędzi do ECH;
- wystarczająco mały czas t , niezbędny do usunięcia odchyłki kształtu δ można także uzyskać za pomocą nieruchomej promieniowo katody oraz elektrolitów pasywujących silnie (rys. 7.8a). Najdłuższy czas wyrównywania odchyłki kształtu δ występuje przy nieruchomej promieniowo katodzie oraz elektrolitach pasywujących słabo (rys. 7.4a). Przypadek ten wymaga także dużych naddatków obróbkowych, zależnych od dopuszczalnej odchyłki kształtu δ (rys. 7.4b);
- w przypadku elektrolitów pasywujących słabo oraz nieruchomej promieniowo katody, można uzyskać jedynie ograniczoną poprawę odchyłki kształtu δ ,



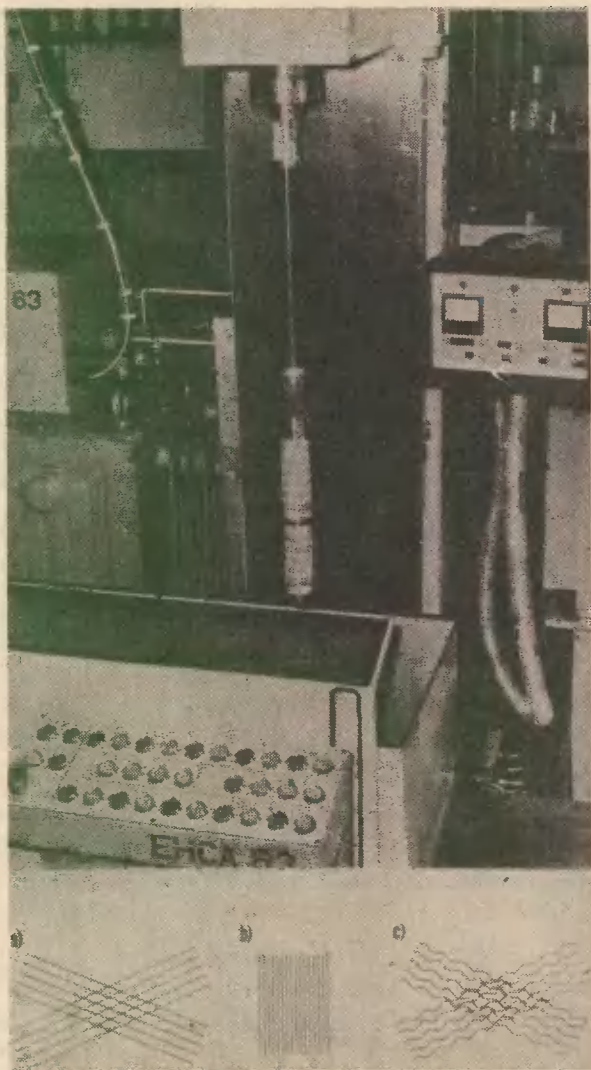
Rys. 7.8. Przebieg zmian odchyłki kształtu $\delta(t)$ (a) oraz $\delta(\Delta r)$ (b) dla nieruchomej promieniowo katody oraz elektrolitów pasywujących silnie

- zastosowanie elektrolitów pasywujących silnie umożliwia usunięcie odchyłki kształtu δ przy minimalnych przyrostach średnicy Δd (rys. 7.8b).

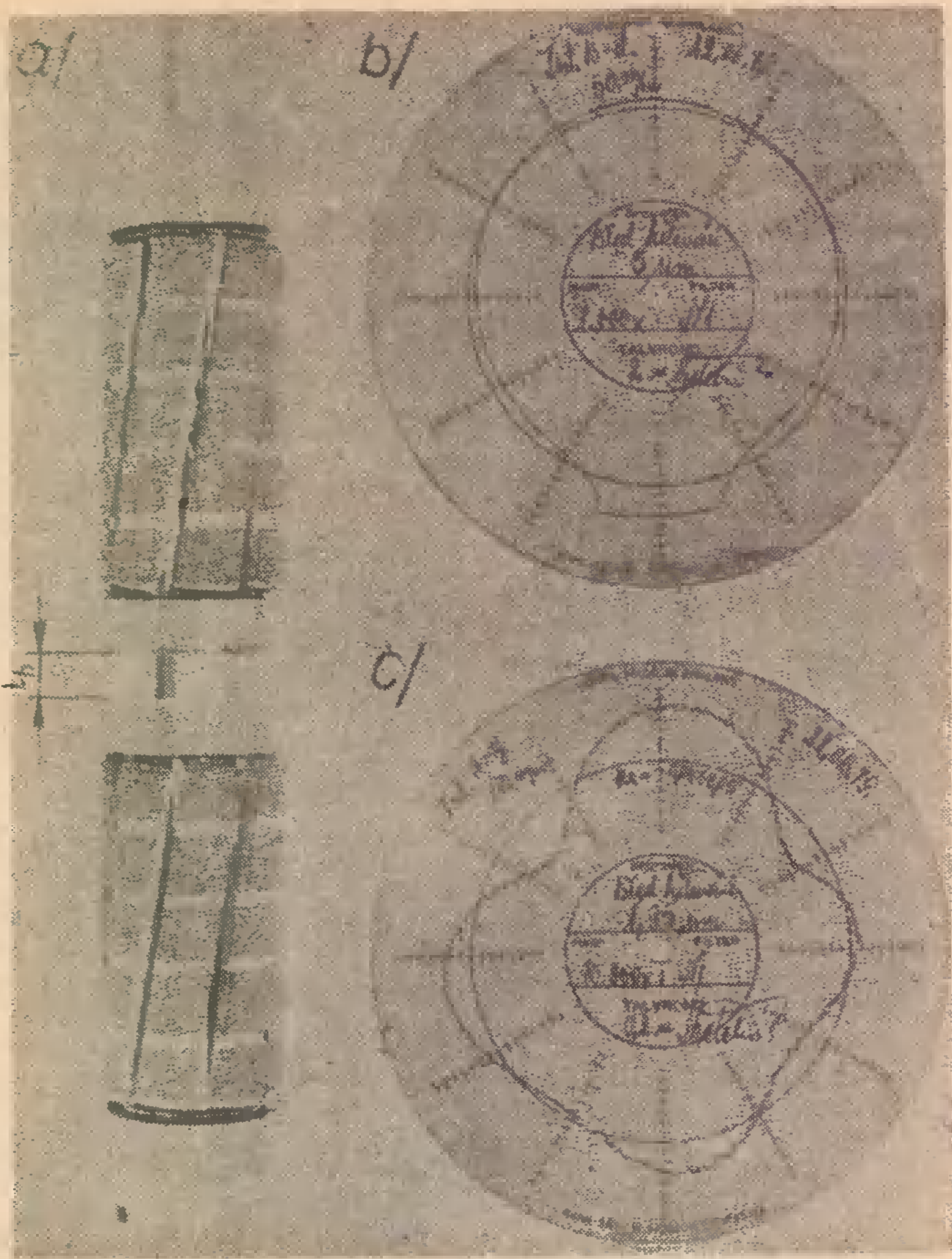
Stosowaniem elektrolitów pasywujących silnie przy nieruchomej promieniowo katodzie autor uzasadnia uzyskiwanie w swoich pracach badawczych i wdrożeniowych ECH [23, 29, 32, 38] małych odchyłek kształtu δ .

8. AUTOMATYZACJA KSZTAŁTOWANIA POWIERZCHNI O POSTACI WALCA OBROTOWEGO

Za pomocą współczesnych obrabiarek do honowania można łatwo sterować mikrogeometrią powierzchni obrabianych, włącznie z kierunkowością śladów obróbki (rys. 8.1): honowanie jednokierunkowe wzdłużne (HJW), honowanie jednokierunkowe poprzeczne (HJP), honowanie dwukierunkowe (HD). Również, jak wykazały badania autora, za pomocą ECH można uzyskiwać małe odchyłki okrągłości δ , powierzchni



Rys. 8.1. Honownica elektrochemiczna EHCA63 (projektu autora), umożliwiająca uzyskanie śladów obróbki: a – dwukierunkowych, b – jednokierunkowych wzdłużnych, c – kombinowanych, typowych dla honowania dwukierunkowego oraz superfiniszu [10, 14]



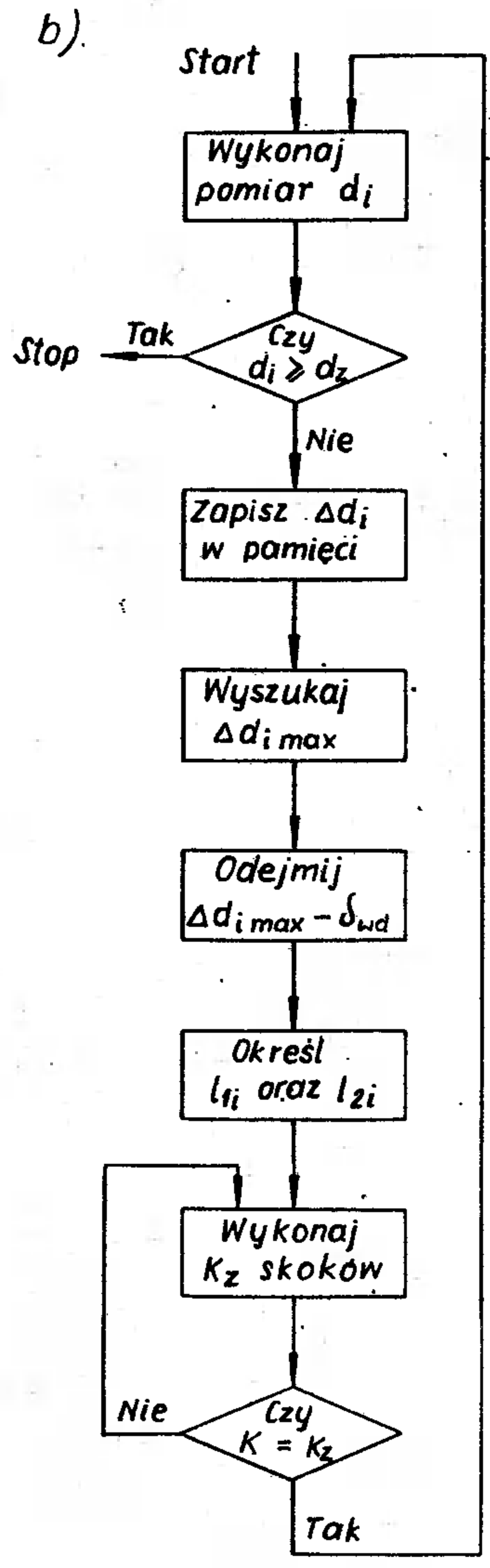
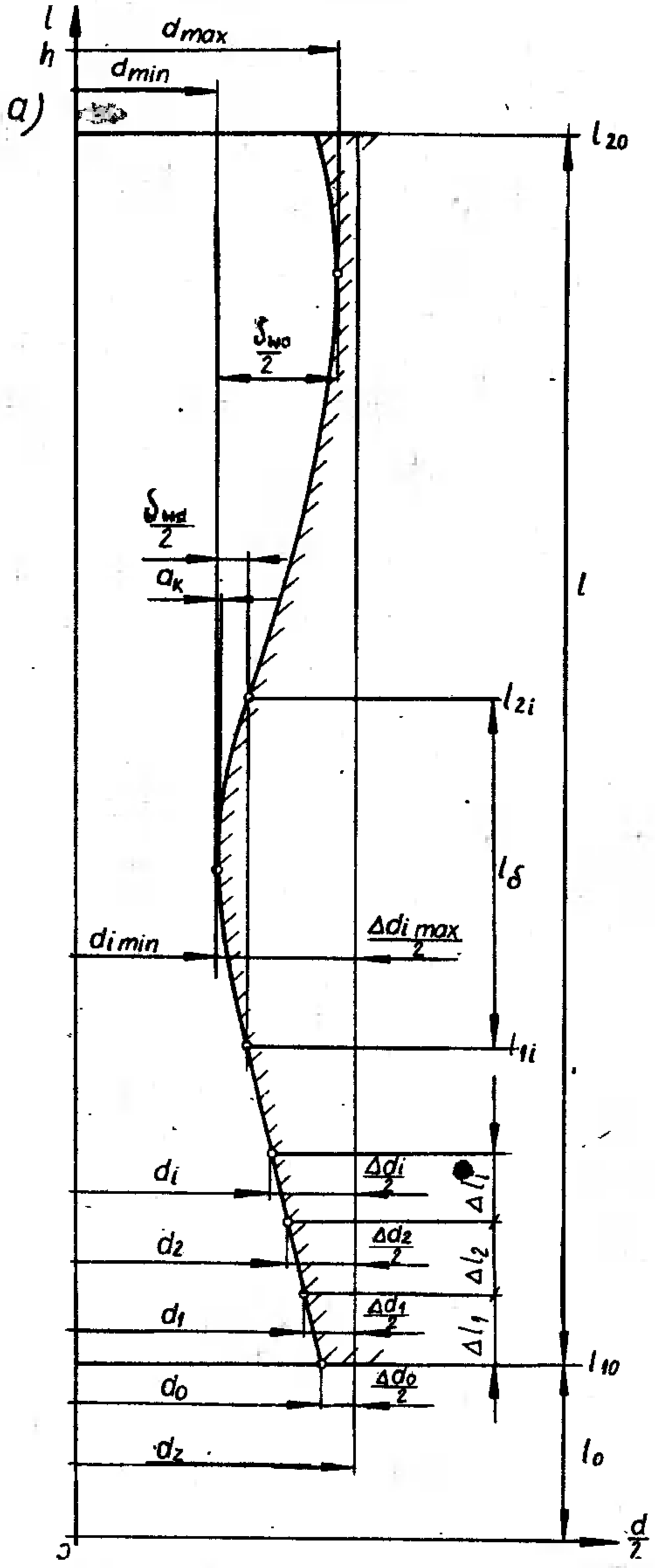
Rys. 8.2. Narzędzie (a) i otrzymane odchyłki okrągłości δ_r : b – otwór z rowkiem wpustowym ($\delta_r = 5 \mu\text{m}$), c – otwór bez rowka wpustowego ($\delta_r = 1,95 \mu\text{m}$). Wymiary obrabianego otworu: $d = 50\text{H5}$, $l = 218$. Materiał obrabiany: stal SW7Mo, twardość 65HRC

obrabianych (rys. 8.2), dzięki stosowaniu narzędzi o pierścieniowej postaci katody (oznaczonej 3/1 na rys. 3.4) [23, 32].

Nie rozwiązane do tej pory jest sterowanie odchyłkami walcowości obrabianych powierzchni, takimi jak: stożkowość, baryłkowość, siodłowość lub innymi, np. złożonymi z nich. Odchyłki te mogą być wynikiem obróbek poprzedzających honowanie, najczęściej na skutek zużycia narzędzi lub niewłaściwego mocowania obrabianego przedmiotu. Mogą one także powstawać w sposób naturalny w samym procesie honowania, np. dwukierunkowego (co omówiono w rozdziale 3.2), a co może wynikać ze zróżnicowanej liczby n , oddziaływań narzędzia, stanowiącej o objętości zdejmowanego materiału z powierzchni honowanej (rys. 3.15). Stosowane dotychczas ustawiczne pomiary lub sprawdzanie wymiarów otworów w czasie honowania z udziałem obsługującego obrabiarkę i na tej podstawie każdorazowe ustalanie zakresu i długości skoku h narzędzia w celu zmniejszenia odchyłek walcowości jest niezmiernie uciążliwe i czasochłonne, szczególnie podczas obróbki otworów długich. Powierzenie tej roli

automatycznemu układowi sterowania wydaje się celowe technicznie i ekonomicznie [27, 29, 114, 116].

Istota działania tego układu (Adaptive Control Geometrical – ACG) polega na tym, że w czasie honowania (HD, HJW) odbywa się automatyczne określanie punktów l_{1i} oraz l_{2i} nawrotu narzędzia (rys. 8.3a) w przypadku istnienia odchyłki walcowości δ_{wo} większej od odchyłki dopuszczalnej δ_{wd} i trwa tak długo, aż nie zostanie osiągnięty zadany wymiar średnicy d_z obrabianego otworu.



Rys. 8.3. Idea sterowania adaptacyjnego (ACG) procesem honowania: a – pojęcia geometryczne, b – algorytm

Odchyłkę walcowości δ_{wo} obrabianego otworu określa się zależnością:

$$\delta_{wo} = d_{max} - d_{min}, \quad (8.1)$$

gdzie: d_{max} , d_{min} – największy i najmniejszy wymiar średnicy obrabianego otworu. Dopuszczalną odchyłkę walcowości δ_{wd} wprowadzaną do układu, przyjmuje się jako:

$$\delta_{wd} < T, \quad (8.2)$$

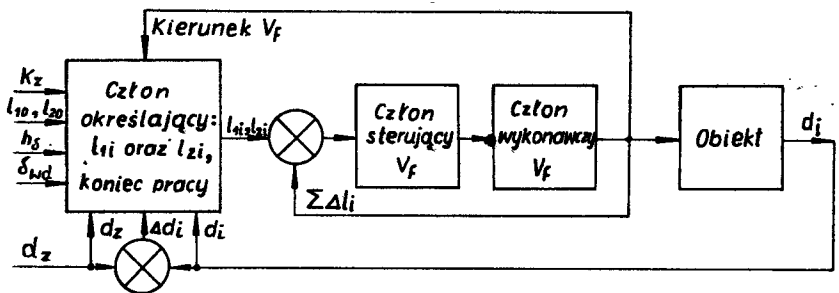
gdzie: T – tolerancja wykonania otworu.

Punkty nawrotu l_{1i} oraz l_{2i} (rys. 8.3a) narzędzia wyznaczane są przez przecięcie się prostej, równoległej do osi obrabianego otworu, z krzywą wynikającą z przenikania się płaszczyzny pomiaru średnic d_i otworu z rzeczywistą powierzchnią obrabianą. Prosta ta leży w płaszczyźnie pomiaru i jest oddalona od osi otworu o wartość $\left(\frac{d_{imin}}{2} + \frac{\delta_{wd}}{2}\right)$.

Nie przecięcie się wymienionej prostej z tworzącą obrabianego otworu świadczy o jego walcowości. Oznacza to, że układ, jako punkty nawrotu narzędzia, przyjmie l_{10} oraz l_{20} , które wprowadzono do układu w celu określenia położenia początku i końca obrabianego otworu względem początku l_0 układu współrzędnych. W tym przypadku narzędzie będzie pracowało tak długo, aż wymiar d_i obrabianego otworu nie osiągnie wartości zadanej d_z , wprowadzonej do układu, jeśli wcześniej nie określono liczby K_z podwójnych skoków narzędzia, po których należy ponownie dokonać pomiaru średnic d_i obrabianego otworu w celu ponownego określenia punktów l_{1i} oraz l_{2i} nawrotu narzędzia. Układ przyjmuje także jako skrajne punkty l_{10} oraz l_{20} nawrotu narzędzia w przypadku, gdy omawiana prosta styka się z tworzącą obrabianego otworu tak, że wartość δ_{wd} można wyznaczyć z zależności (8.1):

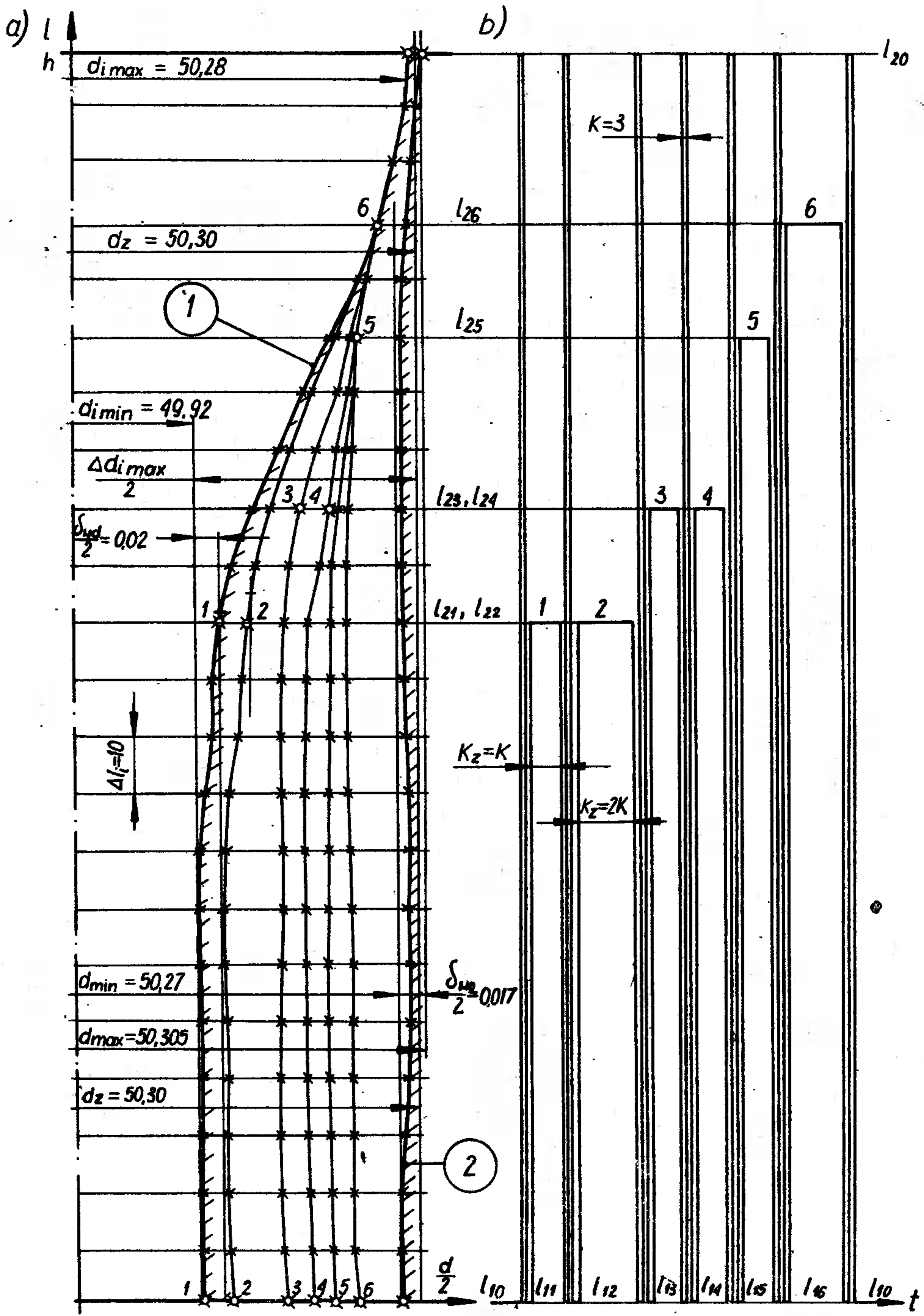
$$\delta_{wd} = d_{max} - d_{min} = \delta_{wo}$$

Omawiany układ jest częścią składową honownicy elektrochemicznej EHCA63 (rys. 8.1) [10, 14]. Algorytm działania układu przedstawia rys. 8.3b, a jego schemat blokowy rys. 8.4. W czasie pierwszego ruchu posuwisto-zwrotnego narzędzia na



Rys. 8.4. Schemat blokowy sterowania adaptacyjnego (ACG) honownicy EHCA63

długości l otworu, wyniki pomiaru Δd_i w punktach ($l_{1i} \div l_{2i}$) są zapisywane w pamięci układu. W czasie drugiego następuje wzajemne porównanie wyników pomiarów Δd_i w punktach ($l_{1i} \div l_{2i}$) w celu znalezienia $\frac{\Delta d_{imax}}{2}$. W trzecim ruchu ma miejsce określenie



Rys. 8.5. Przykład przebiegu kształtowania otworu za pomocą układu sterowania adaptacyjnego (ACG):
 a – przebieg zmian odchyłki walcowości δ_w , b – długość skoku k (środka l_n) oraz liczba K skoków po-
 suwisto-zwrotnych narzędzia [29]

l_{1i} oraz l_{2i} przez porównanie $\frac{\Delta d_i}{2}$ z wartością $\left(\frac{\Delta d_{i\max}}{2} - \frac{\delta_{wd}}{2}\right)$. Wartość $\Delta d_{i\max}$ można wyznaczyć ze wzoru:

$$\Delta d_{i\max} = d_z - d_{i\min}, \quad (8.3)$$

przy czym:

$$d_z = \frac{A_0 + B_0}{2}, \quad (8.4)$$

gdzie: $\Delta d_{i\max}$ – największa różnica średnic w punkcie l_i ,
 $d_{i\min}$ – najmniejszy wymiar otworu w punkcie l_i ,
 A_0, B_0 – dolny i górny wymiar graniczny obrabianego otworu.

Z uwagi na większą dokładność pomiaru obrabianego otworu odbywa się on przy wyłączonym ruchu obrotowym narzędzia, zawsze w tej samej płaszczyźnie. Taki sposób pomiaru d_i pozwala uniknąć wpływu odchyłek okrągłości δ , na wyniki pomiaru odchyłek walcowości δ_{wr} . W związku z tym należy do układu wprowadzić informację dotyczącą liczby K_z niezbędnych podwójnych ruchów posuwisto-zwrotnych narzędzia, po których następuje kolejny pomiar średnic d_i obrabianego otworu w punktach ($l_{1i} \div l_{2i}$) i ponowne określenie punktów nawrotu narzędzia. Liczba K_z powinna spełniać zależność:

$$K_z = \frac{\delta_{wd}}{a_k}, \quad (8.5)$$

gdzie: a_k – grubość zdejmowanego materiału podczas jednego cyklu obróbkowego, określonego zależnością (3.31).

Ze względu na różne cechy geometryczne narzędzi ściernych, a w szczególności w trosce o w miarę równomierne ich zużywanie się, układ może przyjmować nastawiane, minimalne długości skoku h_δ narzędzia, których długość wynika z zależności (rys. 8.4):

$$h_\delta = f(l, d_z, l_n, n, f). \quad (8.6)$$

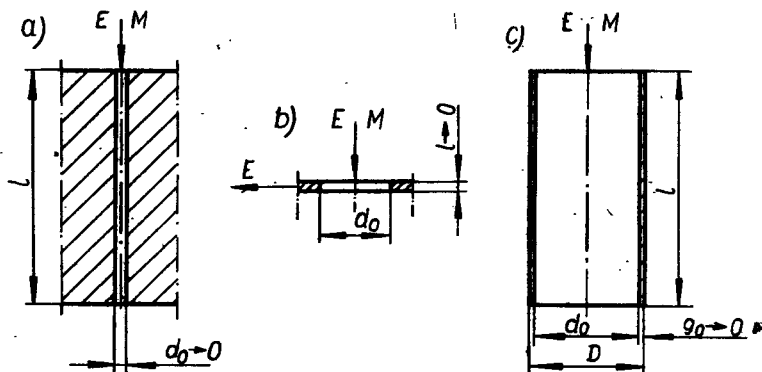
Rysunek 8.5a [29] przedstawia przykład przebiegu kształtowania honowanego otworu za pomocą omówionego wyżej układu adaptacyjnego*. Krzywa 1 przedstawia tworzącą otworu z odchyłkami walcowości przed obróbką, krzywa 2 po obróbce. Pozostałe krzywe przedstawiają tworzące w czasie obróbki, będące podstawą do wyznaczania punktów nawrotu narzędzia. Rysunek 8.5b przedstawia długości skoku h oraz liczbę K skoków narzędzia pokazanego na rys. 6.2c.

Zaprezentowany układ sterowania adaptacyjnego procesem honowania, poprawiający walcowość otworów, może być stosowany także do poprawiania makrogeometrii innych obrabianych powierzchni, np.: w czasie szlifowania, superfiniszu itp.

* Idea układu ACG jest koncepcji autora (Patent nr 208183) [27]. Konstrukcja i badania układu omówione są w pracy doktorskiej (której promotorem jest autor) K. Karwowski: Metoda i układ sterowania zmniejszające błędy walcowości honowanych otworów, Politechnika Warszawska, 1982 r.

9. CECHY GEOMETRYCZNE KSZTAŁTOWANYCH OTWORÓW JAKO OGRANICZENIE STOSOWANIA HONOWANIA ELEKTROCHEMICZNEGO

ECH wymaga doprowadzenia w strefę obróbki kilku postaci nośników masy i energii o określonym natężeniu i poziomie. W przypadku kształtowania otworów o postaci walca obrotowego ich cechy geometryczne, takie jak: d , l , l/d , mogą wnosić ograniczenia w stosowaniu ECH. Również cechy geometryczne przedmiotów, w których występują kształtowane za pomocą ECH otwory, mogą ograniczenia te powiększać (rys. 9.1). Ograniczenia w stosowaniu ECH mogą występować w skali makro oraz



Rys. 9.1. Cechy geometryczne kształtowanych otworów i obrabianych przedmiotów: a) $d_0 \rightarrow 0$, b) $l \rightarrow 0$, c) $g_0 \rightarrow 0$

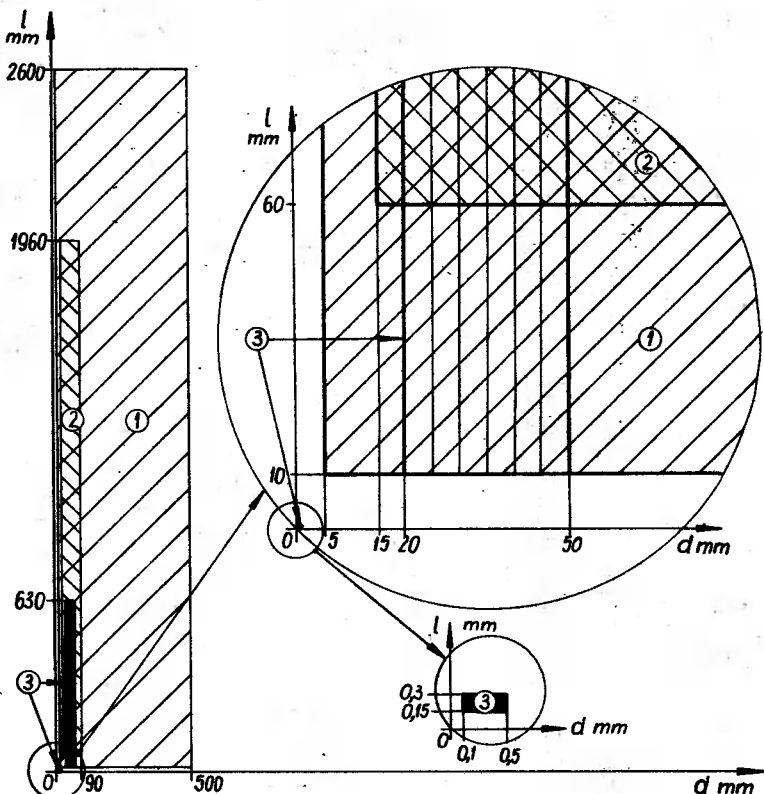
mikro. Ograniczenia makro, z racji ciągle powiększających się wydajności źródeł masy i energii nie są dalej rozpatrywane. Decydujące mogą okazać się ograniczenia w skali mikro. Rysunek 9.2 przedstawia średnice i długości otworów o postaci walca obrotowego, kształtowanych: w świetle za pomocą ECH [105, 112], w kraju za pomocą HS [28] oraz w badaniach prowadzonych przez autora lub współpracowników, realizowanych z inspiracji i pod jego kierownictwem [12, 28, 30, 31, 32, 38].

Szczególnie niekorzystny jest przypadek, gdy:

$$\begin{aligned} d_0 &\rightarrow 0, \\ l &= l_{\text{real}}, \\ g_0 &= g_{\text{real}}, \end{aligned} \quad (9.1)$$

gdzie: d_0 – początkowa średnica kształtowanego otworu,
 l – długość kształtowanego otworu,
 l_{real} – długość realna, nie wnosząca ograniczeń wytwórczych,
 g_0 – grubość ścianki obrabianego przedmiotu (cylindra),
 g_{real} – grubość realna, nie wnosząca ograniczeń wytwórczych,

gdyż $d_0 \rightarrow 0$ wnosi ograniczenia dotyczące przede wszystkim: E_e , E_m , E_b , M_s , M_b , M_e . Malejąca średnica d_0 kształtowanego otworu zmniejsza przekrój poprzeczny F_{op} ,



Rys. 9.2. Zakresy średnic i długości otworów kształtowanych za pomocą HS lub ECH: 1 – HS w Polsce [28], 2 – ECH omówione w literaturze światowej, 3 – badanych przez autora [12, 28, 30, 31, 32, 38]

przez który doprowadza się w strefę obróbki niezbędną energię i masę o różnych postaciach ich nośników.

Synergetyczne [26, 45] podejście do projektowania narzędzi w ECH wymaga założenia, że przez przekrój F_{op} popłynie co najmniej E_e oraz E_m .

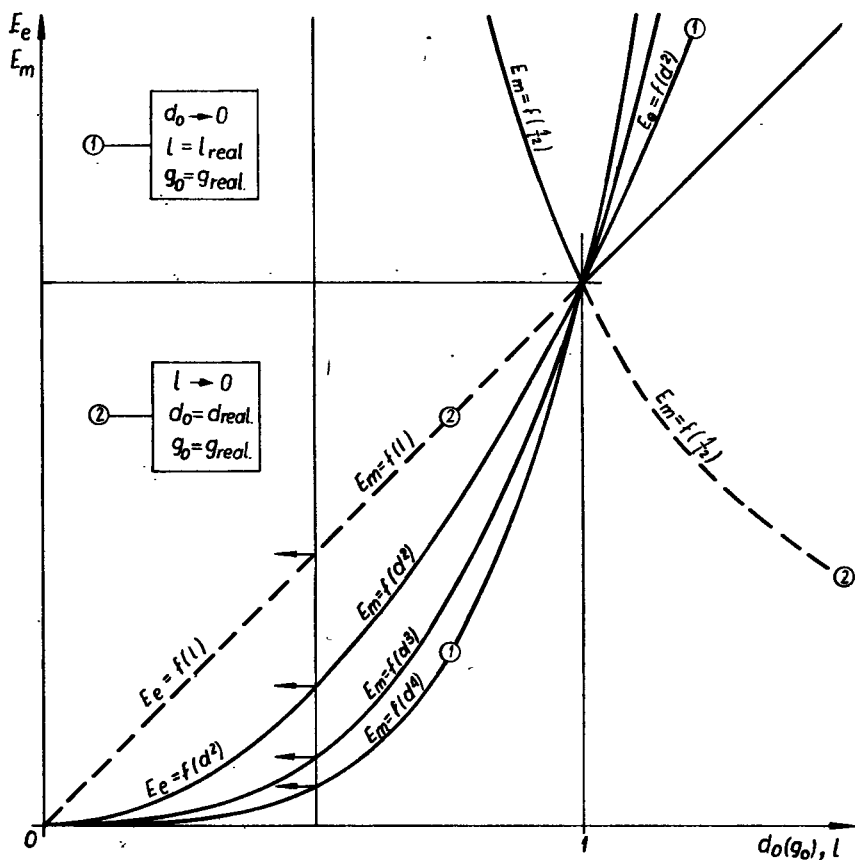
Ograniczenie dotyczące doprowadzenia w strefę obróbki E_e wynika z zależności:

$$i_{\max} \leq j_{dn} F_{op} \quad (9.2)$$

gdzie: i_{\max} – maksymalna wartość natężenia prądu elektrycznego,
 j_{dn} – dopuszczalna gęstość prądu elektrycznego w narzędziu lub w elemencie napędzającym narzędzie, przy założeniu, że obciążenie to nie wykluczy możliwości doprowadzenia E_m

F_{op} – pole przekroju poprzecznego kształtowanego otworu.

Obciążenie E_m narzędzia lub elementu napędzającego narzędzie wynika głównie z oporów skrawania. W zależności od sposobu kształtowania otworu (HJW, HJP, HD) występują obciążenia mechaniczne: ściskająco-rozciągające, skręcające, ściskająco-skręcające lub rozciągająco-skręcające, będące funkcją: $E_m = f(d^2)$, $E_m = f(d^3)$, $E_m = f(d^4)$ (rys. 9.3). Szczególnie niekorzystne mogą okazać się obciążenia ściskające,

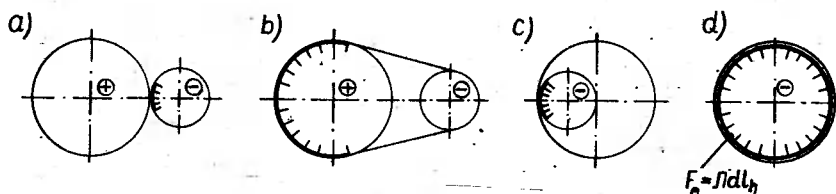


Rys. 9.3. Wpływ cech geometrycznych kształtowanego otworu oraz obrabianego przedmiotu na ograniczenia energetyczne w ECH: 1 – krzywa ograniczeń dla $d_0 \rightarrow 0$ (9.1) lub $g_0 \rightarrow 0$ (9.6), 2 – krzywa ograniczeń dla $l \rightarrow 0$ (9.3)

przejawiające się w możliwości wybożenia elementu napędowego narzędzia bądź jego samego [$E_m = f(d^4)$]. Można temu przeciwdziałać przez wprowadzenie do łącznika i narzędzia cechy dynamicznej, a w szczególności naprężeń rozciągających, jak to zostało zasygnalizowane w pracach [30, 31]*.

Zmniejszająca się średnica d_0 kształtowanego otworu wnosi także ograniczenia dotyczące doprowadzenia w strefę obróbki masy narzędzia ściernego M_s oraz masy katody M_k . Ograniczenie to eliminuje możliwość stosowania większej liczby pilników ściernych oraz znacznie ogranicza F_e , co przy zalecanych w ECH jednostkowych gęstościach j prądu elektrycznego minimalizuje udział obróbki elektrochemicznej w tym procesie. Udział powierzchni katody F_e w poszczególnych obróbkach elektrochemiczno-ściernych przedstawia rys. 9.4 [3, 119]. Dalsze zmniejszanie d_0

* Szersze omówienie tego zagadnienia można znaleźć w pracy doktorskiej (której promotorem jest autor) J. Orziej: Badanie parametrów obróbki wykańczającej otworów o średnicy $0,1 \div 0,5$ mm w ciągadłach diamentowych, Politechnika Warszawska



Rys. 9.4. Udział powierzchni roztrawiającej katody F_e (dla stałej szerokości katody) w poszczególnych obróbkach elektrochemiczno-ściernych: a – szlifowanie zewnętrzne wałka, b – szlifowanie zewnętrzne wałka wg [3], c – szlifowanie otworu, d – ECH

pozwała w skrajnym przypadku na branie pod uwagę narzędzia o postaci przewodzącej struny, zbrojonej pojedynczymi ziarnami ściernymi. Może się tutaj pojawić problem wywierania nacisku, niezbędnego do realizacji procesu ściernego oraz kompensacji zużycia ściernego narzędzia.

Znaczne zmniejszenie się d_0 czyni niewykonalnym doprowadzenie elektrolitu w strefę obróbki przez narzędzie (rys. 5.4d) [31]. Pozostaje jedynie możliwość dostarczania elektrolitu w strefę obróbki przez obrabiany przedmiot (rys. 5.4a), co przy określonej grubości szczeliny s_0 oraz zalecanych prędkościach przepływu elektrolitu v_c czyni jego wydatek (M_e) odpowiednio mały. W przypadku kształtowania otworów długich ($l \geq d_0$) za pomocą narzędzia – struny, układ przypomina dławik, wnoszący znaczne opory przepływu elektrolitu (E_h).

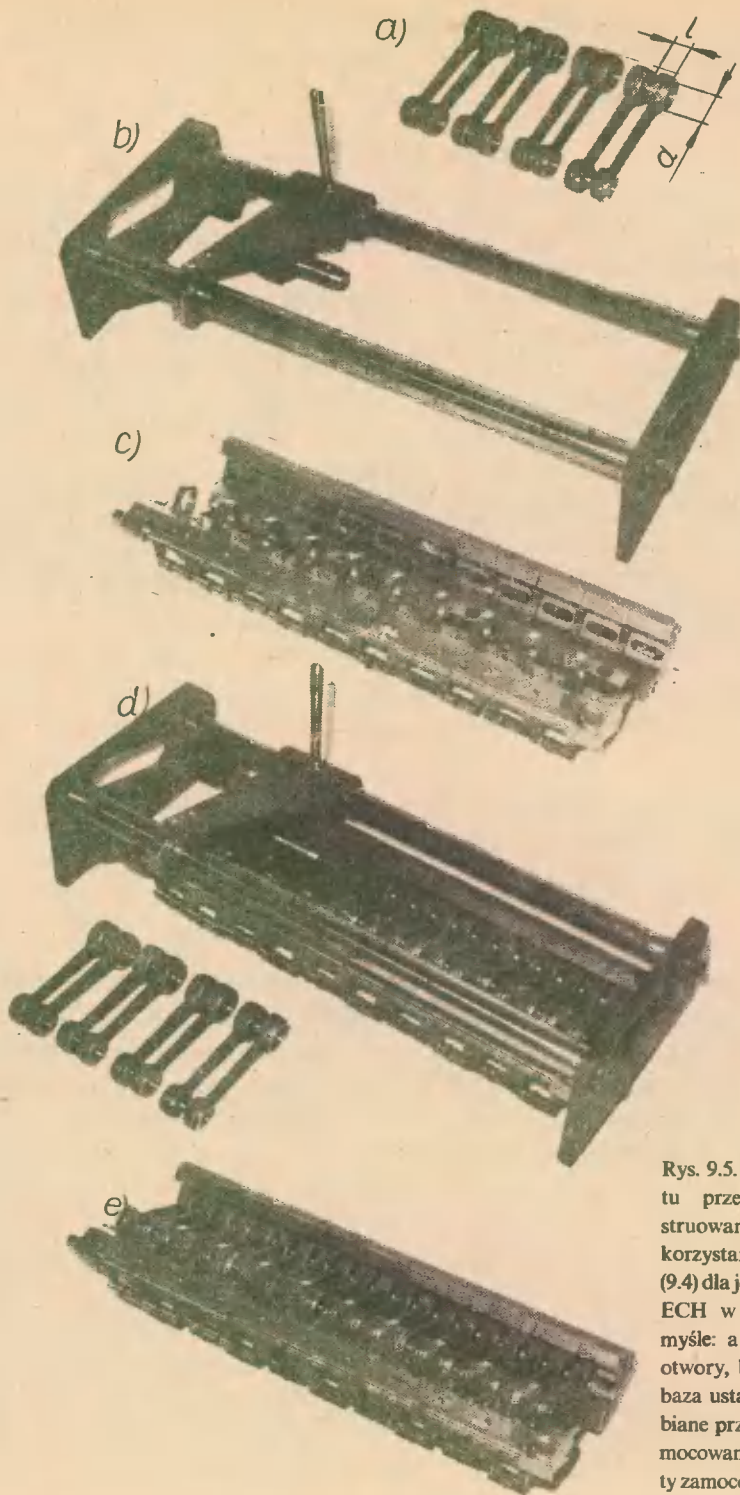
Rozpatrując $l \rightarrow 0$ dla $d_0 = d_{real}$ oraz $g_0 = g_{real}$, można wyróżnić dwa przypadki:

$$\begin{aligned} l &\rightarrow 0, \\ d_0 &= d_{real}, \\ g_0 &= g_{real}. \end{aligned} \quad (9.3)$$

oraz

$$\begin{aligned} \Sigma(l \rightarrow 0) &= l_{real}, \\ d_0 &= d_{real}, \\ g_0 &= g_{real}. \end{aligned} \quad (9.4)$$

Z zależności (9.3) wynika, że przy założeniu: $d_0 = d_{real}$ oraz $d_0 = const$, $l \rightarrow 0$ powoduje w istotny sposób zmianę ważnego stosunku l/d przesądzającego o sposobie napędu narzędzia. Powszechnie uważa się, że jeżeli wymiary otworu spełniają nierówność ($l/d < 1,5$), narzędzie wymaga sztywnego zamocowania we wrzecionie obrabiarki, gdyż samo nie potrafi się prowadzić w kształtowanym otworze [7, 55, 61, 115, 129]. Zależność ta wynika także z układu pasowań, gdyż narzędzie w kształtowanym otworze może być tutaj rozpatrywane jako przypadek połączenia ruchowego. Sztywne mocowanie narzędzia we wrzecionie obrabiarki wymaga umożliwienia obrabianemu przedmiotowi wykonywania ruchów kompensujących odchyłki ustawcze, pomimo posiadania w wielu przypadkach większej masy niż narzędzie. W przypadku, gdy narzędzie posiada wymiary $l/d \geq 1,5$ a kształtowany otwór $l/d \geq 1,5$, wówczas sztywne prowadzenie narzędzia, z racji cech geometrycznych układu, samoistnie przestaje być sztywne. Ponadto odchyłki ustawcze przedmiotu obrabianego mogą okazać się na tyle duże, że wymagają przegubowego napędu narzędzia [39].



Rys. 9.5. Przykład uchwytu przedmiotów, skonstruowanego z myślą o wykorzystaniu zależności (9.4) dla jednego z wdrożeń ECH w krajowym przemyśle: a – kształtowane otwory, b÷c – uchwyt i baza ustawcza, d – obrabiane przedmioty w czasie mocowania, e – przedmioty zamocowane w uchwycie

Zmniejszanie się długości l obrabianego przedmiotu może wносить także ograniczenia co do poziomu doprowadzanej w strefę obróbki E_e oraz E_m .

Ograniczenie E_e wynika z zależności (rys. 9.3):

$$i_{\max} \leq j_{dp} \pi d_0 l, \quad (9.5)$$

gdzie: j_{dp} – dopuszczalna gęstość prądu elektrycznego jaką można dopuścić w obrabianym przedmiocie, przy założeniu, że obciążenie to nie wykluczy możliwości doprowadzenia E_m .

Ograniczenie E_m (rys. 9.3) wynika z wytrzymałości mechanicznej obrabianego przedmiotu oraz dopuszczalnych nacisków jednostkowych narzędzia ściernego, które ze względu na w miarę równomierne zużywanie się powinno posiadać właściwie dobrane cechy geometryczne oraz parametry kinematyczne (rys. 3.13, 3.15).

W niektórych przypadkach ograniczenie wyrażone zależnością (9.3) można ominąć w sposób wyrażony zależnością (9.4), jak to pokazuje przykładowo rys. 9.5. Rysunek ten przedstawia uchwyt do jednoczesnego kształtowania za pomocą ECH dwudziestu otworów w obrabianych cieplnie korbowodach silników spalinowych dla jednego z wdrożeń ECH w krajowym przemyśle maszynowym, który opracował autor przy udziale współpracowników [32, 39].

Analizując przypadek:

$$\begin{aligned} d_0 &= d_{\text{real}}, \\ l &= l_{\text{real}}, \\ g_0 &\rightarrow 0, \end{aligned} \quad (9.6)$$

dochodzi się do wniosku, że ograniczenia dotyczące E_e oraz E_m wynikają jedynie z wartości pola przekroju poprzecznego F_{pp} przedmiotu kształtowanego.

Ograniczenia dotyczące E_e można wyznaczyć z zależności:

$$i_{\max} \leq j_{dp} F_{pp} \quad (9.7)$$

gdzie: j_{dp} – dopuszczalna gęstość prądu elektrycznego w przedmiocie obrabianym,
 F_{pp} – pole przekroju poprzecznego przedmiotu kształtowanego.

Ograniczenie dotyczące E_m wynika z wytrzymałości mechanicznej przedmiotu obrabianego, która w wielu przypadkach może przesądzić o tym, że jedynym sposobem kształtowania otworu (z racji małych obciążeń mechanicznych) okaże się ECH, szczególnie podczas obróbki przedmiotów długich.

IV. WYKONANE DOŚWIADCZENIA I ANALIZA ICH WYNIKÓW

1. CEL I ZAKRES DOŚWIADCZEŃ

Nawiązując do analizy literatury z zakresu tematu, a szczególnie luk poznawczych jakie tam wykryto, oraz opierając się na własnych badaniach i dociekaniach teoretycznych ustalono zakres badań doświadczalnych, w których postanowiono wykazać:

- możliwość zastąpienia powszechnie stosowanej obróbki kształtującej i wykańczającej otworów w przedmiotach obrabianych cieplnie jednozabiegową operacją ECH,
- przydatność do ECH nowego narzędzia [27, 39], o konstrukcji wynikającej z własnych badań teoretycznych (rys. 6.2d), umożliwiającego honowanie jedno- i dwukierunkowe (HJW, HD),
- wpływ istotnych parametrów ECH na wydajność obróbki, makro- i mikrogeometrię honowanych otworów oraz siły i momenty towarzyszące temu procesowi,
- wpływ sposobu wytwarzania (ECH, ECH+HS, HS) na jakość użytkową powierzchni obrabianych otworów, ocenianą na podstawie jej ścierności i ścieralności,
- wpływ sposobu honowania (HJW, HJP, HD) na ścierność i ścieralność powierzchni honowanej.

Pierwsze trzy problemy badawcze wchodzą w zakres, zgodnie z przyjętą terminologią, badań wytwórczych (technologicznych) [45, 94]. Pozostałe dwa, z racji sposobu przeprowadzenia badań, wchodzą w zakres badań konstrukcyjnych [45]. Wybór konstrukcyjnej oceny ścierności i ścieralności powierzchni honowanej elektrochemicznie wynika z braku takiej oceny obiektywnej i czyni tę ocenę bardziej wiarygodną.

Badania wytwórcze swoim zakresem obejmują ECH otworów ($d = 50$, $l = 100$) zdeformowanych obróbką cieplną, narzędziem pokazanym na rys. 6.2d, z uwzględnieniem wpływu: sposobu honowania (HJW, HD), natężenia prądu elektrycznego i , prędkości skrawania v_s , nacisku jednostkowego p na pilniki ścierne oraz czasu t obróbki, na: wydajność obróbki, makro- i mikrogeometrię otworów honowanych oraz siły i momenty towarzyszące temu procesowi.

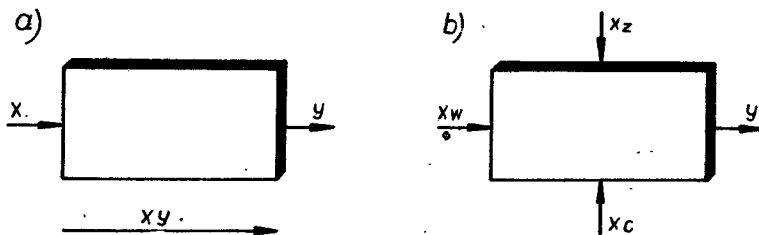
Badania konstrukcyjne natomiast dotyczą wpływu sposobu wytwarzania (ECH, ECH+HS, HS) oraz sposobu honowania (HJW, HJP, HD) na ścierność i ścieralność powierzchni honowanej na przykładzie pary kinematycznej: cylinder (CS, CZ) – uszczelnienie tłoka (UZ, UG); dla wymiarów otworu cylindra ($d = 50$, $l = 100$).

2. KONCEPCJA I METODYKA BADAŃ

Dokładność wykonania wymiaru i kształtu oraz uzyskanie powierzchni o określonej jakości warstwy wierzchniej to kryteria technicznej oceny procesu honowania, wynikające z jego racji celowości technicznej. Wydajność obróbki, przesądzająca o koszcie wytwarzania, jako kryterium ekonomiczne, także nie może być pominięta. Wszystkie one stanowią główne kryteria wytwórcze przedmiotu badań. Jakość użytkowa powierzchni honowanej, będąca kryterium konstrukcyjnym, zależy nie tylko od dokładności wykonania wymiaru i kształtu, lecz także od jakości warstwy wierzchniej, w tym również struktury stereometrycznej powierzchni.

W przedstawianych badaniach wytwórczych oraz konstrukcyjnych, za pomocą modelu cybernetycznego (rys. 2.1), do przestrzeni wyjść zaliczono*:

- wydajność honowania oraz siły i momenty towarzyszące temu procesowi,
- makrogeometrię otworów honowanych,
- mikrogeometrię powierzchni honowanej,
- ścierność i ścieralność powierzchni honowanej.



Rys. 2.1. Cybernetyczny model badań: a – obiekt badań jako obiekt sterowania, b – klasyfikacja czynników wejściowych; x – przestrzeń wejść, y – przestrzeń wyjść, xy – przestrzeń przebiegów, x_c – parametry stałe, x_w – parametry zmienne (wejściowe), x_z – zakłócenia

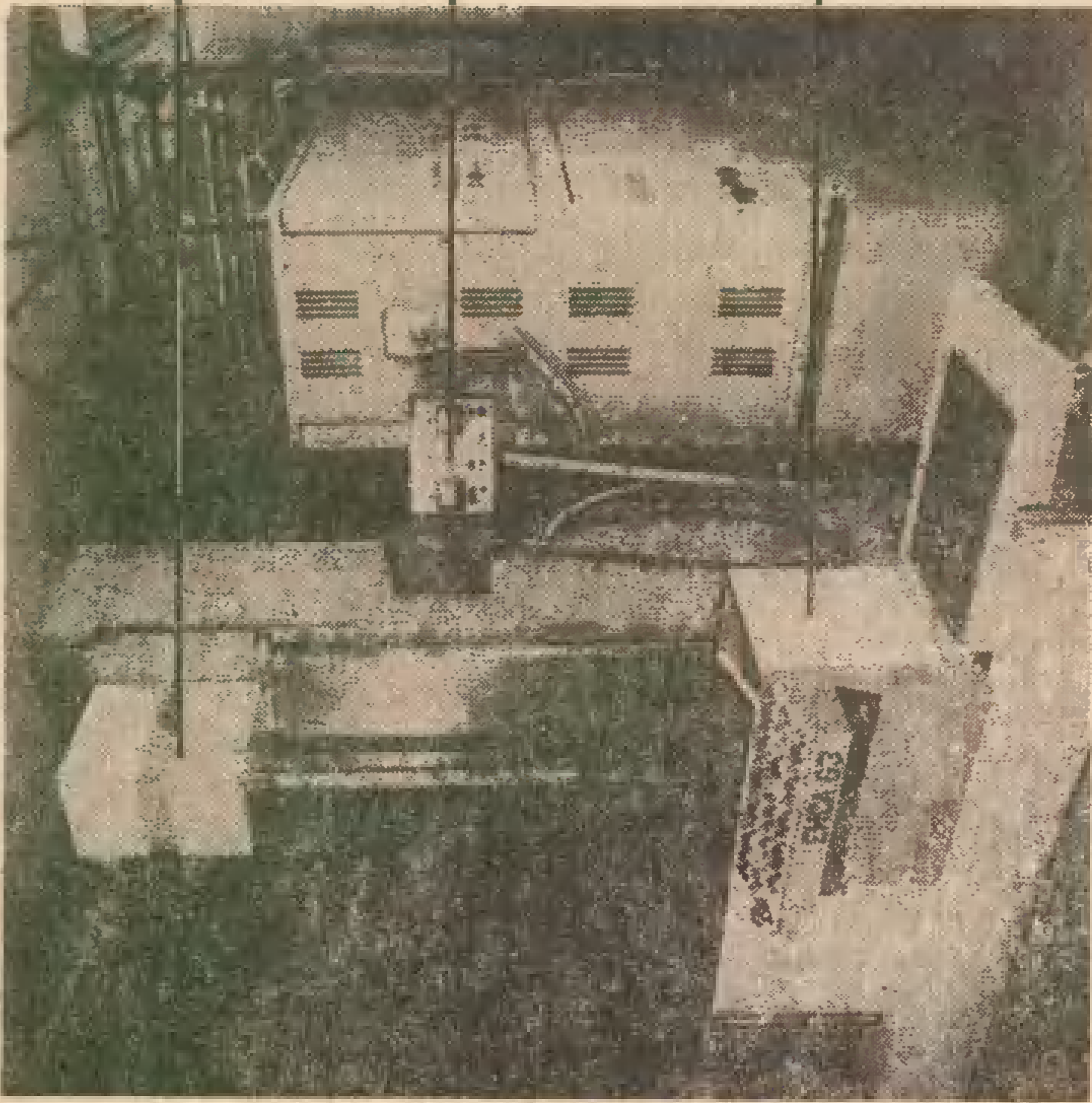
Przestrzeń wejść stanowią zbiory czynników: sterowalnych przed badaniami (parametry stałe), sterowalnych w czasie badań (parametry zmienne) oraz niesterowalnych (zakłóceń).

W badaniach wytwórczych wszystkie czynniki sterowalne (x_c , x_w) można odnieść do obrabianego przedmiotu, narzędzia, obrabiarki oraz parametrów procesu. Zaliczono do nich:

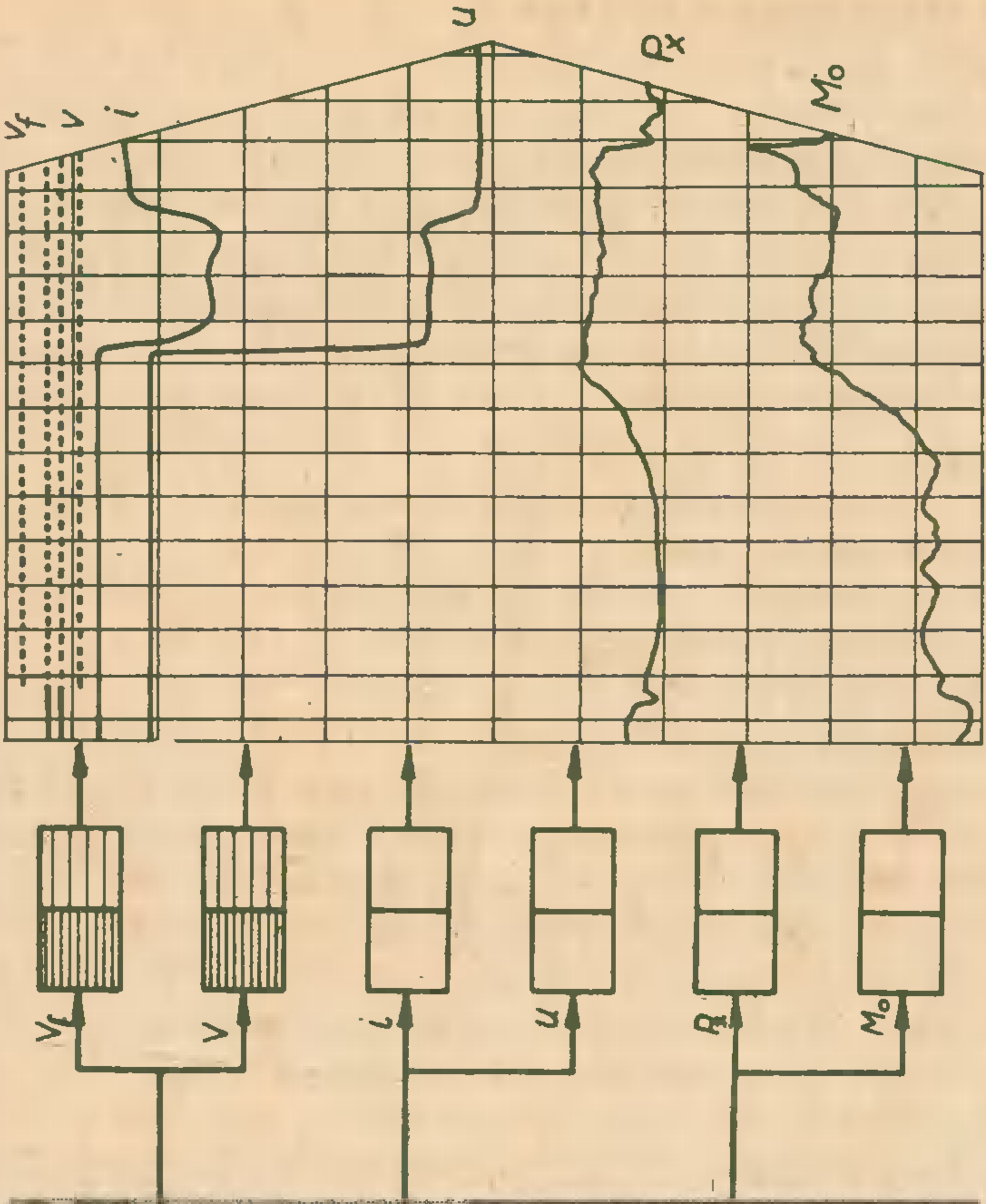
- C_g , C_m i C_d obrabianych przedmiotów,
- C_g , C_m i C_d narzędzia (katoda, pilniki ściernie),
- obrabiarkę (stanowisko badawcze – rys. 2.2),
- napięcie U (stałe lub zmienne w czasie) oraz natężenie prądu i ,
- własności i właściwości elektrolitu,

* Prof. K. Albiński uważa, jak to wynika z konsultacji prac autora w ramach realizacji Problemu Wzłowego 05.1.6, że w badaniach technologicznych nie występuje przestrzeń wyjść, a tylko jedno wyjście w postaci wytworzonego produktu (obrobionego przedmiotu), scharakteryzowanego jego jakością oraz wydajnością obróbki. W pojęciu wydajności obróbki mieszczą się także koszty procesu.

a/



b/



Rys. 2.2. Stanowisko do badań wytwórczych: a – obrabiarka EHC63 własnego projektu [27, 28]. b – przykład zapisu informacji

- kinematykę narzędzia (HD, HJW),
- prędkość skrawania $\vec{v}_e(\vec{v}, \vec{v}_f)$,
- nacisk p na pilniki ściernie,
- długość skoku h i wybiegów w narzędzia,
- wzajemne usytuowanie oraz sposoby mocowania przedmiotu i narzędzia,
- hydrodynamikę przepływu elektrolitu (parametry stałe: C_g wlotów i wylotów elektrolitu oraz ich rozmieszczenie; parametry zmienne: ciśnienie na wlocie i wylocie elektrolitu oraz natężenie jego przepływu),
- temperaturę elektrolitu na wlocie,
- czas t obróbki.

Czynniki niesterowalne (x_z – zakłócenia) [19] to zmiany przypadkowe lub niemiernalne zmiany systematyczne, takie jak:

- odchyłki kształtu otworów przed honowaniem,
- mikrogeometria powierzchni obrabianej,
- zmiany temperatury otoczenia,
- obce pola magnetyczne itp.

Przestrzeń przebiegów (xy) w procesie ECH tworzy swoistą strukturę, na którą składają się:

- hydrodynamika przepływu elektrolitu między elektrodami,
- proces przenoszenia ładunku elektrycznego (pole potencjałów elektrycznych),
- procesy elektrodowe na anodzie i katodzie,
- proces wymiany ciepła (pole temperatur) związany z ECM i HS,
- proces wymiany masy (pole koncentracji produktów obróbki),
- kinematyka i dynamika honowania,
- zużycie pilników ściernych,
- skrawanie, tarcie, odkształcenia,
- zmiana makro- i mikrogeometrii powierzchni obrabianej itp.

Cechy fizyczne wymienionych procesów i ich wzajemne związki sprawiają, że ECH należy do bardzo złożonych układów sterowania. Sam proces ECM można sklasyfikować [68] jako „wielowymiarowy, dynamiczny, ze sprzężonymi polami skalarnymi i wektorowymi, przebiegający w ośrodku wielofazowym ze zmiennymi w czasie i przestrzeni własnościami, ze złożonymi i sprzężonymi zjawiskami fizyko-chemicznymi”. Stąd też zbudowanie modelu dedukcyjnego ECH obecnie jest jeszcze niemożliwe, pomimo podejmowania prób budowania modeli uproszczonych w zakresie małych podsystemów [4, 68, 104, 128]. W niniejszej pracy uwagę skierowano na zbudowanie modeli indukcyjnych, w postaci:

$$y_n = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \check{x}_i + \sum_{i<j}^k b_{ij} \check{x}_i \check{x}_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \check{x}_i^2, \quad (2.1)$$

gdzie:

- y_n – n -ty czynnik wynikowy,
- b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – współczynniki regresji,
- k – liczba czynników badanych,
- \check{x}_i, \check{x}_j – zakodowane wartości czynników badanych.

Do badanych czynników wejściowych (x_w) zakwalifikowano:

- na podstawie modelu (6.1) – natężenie i prądu roztwarzającego oraz czas t obróbki,
- na podstawie literatury [47, 55, 61, 115, 129] – prędkość skrawania v_e pilników ściernych oraz nacisk jednostkowy p na pilniki.

Każdy z badanych czterech czynników przyjęto na pięciu poziomach. Czynniki te badano dla dwóch sposobów honowania: HD, HJW. Badania realizowano, dla każdego ze sposobów honowania, wg programu statycznego, zdeterminowanego, selekcyjnego, wieloczynnikowego, quasi – rotabilnego, oznaczonego PS/DS-P: λ [94, 120], na który składa się N_w doświadczeń:

$$N_w = r(2^k + 2k + N_0), \quad (2.2)$$

- gdzie: r – liczba powtórzeń ($r = 3$),
 2^k – liczba doświadczeń w jądrze ($2^k = 16$),
 $2k$ – liczba doświadczeń w punktach gwiazdnych ($2k = 8$),
 N_0 – liczba doświadczeń w centrum planu ($N_0 = 2$).

W badaniach konstrukcyjnych czynniki sterowalne (x_c, x_w) można odnieść do powierzchni otworów honowanych cylindrów, uszczelnień tłoka oraz parametrów pracy wybranej pary kinematycznej, do których zaliczono:

- C_g, C_m i C_d badanych cylindrów (obrabiane przedmioty w badaniach wytwórczych),
- C_g, C_m i C_d badanych uszczelnień,
- stanowisko badawcze (rys. 2.3),
- własności i właściwości medium hydraulicznego oraz jego ciśnienie,
- sposób wytwarzania otworów w cylindrach (ECH, ECH+HS, HS),
- sposób honowania otworów (HD, HJW, HJP),
- kinematykę ruchu tłoka w cylindrze,
- prędkość \bar{v}_t tłoka w cylindrze,
- długość skoku tłoka,
- zacisk wstępny uszczelnienia,
- sposób usytuowania oraz mocowania uszczelnienia na tłoku i tłoka względem cylindra,
- temperaturę pracy pary kinematycznej,
- czas postoju lub pracy pary kinematycznej.

Do czynników zakłócających (x_z) można natomiast zaliczyć:

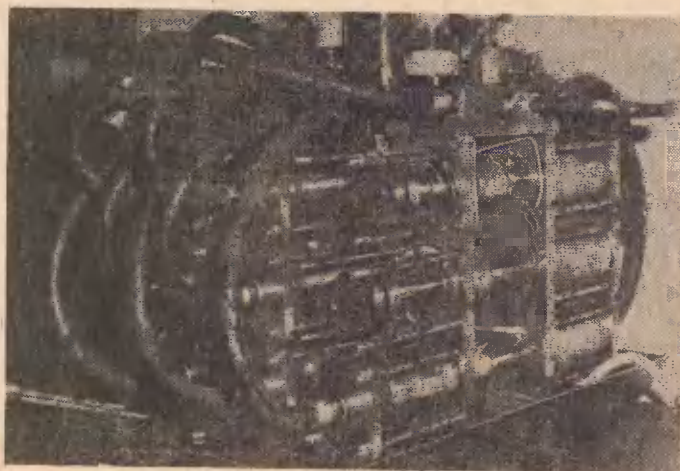
- zmiany właściwości medium hydraulicznego,
- zmiany temperatury otoczenia,
- obce pola magnetyczne itp.

Porównując czynniki sterowalne, występujące w badaniach konstrukcyjnych oraz wytwórczych, można zauważyć, że przypadek: cylinder-tłok z uszczelnieniem, stanowi inwersję mechaniczną relacji: narzędzie-otwór obrabiany cylindra. W szczególnych przypadkach można mówić także o inwersji elektrycznej, gdyż procesom tarcia towarzyszą także zjawiska termoelektryczne [22]. Fakt występowania w badaniach konstrukcyjnych przestrzeni wejść jakościowo podobnej do przestrzeni wejść w bada-

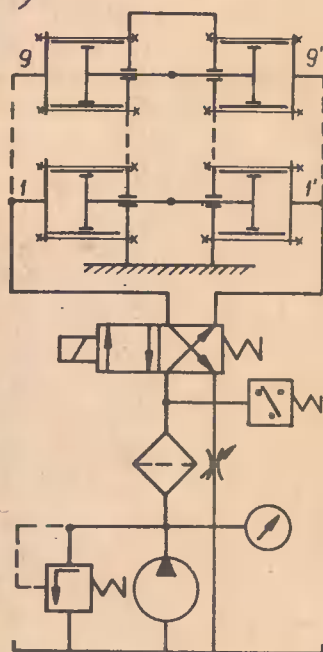
a)



c)



b)



Rys. 2.3. Stanowisko do badań konstrukcyjnych: a – widok ogólny, b – schemat hydrauliczny, c – widok stanowiska ze szczególnym uwzględnieniem tłoków i uszczelnień [38]

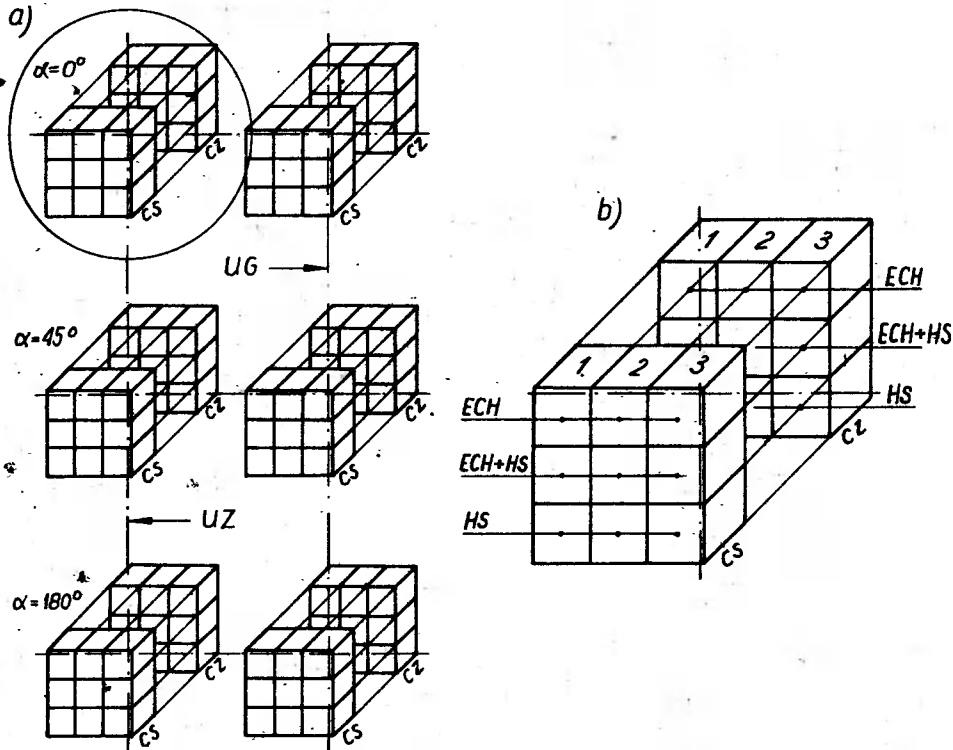
niach wytwórczyn oraz podobnej w obu badaniach przestrzeni przebiegów, upoważnia do stwierdzenia, z przyczyn jak wyżej, o niemożliwości zbudowania modelu dedukcyjnego badanej pary kinematycznej. Model indukcyjny będzie tworzony w postaci wyrażonej zależnością (2.1).

W badaniach konstrukcyjnych jako czynniki zmienne (x_w) wybrano:

- sposób wytwarzania (ECH, ECH+HS, HS),
- sposób honowania (HD, HJW, HJP),

- cechę materiałową cylindrów (CS, CZ),
- cechy konstrukcyjne uszczelnienia tłoka (UZ, UG).

Wyboru czynników dokonano w oparciu o dostępną literaturę, publikacje [33, 34, 35] oraz intuicję autora. Badania konstrukcyjne realizowano w oparciu o program badań statyczny, zdeterminowany, kompletny, zmiennowartościowy, oznaczony symbolem PS/DK-v. [94], na który składa się N_k doświadczeń (rys. 2.4):



Rys. 2.4. Schemat kojarzenia czynników w badaniach konstrukcyjnych: a – badane czynniki w poszczególnych blokach, b – badane czynniki w każdym bloku [38]

$$N_k = r \prod_{k=1}^{k=i} n_k, \text{ dla } n_k = \text{const}, r > 1 = \text{const}, \quad (2.3)$$

- gdzie: r – liczba powtórzeń ($r = 3$),
 k – liczba czynników badanych ($k = 4$),
 n_k – liczba poziomów badanych czynników (3, 3, 2, 2).

3. BADANIA WYTWÓRCZE PROCESU ELEKTROCHEMICZNEGO HONOWANIA

3.1. BADANE CZYNNIKI, ZAKRES ICH ZMIENNOŚCI ORAZ SPOSOBY POMIARU

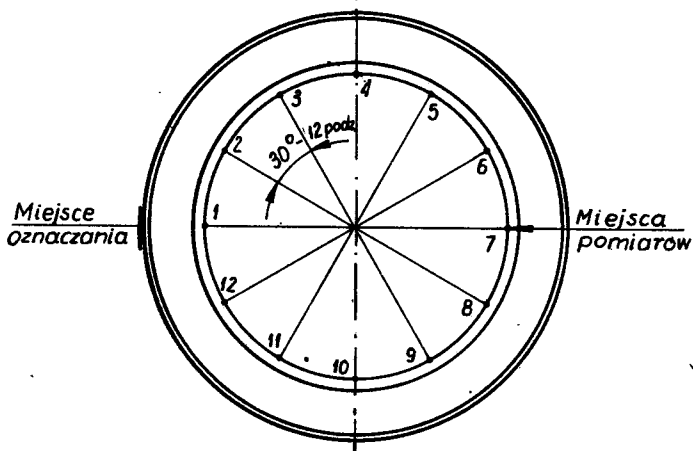
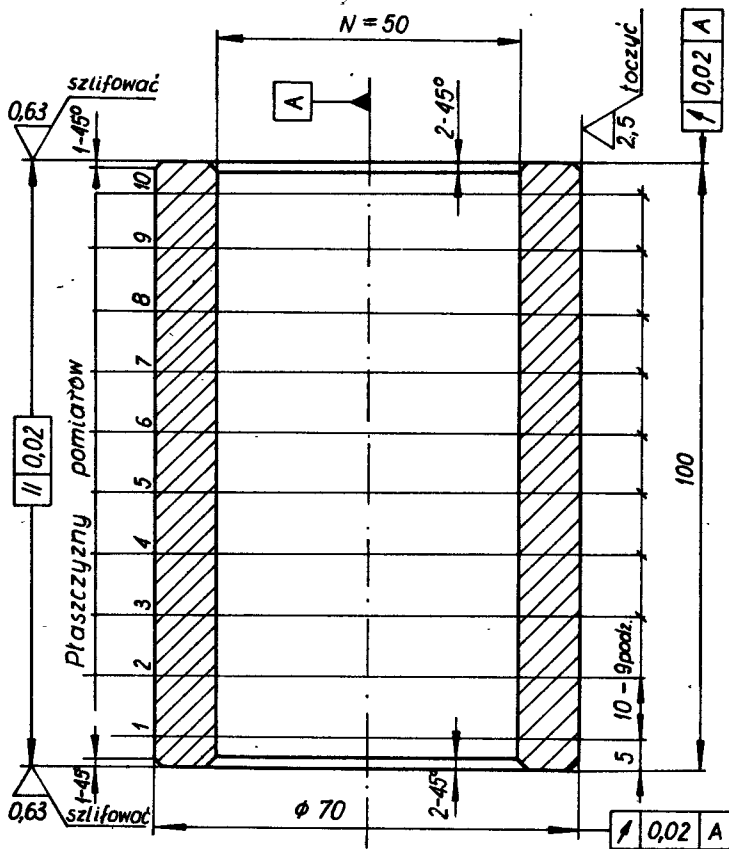
W badaniach wytwórczych do czynników stałych zakwalifikowano:

- C_g , C_m , i C_d próbek,
- C_g , C_m , i C_d narzędzia,
- elektrolit: sposób jego doprowadzenia, natężenie przepływu, temperatura, pH oraz zanieczyszczenie,
- stanowisko badawcze wraz z układem pomiarowym.

Spośród wielu obrabianych (przez autora) za pomocą ECH otworów (rys. 9.2) i materiałów (18HG, SW7Mo, 40H, Z1250 i inne), ostatecznie do badań przyjęto próbki o C_g przedstawionych na rys. 3.1 oraz C_m przedstawionych na rys. 3.2 ($e \div g$). Przyjęte w badaniach cechy geometryczne i materiałowe próbek wynikają z opracowania ankiety dotyczącej honowanych otworów w Polsce w latach 1975–80 [28]. Według tej ankiety przeważają wymiary otworów: $d = 50$, $l = 100$. W 25% materiałami honowanymi są stale, żeliwo stanowi 74%, inne 1%. Wśród stali wyróżnia się materiał 40H, obrabiany cieplnie.

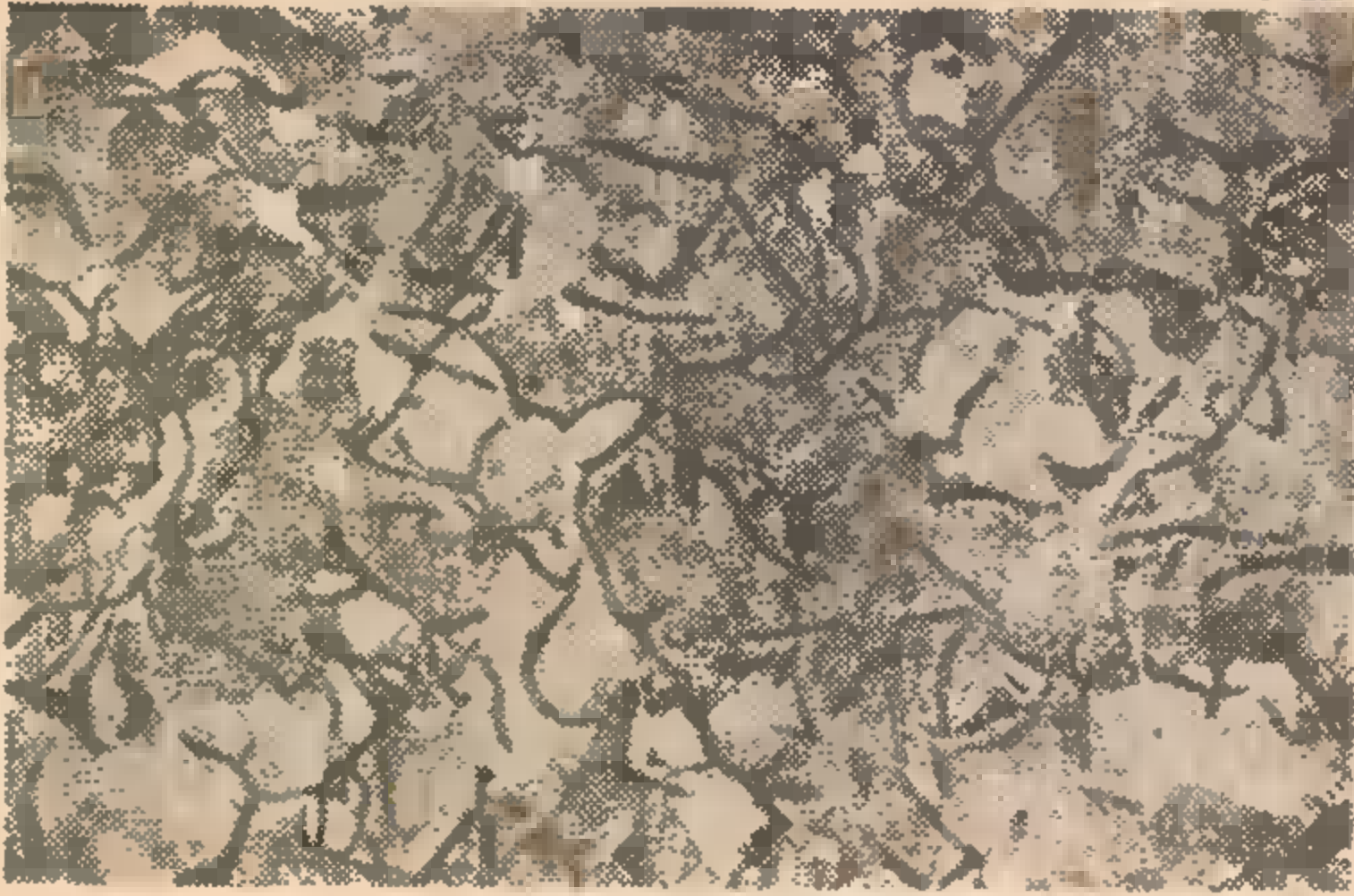
Otwory w próbkach do badań wytwórczych (po wyżarzaniu zmiękcującym) rozwiercano wstępnie i wykańczająco na wymiar 50H7. Następnie próbki mocowano na trzpieniu i toczono ich czola oraz powierzchnię zewnętrzną w celu zapewnienia równej grubości ścian próbek. Po cechowaniu, zahartowaniu oraz odpuszczeniu próbek, szlifowano ich powierzchnie czołowe w celu uzyskania dobrego przylegania próbek do powierzchni doprowadzającej energię elektryczną w uchwycie honownicy oraz poprawnego ich ustawiania na stole maszyny pomiarowej. Jak wykazały pomiary średnic otworów w próbkach po obróbce cieplnej, ich wymiary mieszczą się w 50H7, przy założonej odchyłce kształtu $\delta_r = \delta_w = \frac{1}{2}T$. Uzyskano także porównywalną chropowatość powierzchni otworów w próbkach, wynoszącą $R_a = (1,25 \div 5) \mu\text{m}$. Materiał 40H, z którego wykonano próbki, charakteryzuje się twardością w stanie zahartowanym równą ok. 57 HRC.

Doświadczenia przeprowadzono skonstruowanym przez autora narzędziem [27, 39] (rys. 6.2d), którego zalety wynikają z własnych badań teoretycznych. Zastosowano katodę pierścieniową o stałej średnicy, wybiegającą poza otwór obrabiany w punktach nawrotów narzędzia. Początkowa, minimalna grubość szczeliny międzyelektrodowej $s_0 = 0,15$ mm. Wymiar ten przyjęto w oparciu o badania teoretyczne oraz praktyczną możliwość realizacji procesu ECH. Katoda umieszczona jest pomiędzy segmentami ściernymi, utworzonymi przez pilniki ściernie usytuowane wchrowato względem osi narzędzia. Wchrowate osadzenie pilników ściernych w narzędziu umożliwia ECH otworów o powierzchniach nieciągłych, na co autor zwrócił uwagę w pracy [32]. W badaniach zastosowano szeroko wykorzystywane w kraju podczas HS pilniki (produkcji polskiej) o spoiwie ceramicznym, oznaczone 99C-F280/37-K-8-V. Badania

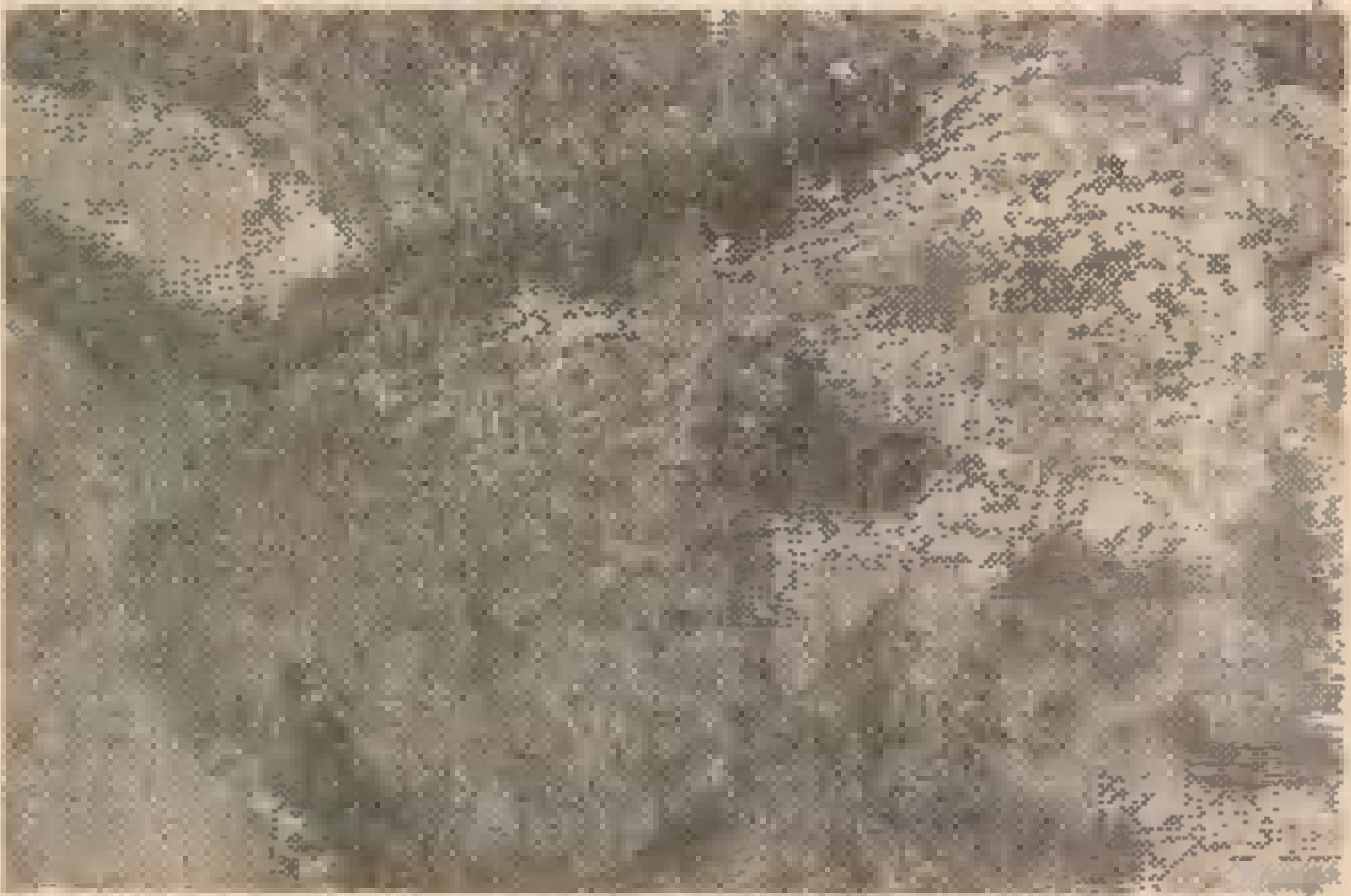


Rys. 3.1. Cechy geometryczne próbek do badań wytwórczych i konstrukcyjnych

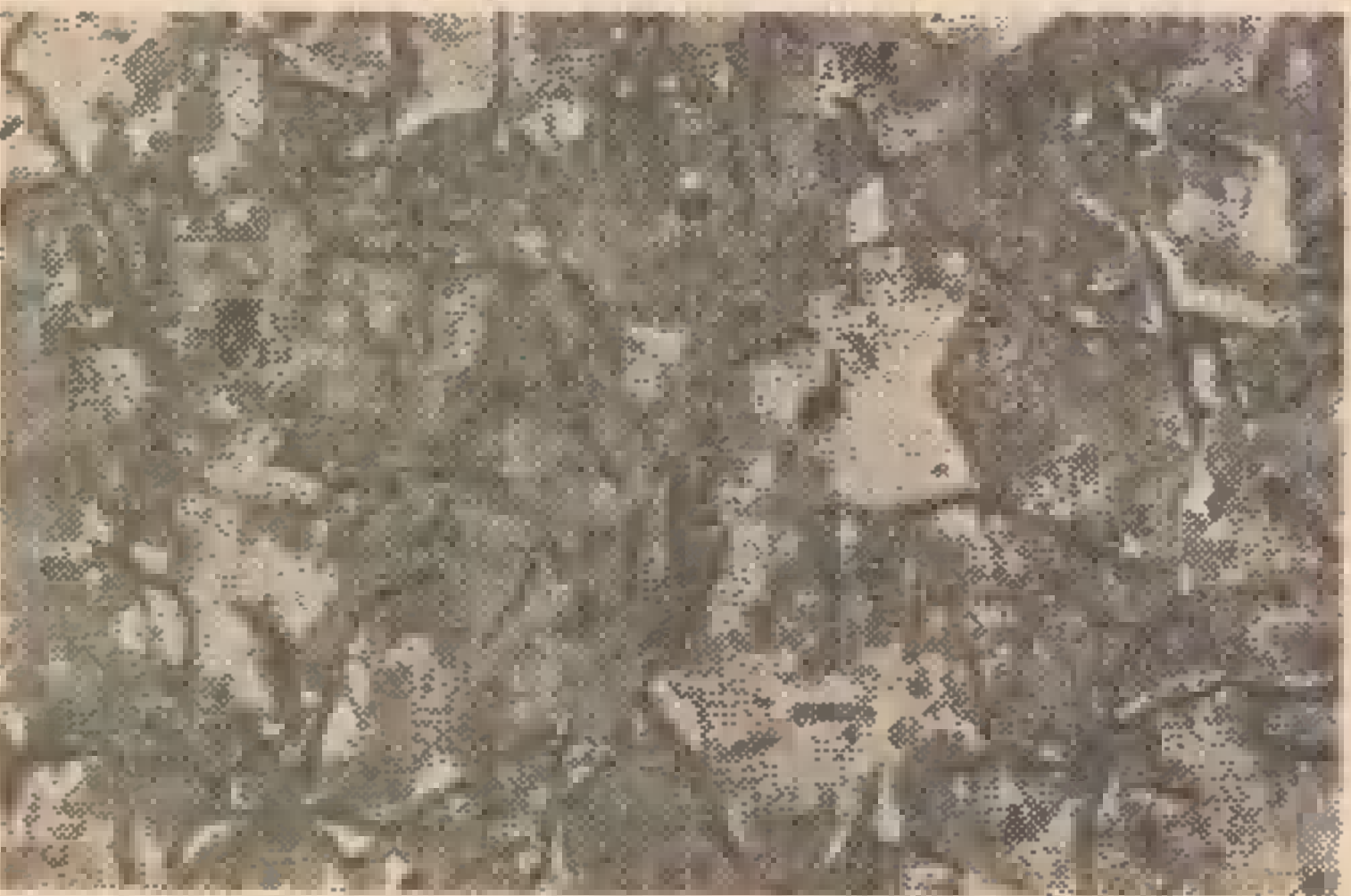
a)



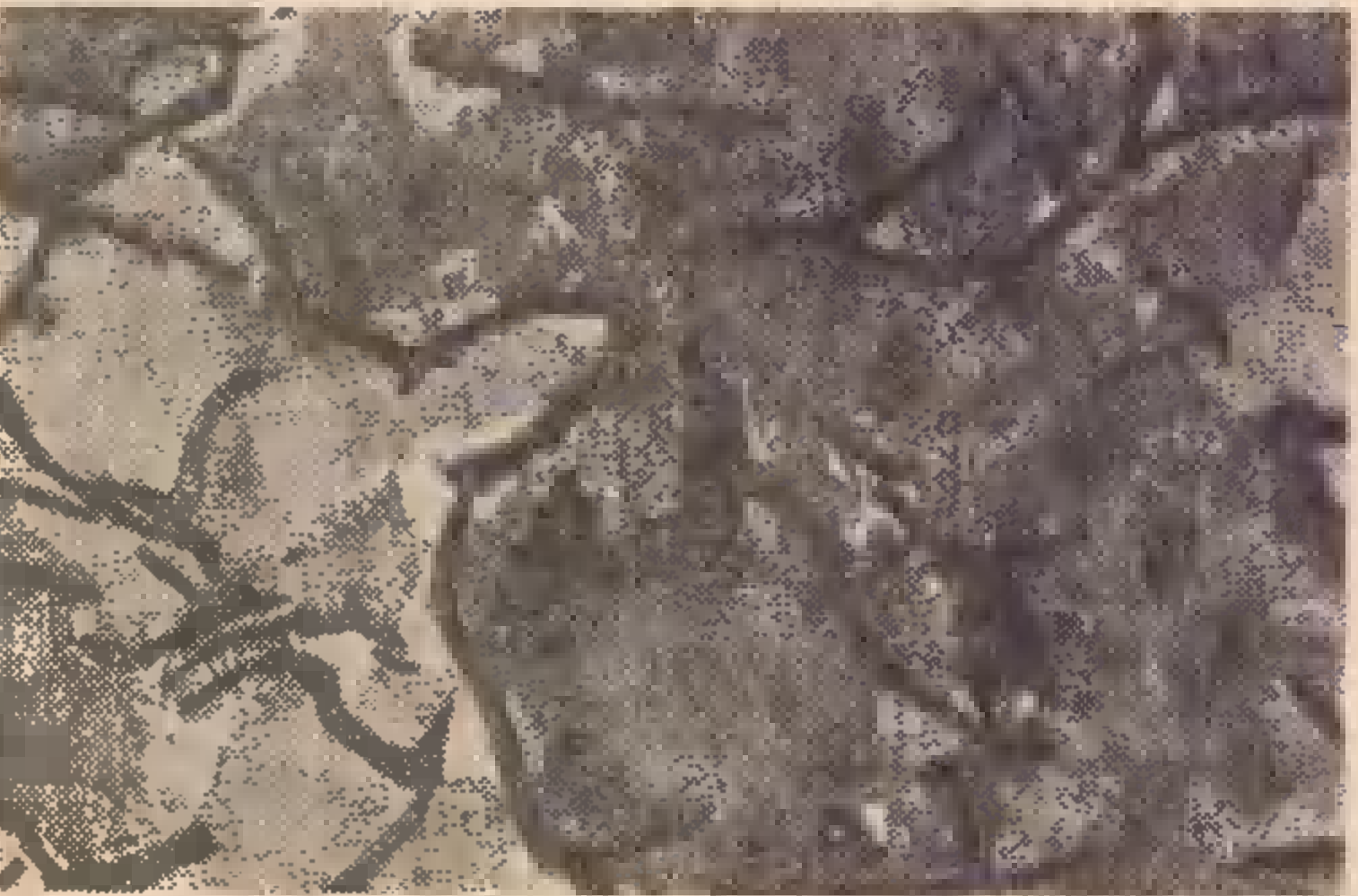
b)



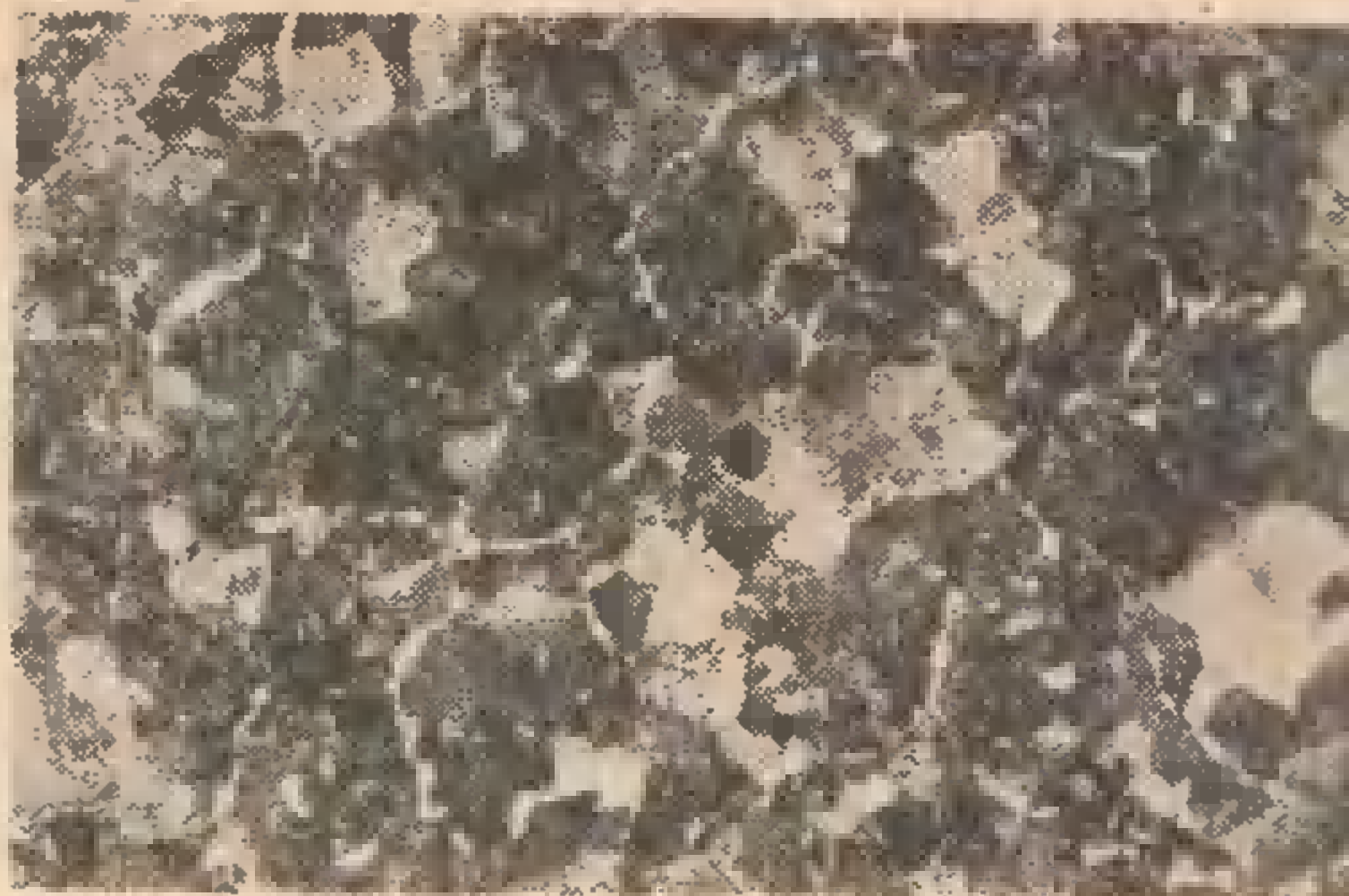
c)



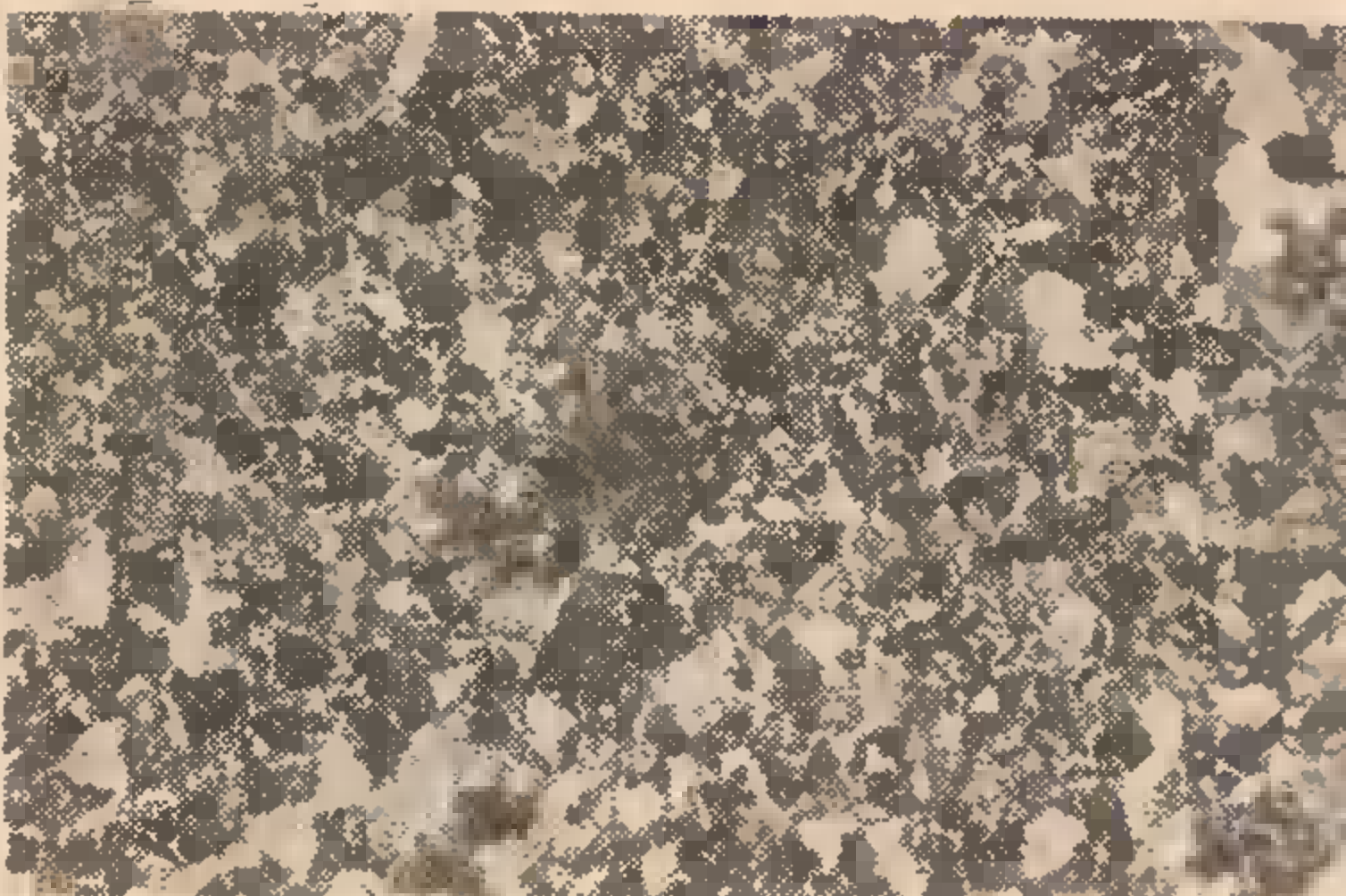
d)



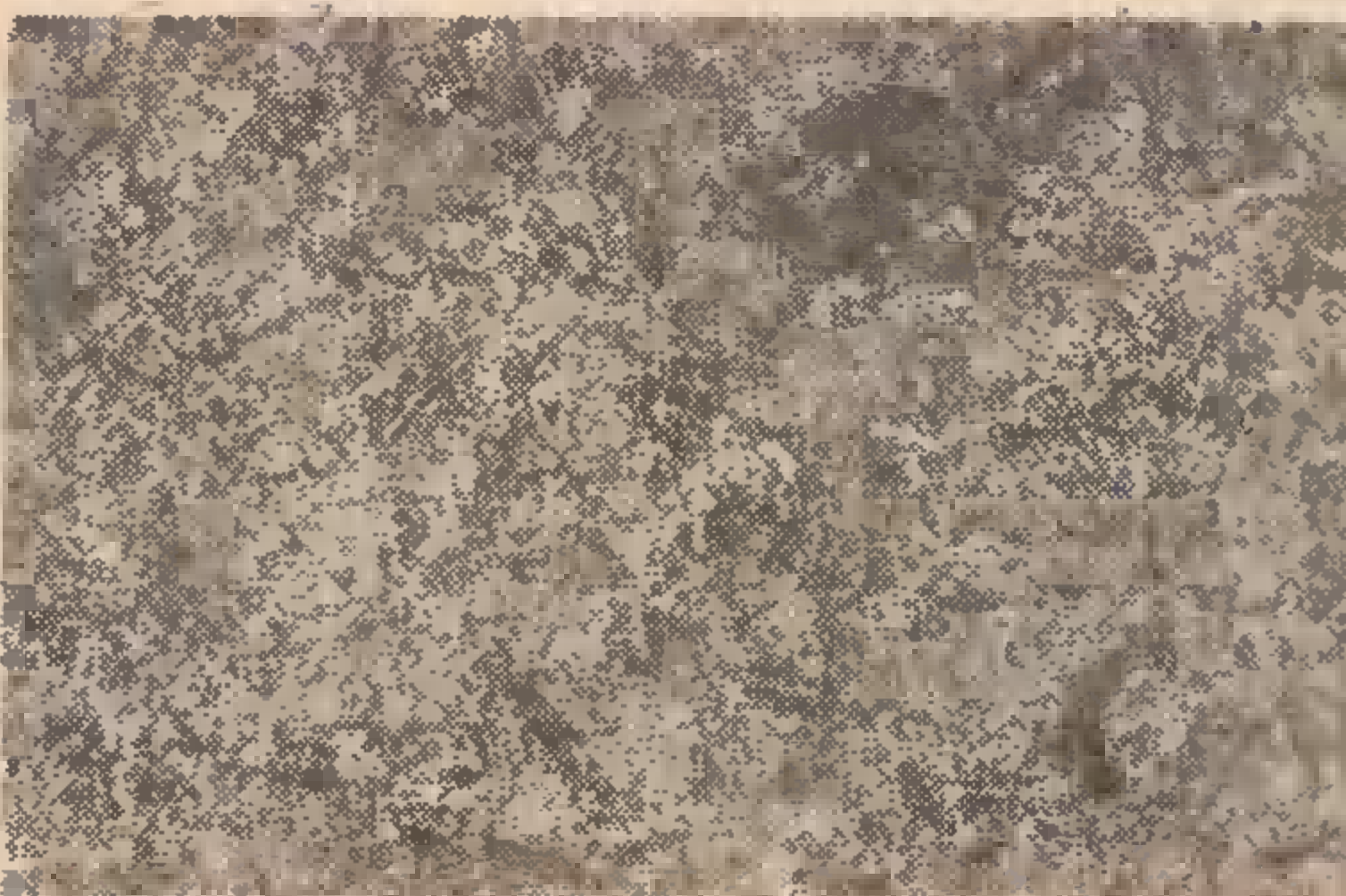
e)



f)



g)



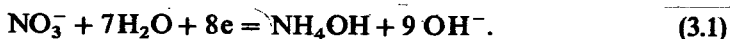
Rys. 3.2. Cechy materiałowe badanych próbek:
(a÷d) – żeliwo Z1250, (e÷g) – stal 40H;
a – pow. 75x, b – pow. 75^ox, (c, d) – pow. 200x,
e – pow. 200x, f – pow. 75x, g – pow. 375x.
Trawiono „nitałem”

ECH z innymi pilnikami o spoiwie ceramicznym oraz metalowym, w tym także o różnych wymiarach ziarna, omówiono w pracach [12, 38, 131]. W pracy [131] wykazano niewielki wpływ wymiarów ziarna pilników ściernych na chropowatość powierzchni ECH oraz ubytek masy przedmiotów obrabianych. W celu wyeliminowania wpływu przygotowania pilników ściernych na wyniki badań, każdorazowo po wymianie pakietów ściernych, wykonywano wstępne honowanie na próbkach dodatkowych, identycznych z przeznaczonymi do badań. Przeprowadzano także kontrolę bicia katody względem pakietów ściernych, przyjmując dopuszczalną wartość bicia $2e = \frac{1}{3}s_0$ (co wynika z rozdziału III).

Narzędzie połączone z obrabiarką za pomocą łącznika dwuprzegubowego, specjalnej konstrukcji opracowanej przy współudziale autora [39]. Przyjęcie napędu narzędzia za pomocą łącznika dwuprzegubowego wynika z C_p honowanego otworu i narzędzia oraz powszechności jego stosowania, szczególnie podczas obróbki otworów, w których $l \gg d$. Rysunek 2.2 przedstawia widok stanowiska badawczego, składającego się z honownicy EHCA63 oraz dodatkowych układów pomiarowych [14, 16, 27, 28].

Przyjęta stała długość skoku h narzędzia wynika z jego konstrukcji oraz C_p próbek. Spośród wielu możliwych do zastosowania w badaniach elektrolitów zdecydowano się na 20% wodny roztwór saletry amonowej NH_4NO_3 . Główną zaletą tego elektrolitu (sporządzonego w oparciu o dostępny nawóz rolniczy), nieszkodliwego dla naturalnego środowiska, są jego właściwości pasywujące, omówione w rozdziale III.7, oraz to, że przy jego stosowaniu w ECH zachodzi minimalne wydzielanie gazu na katodzie, co omówiono w rozdziale III.5. Przyjęty elektrolit cechuje się nieznacznie większą przewodnością właściwą od znanego z wysokiej wydajności prądowej elektrolitu niepasywującego opartego o chlorek sodowy NaCl (o tym samym stężeniu) i znacznie większą przewodnością niż szeroko stosowany pasywujący azotan sodowy NaNO_3 . O celowości wyboru do badań NH_4NO_3 przekonują ponadto publikacje [49, 59, 88]. Badania ECH z zastosowaniem elektrolitów NaCl oraz NaNO_3 omówiono w pracach [12, 38, 131].

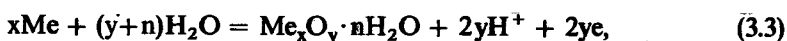
W przypadku zastosowania elektrolitu NH_4NO_3 na katodzie zachodzi głównie redukcja jonów azotanowych [80]:



Powstający wodorotlenek amonowy ulega częściowemu rozkładowi, z wytworzeniem amoniaku gazowego:



Na anodzie procesy przebiegają podobnie jak w roztworze NaNO_3 . Decyduje o tym anion NO_3^- . Powstająca pasywna błonka na powierzchni anody:



zmniejsza szybkość obróbki, zwiększając jednocześnie jej dokładność przez lokalizację obróbki w miejscach, gdzie występuje najmniejsza grubość szczeliny oraz depasywują-

ce działanie pilników ściernych. Na anodzie zachodzą równocześnie dwie następujące reakcje:



czyli wydzielanie gazowego tlenu i rozpuszczanie metalu.

Przyjęte w badaniach 20% stężenie elektrolitu oraz stałe natężenie jego przepływu, wynoszące $0,25 \text{ dm}^3/\text{s}$, wynikają z niepublikowanych badań autora, dotyczących wpływu stężenia i wydatku elektrolitu NH_4NO_3 na chropowatość powierzchni oraz ubytek masy obrabianych przedmiotów ze stali 40H i żeliwa Z1250. Zastosowane w badaniach stężenie oraz natężenie przepływu elektrolitu optymalizuje uzyskiwaną chropowatość powierzchni z wydajnością obróbki. Do strefy obróbki elektrolit doprowadzany jest od dołu, pod narzędzie, przez uchwyt próbki, a wypływa ze szczeliny międzyelektrodowej pod ciśnieniem atmosferycznym. Sposób ten, przy swej prostocie realizacji, zapewnia przepływ elektrolitu w kierunku najmniejszego wymiaru zastosowanej w narzędziu katody (rys. 5.4b), pomimo że powoduje zmianę prędkości v_e przepływu elektrolitu w szczelinie, stosownie do zwrotu \bar{v}_f (rys. 5.5). W czasie badań utrzymywano na stałym poziomie stopień zanieczyszczenia elektrolitu, jego stężenie, temperaturę oraz pH – utrzymując je na poziomie $6 \div 7$ przez zakwaszanie kwasem azotowym.

Do czynników zmiennych zakwalifikowano:

- sposób honowania (HD, HJW), charakteryzujący się kątem α skrzyżowania śladów obróbki na powierzchni obrabianej oraz w oparciu o analizę istotności czynników w ECM oraz HS;
- natężenie prądu roztwarzającego i ,
- prędkość skrawania v_e pilników ściernych,
- nacisk jednostkowy p na pilniki ścierne,
- czas obróbki t .

Dla sposobu honowania (HD, HJW) wartość kąta α przyjęto na dwóch poziomach: $\alpha = 90^\circ$, $\alpha = 180^\circ$. Kąt $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ jest typowy dla HD, współcześnie szeroko stosowanego. Przyjęta wartość $\alpha = 90^\circ$ jest średnią z granicznych jego wartości. Kąt $\alpha = 180^\circ$ jest charakterystyczny dla HJW, procesu jeszcze nie poznanego tak pod względem wytwórczym, jak i walorów konstrukcyjnych powierzchni wykonanej tym sposobem honowania. Zmiennymi charakteryzującymi HJW są: liczba K podwójnych skoków posuwisto-zwrotnych narzędzia oraz kąt β obrotu narzędzia po wykonaniu K skoków. W doświadczeniu przyjęto:

- $K = 1$, z uwagi na niepowtarzanie ruchów narzędzia w jednym jego położeniu,
- $\beta = 360^\circ/7$, odpowiadający najbardziej niekorzystnej wartości, równej kątowi rozstawienia pilników ściernych.

Przyjęte w badaniach natężenia prądu i ustalono w oparciu o zakres zmian jednostkowych gęstości j prądu elektrycznego, przypadających na jednostkę pola powierzchni katody zastosowanego narzędzia oraz przyjęty program badań. Wartości j przyjęto: $j_{\min} = 5 \text{ A/cm}^2$, $j_{\max} = 25 \text{ A/cm}^2$. Wybranie takiego zakresu zmian j wynika z braku

opisu w dostępnej literaturze podobnych badań, co uwidoczniło na rys. 1.4 (p. II. 1.1) oraz badań ECH z udziałem wybranego elektrolitu (NH_4NO_3) w spodziewanych stanach roztwarzania: aktywnym, pasywnym oraz transpasywnym. Wartości przyjętych natężeń prądu i wynoszą: $i = (100, 200, 300, 400, 500)$ A.

Prędkość v_f narzędzia przyjęto jednakową dla obu sposobów honowania. Przyjęcie tego założenia umożliwia ustalenie wpływu czasu t_p nawrotu katody na wydajność HD. Czas t_p nawrotu katody, dla zastosowanego w badaniach narzędzia, jest czasem, w którym katoda podczas ECH przebywa poza honowanym otworem. W badaniach przyjęto $t_p = \text{const}$. Wpływ tego czasu na wydajność ECH można łatwo ustalić, w funkcji przyjętych prędkości \bar{v}_f , dla HJW, w którym $\bar{v}_f = \bar{v}_e$. Dla HD, gdy $\alpha = 90^\circ$: $v_f = v$, $v_e = \sqrt{2}v_f = \sqrt{2}v$. Zakres prędkości v_f przyjęto zalecany dla HS [55] oraz ECH [48, 84, 90]. Wartości te, dla przyjętych pięciu poziomów, wynoszą (bez uwzględniania czasu nawrotu narzędzia):

- dla HJW, $v_e = (0,100; 0,145; 0,191; 0,237; 0,283)$ m/s,
- dla HD, $v_e = (0,141; 0,206; 0,270; 0,335; 0,400)$ m/s.

Pomiaru i rejestracji prędkości v i v_f dokonano za pomocą konwertorów i przekształtników (rys. 2.2b).

Minimalną wartość nacisku jednostkowego p , działającego na pilniki ścierne, przyjęto taką, która umożliwia prowadzenie narzędzia w otworze honowanym. Nacisk ten określono minimalną wartością ciśnienia medium zasilającego siłownik hydrauliczny układu rozpierania pilników ściernych w obrabiarce. Z uwagi na to, że pilniki wysuwają się swobodnie z korpusu narzędzia dopiero pod działaniem ciśnienia 0,75MPa, jako wartość minimalną ciśnienia do badań przyjęto 0,8MPa. Jako niedopuszczalną przyjęto wartość ciśnienia przewyższającą wytrzymałość mechaniczną narzędzia, a ściślej – wzrost momentu i siły wzdłużnej skrawania do wartości powodującej odrywanie pilników ściernych od podłoża. Graniczną wartością jest tu ciśnienie ponad 1,6 MPa. Ciśnieniom tym odpowiadają siły na popychaczu rozpierającym pilniki ścierne, odpowiednio: 51N, 869N. Obliczeniowe naciski jednostkowe p_j na pilniki wynoszą: $0,01 \div 0,2$ MPa. Wartość maksymalna obliczeniowego nacisku jednostkowego p_j odpowiada zalecanym naciskom dla HS w czasie „wyiskrzania” [47,55] oraz stosowanym podczas ECH [71,95]. Przyjęta wartość minimalna odpowiada naciskom stosowanym podczas polerowania elektrochemiczno-ściernego [63, 64, 65, 78]. Należy zaznaczyć, że przytoczone wyniki obliczeń nacisków jednostkowych pilników ściernych na powierzchnię obrabianą są jedynie orientacyjne, gdyż trudno jest w tak złożonym układzie (tarcie, odchyłki kształtu powierzchni honowanej, sposób przylegania pilników do powierzchni obrabianej itp) ustalić jego transmitancję. Szukanie modelu matematycznego w tym zakresie nie ma większego znaczenia dla realizacji procesu. Stąd też wartość wywieranego nacisku na pilniki ścierne przyjęto określać za pomocą ciśnienia medium w siłowniku układu je rozpierającym, ustalając wartość tego ciśnienia na pięciu poziomach, w sposób omówiony wyżej. Wartości tych ciśnień wynoszą: $p = (0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6)$ MPa.

W celu oszacowania minimalnego czasu obróbki, spełniającego kryterium prądowej próby, polegającego na „zabieleniu” całej powierzchni honowanego otworu,

dokonano prób ECH w zakresie przewidywanego, nieoptymalnego układu parametrów zmiennych, stosownie do przyjętego programu doświadczeń. Minimalnym okazał się czas $t = 60$ s. Maksymalny czas ECH ustalono praktycznie i przyjęto 300 s. Wynika on z możliwości dokładniejszego ustalenia wpływu czasu przebywania katody (dla przyjętego w badaniach narzędzia) poza, obrabianym otworem na wydajność ECH. Stąd też jako czasy obróbki przyjęto: $t = (60, 120, 180, 240, 300)$ s. Dla HJW czas obróbki powiększono o niezbędny czas postoju narzędzia po każdym ruchu posuwisto-zwrotnym, potrzebny na: promieniowe wycofanie pilników ściernych, obrót narzędzia o kąt β , dosunięcie pilników ściernych. Wycofanie pilników ściernych przed obrotem narzędzia jest konieczne ze względu na wyeliminowanie powstawania śladów obróbki, charakterystycznych dla HJP. Z uwagi na wcześniejsze prace autora i jego współpracowników [33, 34, 38], a także wyniki badań omówione dalej, każdą próbę ECH kończono z wyłączonym prądem i . Dla przypadku HD czas ten wynosi 60 s, dla HJW wynika on z jednego pełnego cyklu pracy narzędzia ($K = 1; 6\beta$).

Zgodnie z modelem cybernetycznym (rys. 2.1), do parametrów wyjściowych zaliczono:

- wydajność ECH oraz siły i momenty towarzyszące temu procesowi,
- makrogeometrię otworów honowanych,
- mikrogeometrię powierzchni po honowaniu.

Wydajność ECH określono na podstawie różnicy masy próbek przed i po honowaniu, przez ich kilkakrotne ważenie z dokładnością do 0,1 g. Jest to dokładność wystarczająca, gdyż zmiana masy próbki o wartość 0,1 g odpowiada zmianie średnicy otworu ($d = 50, l = 100$) o wartość 0,0016 mm, przy przyjętej masie właściwej 7,5 g/cm³.

Poszczególne wartości momentów M_0 oraz sił P_x towarzyszących ECH ustalono na podstawie kwantowania zapisów analogowych (rys. 2.2b).

Makrogeometrię honowanych otworów ustalono za pomocą pomiarów na maszynie pomiarowej (JOTA – P, dokładność 3,5 μ m) oraz obliczeń numerycznych*. Odchyłki kształtu obejmują:

- odchyłkę okrągłości δ , względem okręgu średniego, ustaloną dla dziesięciu płaszczyzn każdej próbki (rys. 3.1) za pomocą 12-punktowej metody pomiarowej na maszynie pomiarowej [87, 127]. Jako odchyłkę okrągłości δ , próbki przyjęto największą odległość bezwzględną pomiędzy wartością uzyskaną z pomiaru, a promieniem obliczonego numerycznie (metodą sumy najmniejszych kwadratów) okręgu średniego, występującą w jednej z dziesięciu płaszczyzn pomiarowych próbki. Dla każdej próbki ustalono także średnią odchyłkę okrągłości ($\delta_{\text{śr}}$), świadczącą o odchyłkach okrągłości próbki w pozostałych jej płaszczyznach;
- odchyłkę walcowości δ_w , względem walca średniego, ustaloną w oparciu o w/w pomiary i obliczenia numeryczne. Jako odchyłkę walcowości δ_w przyjęto bezwzględną wartość największej odległości pomiarowej od walca średniego,

* Programy obliczeniowe wykorzystano z pracy doktorskiej (której promotorem jest autor) R. Wocianiec: Wpływ wybranych parametrów, w szczególności kształtu narzędzia, na dokładność kształtowo-wymiarową otworów honowanych elektrochemicznie, IOS, Kraków.

ustalonej metodą sumy najmniejszych kwadratów. Dla każdej próbki, z przyczyn jak wyżej, ustalono także średnią odchyłkę walcowości ($\delta_{w\bar{n}}$) – z uwzględnieniem wszystkich dziesięciu płaszczyzn pomiarowych próbki;

- odchyłkę prostoliniowości osi (δ_p), ustaloną numerycznie w oparciu o średnicę walca obrotowego, opisanego na środkach okręgów średnich. Jako odchyłkę prostoliniowości osi δ_p przyjęto maksymalną średnicę tego walca. Dla każdej próbki ustalono także podwojoną średnią odległość ($\delta_{p\bar{n}}$) środka okręgu średniego od osi walca określającą prostoliniowość osi δ_p .

Dla wszystkich badanych próbek (biorących udział w doświadczeniu) ustalono także wartości średnie poszczególnych odchyłek ($\delta_{r\bar{n}}, \delta_{r' \bar{n}}, \delta_{w\bar{n}}, \delta_{w' \bar{n}}, \delta_{p\bar{n}}, \delta_{p' \bar{n}}$). Wyróżniono również uzyskane wartości maksymalne ($\delta_{r\max}, \delta_{r' \max}, \delta_{w\max}, \delta_{w' \max}, \delta_{p\max}, \delta_{p' \max}$) oraz minimalne ($\delta_{r\min}, \delta_{r' \min}, \delta_{w\min}, \delta_{w' \min}, \delta_{p\min}, \delta_{p' \min}$) tych odchyłek.

Mikrogeometrię powierzchni po honowaniu oceniano [89] w każdym otworze w trzech płaszczyznach (1;5 ÷ 6;10 – pokazanych na rys. 3.1) i w trzech miejscach na obwodzie (rozstawionych co 120°). W każdym otworze ustalono wartości średnie parametrów: R_a, R_{\max} oraz nośność liniową profilu N_{L20} oraz N_{L50} po czym uśredniano je w ramach powtórzeń, dla każdego skojarzenia badanych czynników. Biorąc pod uwagę wszystkie skojarzenia badanych czynników ustalono: wartości średnie ($R_{a\bar{n}}, R_{\max\bar{n}}, N_{L20\bar{n}}, N_{L50\bar{n}}$), maksymalne ($R_{a\max}, R_{\max\max}, N_{L20\max}, N_{L50\max}$) oraz minimalne ($R_{a\min}, R_{\max\min}, N_{L20\min}, N_{L50\min}$) tych parametrów.

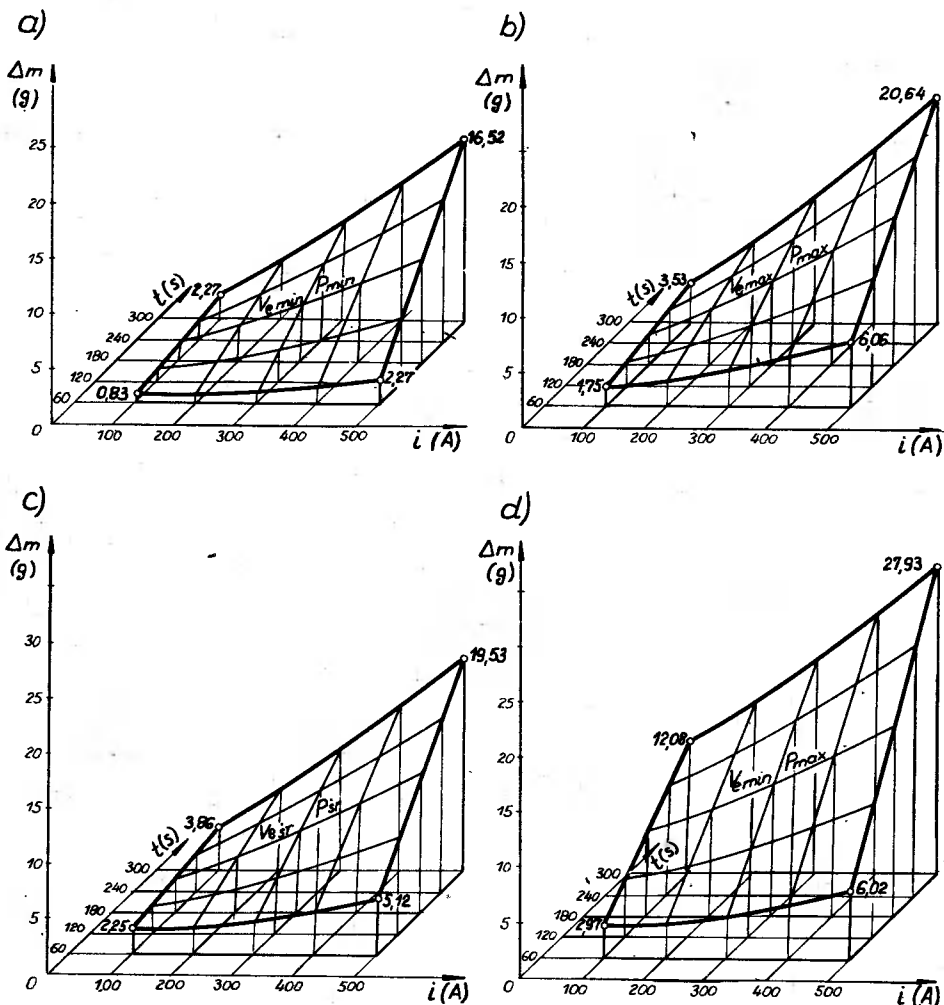
3.2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Badania przeprowadzono w oparciu o program PS/DS–P: λ [94, 120]. Z uwagi na objętość pracy niżej przytoczono jedynie niektóre, ważniejsze wyniki badań.

Rysunki 3.3 ÷ 3.6 przedstawiają wpływ badanych parametrów ECH na ubytek masy Δm przedmiotów, w których otwory honowano dwukierunkowo (HD). Na każdym z tych rysunków przedstawiono wpływ na Δm dwóch badanych parametrów, przy wartościach parametrów pozostałych: minimalnych, maksymalnych, średnich oraz interesujących ze względu na ich praktyczne wykorzystanie.

Z rys. 3.3 wynika, że jeżeli natężenie prądu i lub czas t obróbki rosną, wówczas Δm również rośnie. Jest to wniosek oczywisty, wypływający ze znanej zależności (6.1). Potwierdza on jedynie poprawność przeprowadzonych doświadczeń i obliczeń numerycznych. Analizując rys. 3.3 można zauważyć, że poszczególne przyrosty Δm nie są stałe i proporcjonalne do zmian natężenia prądu i . Wynikać to może nie tylko z wydajności prądowej procesu ECM [68], ale także z wpływu początkowych (znacznych) odchyłek kształtu honowanych otworów oraz jednostkowej gęstości j prądu elektrycznego na przebieg i wyniki ECH. Te ostatnie mogą być tutaj decydujące. Na rys. 3.3 można także zauważyć, że ubytek masy Δm nie jest proporcjonalny do czasu t obróbki. Brak tej proporcjonalności w ECH (w porównaniu z ECM) wynika z następujących zależności:

$$t = \sum t_r + \sum t_p \quad (3.6)$$



Rys. 3.3. Wpływ natężenia prądu elektrycznego i oraz czasu t obróbki na ubytek masy Δm honowanych dwukierunkowo za pomocą ECH otworów, dla przypadków: a) v_{\min} P_{\min} ; b) v_{\max} P_{\max} ; c) v_{\min} P_{\min} ; d) v_{\min} P_{\max} .

lub

$$t = k(t_r + t_p), \quad (3.7)$$

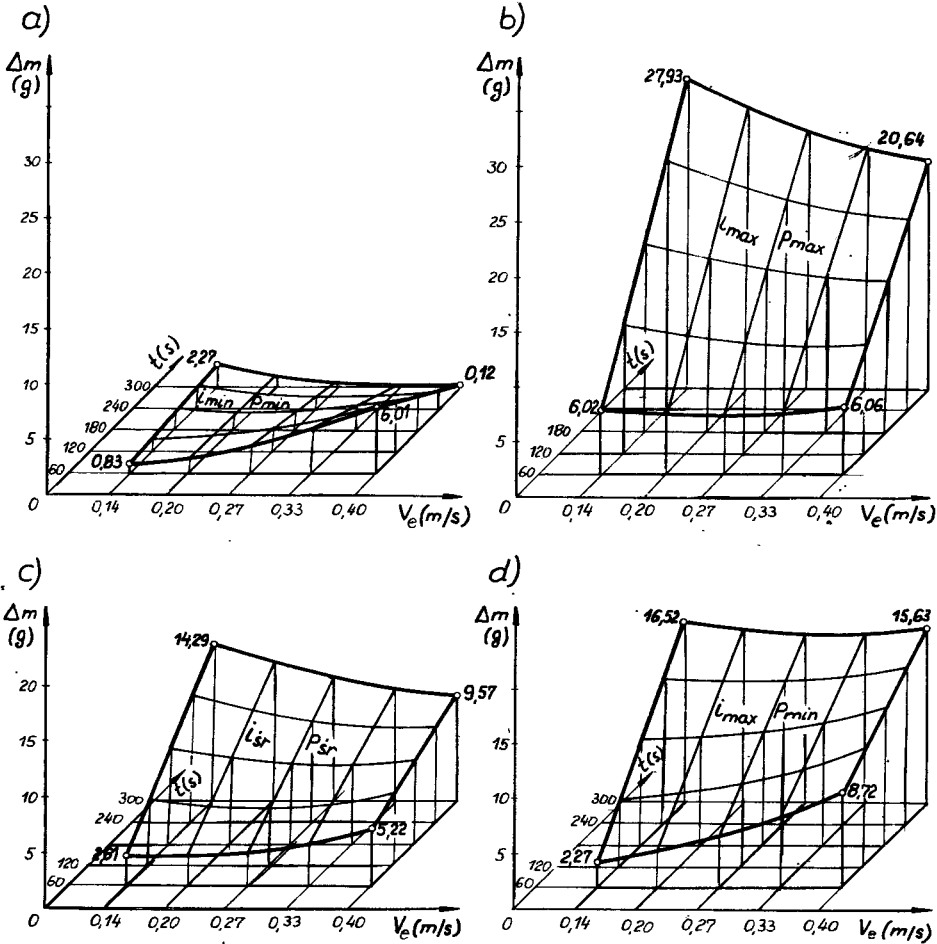
gdzie: t – czas obróbki,
 t_r – czas roztwarzającego działania katody dla jednego skoku narzędzia,
 t_p – czas przebywania katody poza honowanym otworem (o stałej wartości),
niezbędny dla dokonania zmiany zwrotu wektora prędkości \vec{v}_f ,
 k – liczba naturalna.

Czas t_r , roztwarzającego działania katody, dla narzędzia z rys. 6.2d, można wyznaczyć ze wzoru:

$$t_r = \frac{l + l_h}{v_f}, \quad (3.8)$$

gdzie: l – długość obrabianego otworu,
 l_h – długość katody.

Czas t_r (3.8) wpływa na ubytek masy Δm , zgodnie z zależnością (6.1) i nie jest równoważny czasowi t_e , wyrażonemu zależnością (6.16). W tym ostatnim przypadku jest to czas oddziaływania katody na każdą elementarną długość dl honowanego otworu, na skutek czego następuje przyrost średnicy Δd .

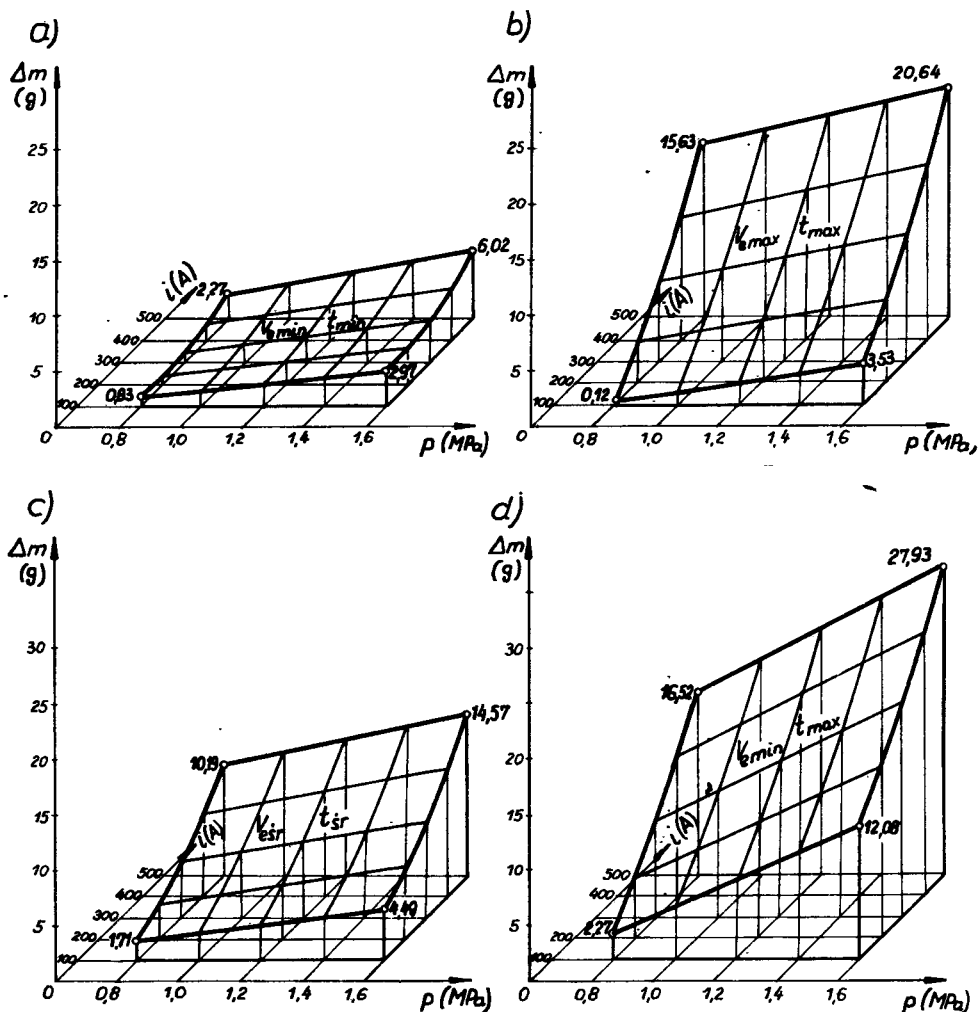


Rys. 3.4. Wpływ prędkości skrawania v_e oraz czasu t obróbki na ubytek masy Δm honowanych dwukierunkowo za pomocą ECH otworów, dla przypadków: a) i_{\min}, P_{\min} ; b) i_{\max}, P_{\max} ; c) i_{sr}, P_{sr} ; d) i_{\max}, P_{\min}

Występowanie w czasie t czasu t_p (3.6) prowadzi do skrócenia czasu t_r , oddziaływania katody na otwór obrabiany. Ponadto należy zauważyć, że uzyskane odpowiednie przyrosty Δm dla $v_{e\min}$ są w przewodzie większe od przyrostów Δm dla $v_{e\max}$ (rys. 3.3b i d). Wytlumaczyć to można za pomocą rys. 3.4 oraz zależności (3.6 ÷ 3.8).

Zmiana wartości prędkości v_r powoduje nie tylko zmianę czasu t_r (3.8), powodującą zmianę Δm , ale przy stałym czasie t_p (co założono wyżej), zmienia także stosunek t_r/t_p . Prowadzi to do dalszych zmian przyrostów Δm . Widoczne jest to szczególnie dla ECH w czasie t_{\max} (rys. 3.4), w którym spadek przyrostu Δm w funkcji v_e jest największy. W małym przedziale czasu (t_{\min}) wzrost v_e nie wpływa tak znacząco na zmianę stosunku t_r/t_p , a tym samym Δm . Obserwuje się nawet, wraz ze wzrostem v_e (dla t_{\min}), wzrost wartości Δm .

Wpływ nacisku jednostkowego pilników ściernych na Δm (rys. 3.5) jest duży. Wręcz ze wzrostem p obserwuje się wzrost Δm . Pewne wątpliwości może budzić fakt wielokrotnego wzrostu Δm przy zaledwie dwukrotnym wzroście wartości p , oznaczonej na tym rysunku. Należy zauważyć, że ciśnieniu $p = 0,8$ MPa medium układu rozpierania



Rys. 3.5. Wpływ nacisku jednostkowego (ciśnienia p medium układu rozpierania pilników) na ubytek masy Δm honowanych dwukierunkowo za pomocą ECH otworów, dla przypadków: a) $v_{e\min}$, t_{\min} ; b) $v_{e\max}$, t_{\max} ; c) $v_{e\min}$, t_{sr} ; d) $v_{e\min}$, t_{\max}

pilników ściernych odpowiada obliczeniowy nacisk na pilniki $p_j = 0,011 \text{ MPa}$, zaś $p = 1,6 \text{ MPa}$ odpowiada wartości $p_j = 0,196 \text{ MPa}$. Jest to wzrost kilkunastokrotny.

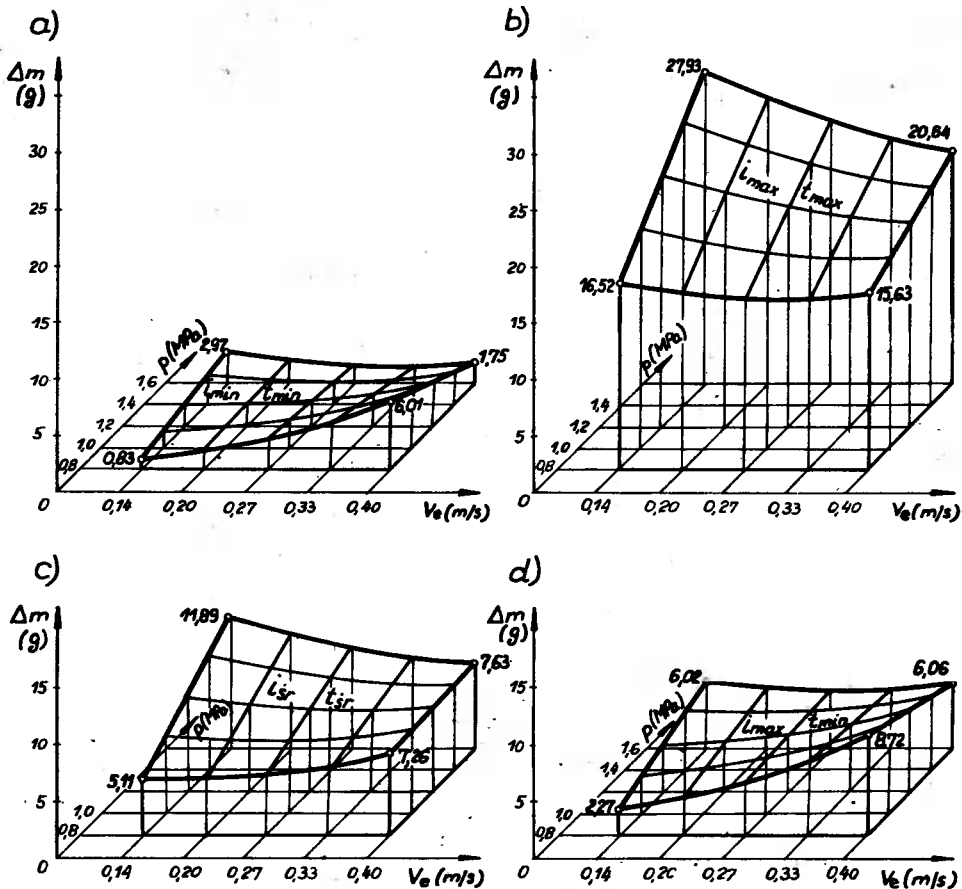
Rysunek 3.6 przedstawia wpływ parametrów mechanicznych v_e oraz p na Δm dla różnych wartości i oraz t .

Zależność (3.9) przedstawia model matematyczny, ujmujący wpływ badanych parametrów na Δm dla HD, zaś zależność (3.10) dla HJW, przy przyjętym poziomie ufności 0,95:

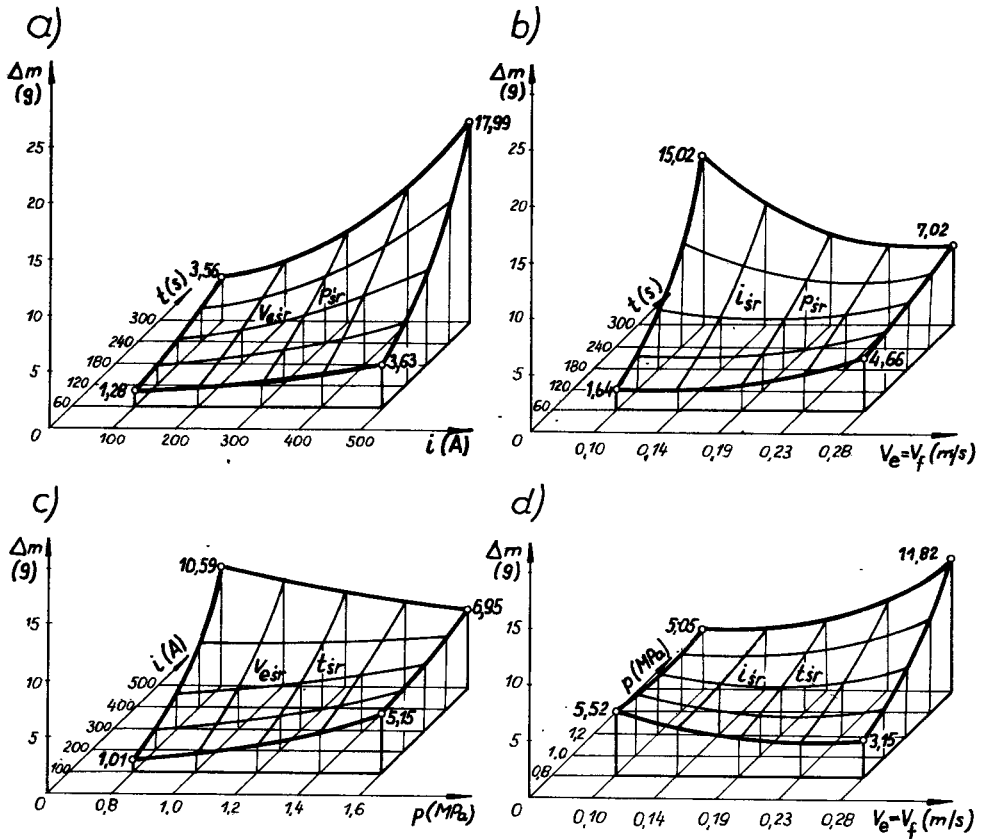
$$\Delta m_{HD} = 7,333 - 0,263\check{v}_e + 0,894\check{p} + 2,319\check{i} + 2,002\check{t} + 0,222\check{v}_e^2 - 0,061\check{p}^2 + 0,163\check{i}^2 - 0,073\check{t}^2 - 0,400\check{v}_e\check{p} + 0,079\check{v}_e\check{i} - 0,458\check{v}_e\check{t} + 0,100\check{p}\check{i} + 0,479\check{p}\check{t} + 0,800\check{i}\check{t} \text{ [g]}, \quad (3.9)$$

$$\Delta m_{HJW} = \exp(1,486 + 0,034\check{v}_e + 0,153\check{p} + 0,332\check{i} + 0,327\check{t} + 0,064\check{v}_e^2 - 0,0001\check{p}^2 + 0,001\check{i}^2 - 0,015\check{t}^2 + 0,088\check{v}_e\check{p} - 0,017\check{v}_e\check{i} - 0,111\check{v}_e\check{t} - 0,128\check{p}\check{i} + 0,050\check{p}\check{t} + 0,036\check{i}\check{t}) \text{ [g]}, \quad (3.10)$$

gdzie: $\check{v}_e, \check{p}, \check{i}, \check{t}$ – standaryzowane wartości zmiennych wejściowych.



Rys. 3.6. Wpływ prędkości skrawania v_e oraz nacisku jednostkowego (ciśnienia p medium układu rozpierania pilników) na pilniki ściernie na ubytek masy Δm honowanych dwukierunkowo za pomocą ECH otworów, dla przypadków: a) i_{\min}, t_{\min} ; b) i_{\max}, t_{\max} ; c) i_r, t_r ; d) i_{\max}, t_{\min}



Rys. 3.7. Wpływ poszczególnych parametrów zmiennych (dla pozostałych na poziomie średnim) na ubytek masy Δm otworów honowanych jednokierunkowo wzdłużnie za pomocą ECH

Standaryzacji poszczególnych zmiennych wejściowych dokonuje się w oparciu o zależności:

$$\check{x}_i = \frac{x_i - x_{i0}}{s_i}, \quad (3.11)$$

$$x_{i0} = \frac{x_{imax} + x_{imin}}{2}, \quad (3.12)$$

$$s_i = \frac{x_{imax} - x_{imin}}{2\varrho}, \quad (3.13)$$

$$\varrho = \sqrt[4]{2^k}. \quad (3.14)$$

gdzie: \check{x}_i – standaryzowana wartość i -tej zmiennej wejściowej,
 x_i – rzeczywista wartość i -tej zmiennej wejściowej,
 x_{imax} , x_{imin} , x_{i0} – maksymalna, minimalna i średnia wartość i -tej zmiennej wejściowej,
 s_i – jednostkowy skok i -tej zmiennej,
 ϱ – wartość promienia gwiazdowego,
 k – liczba zmiennych.

Poddając otrzymane wyniki badań testowaniu istotności wpływu poszczególnych

zmiennych na Δm za pomocą testu F – Snedecora można stwierdzić, że istotny wpływ na Δm dla HD wykazują:

- dla zmiennych w potęgde pierwszej: natężenie prądu i , nacisk p oraz czas t ,
- dla zmiennych w potęgde drugiej istotności wpływu nie stwierdzono,
- interakcje zmiennych są istotne dla natężenia prądu i oraz czasu t .

Dla HJW istotny wpływ wykazują:

- dla zmiennych w potęgde pierwszej jak dla HD,
- dla zmiennych w potęgde drugiej istotny wpływ wykazuje prędkość v_e , która w tym przypadku $\bar{v}_e = \bar{v}_j$,
- interakcje zmiennych są istotne dla: $(v_e \wedge p)$, $(v_e \wedge t)$, $(p \wedge i)$.

Rysunek 3.7 przedstawia wpływ niektórych badanych parametrów na Δm , dla pozostałych parametrów o wartościach średnich.

Porównując rys. 3.3c i 3.4c z rys. 3.7a i b, można zauważyć bardzo duże podobieństwo ich postaci dla obu sposobów honowania (HD, HJW). Wpływ v_e na Δm okazuje się wyraźniejszy dla HJW aniżeli w przypadku HD. Przekonuje o tym rys. 3.7c i d. Widoczny jest tutaj także większy wpływ czasu t obróbki na ostateczne wartości i przyrosty Δm .

Wpływ niektórych parametrów wejściowych na wartość średnią momentu obrotowego M_0 dla HD przedstawia rys. 3.8. Wartości średnie poszczególnych M_0 ustalono na podstawie kwantowania zapisu analogowego (rys. 2.2). Przedstawione na rys. 3.8 wartości M_0 dotyczą ostatniego ruchu posuwisto-zwrotnego narzędzia podczas ECH (a ÷ c) oraz ostatniego ruchu posuwisto-zwrotnego narzędzia kończącego obróbkę z wyłączonym prądem elektrycznym (ECH+ HS), po upływie 60s od zakończenia ECH (d ÷ f). Zależności (3.15) i (3.16) przedstawiają równania regresji dla obu omówionych przypadków:

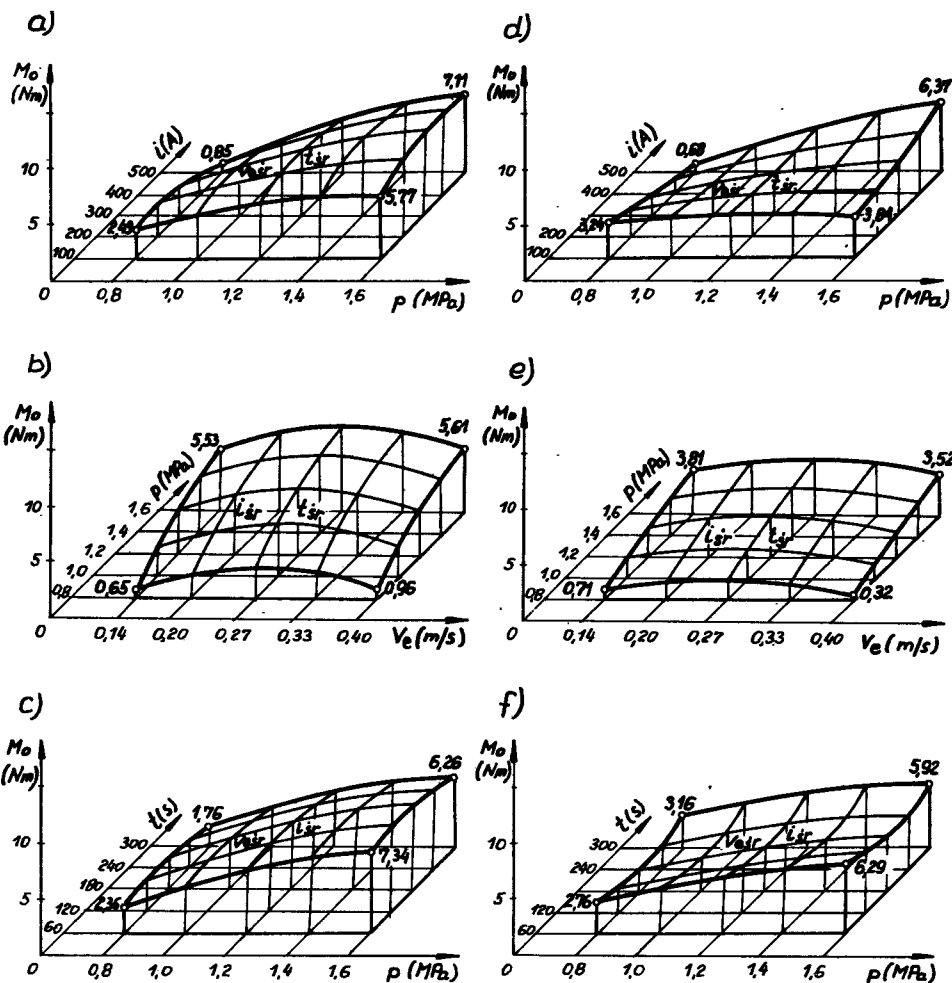
$$\begin{aligned}
 M_{0ECH} = & 6,080 + 0,049\check{v}_e + 1,192\check{p} - 0,036\check{i} - 0,202\check{t} - \\
 & - 0,508\check{v}_e^2 - 0,213\check{p}^2 - 0,291\check{i}^2 - 0,201\check{t}^2 - \\
 & - 0,014\check{v}_e\check{p} - 0,143\check{v}_e\check{i} + 0,026\check{v}_e\check{t} + 0,185\check{p}\check{i} - \\
 & - 0,033\check{p}\check{t} - 0,136\check{i}\check{t} \text{ [Nm]}, \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{0(ECH+HS)} = & 3,819 - 0,087\check{v}_e + 0,786\check{p} - 0,003\check{i} + 0,004\check{t} - \\
 & - 0,300\check{v}_e^2 - 0,130\check{p}^2 + 0,060\check{i}^2 + 0,310\check{t}^2 + \\
 & + 0,006\check{v}_e\check{p} - 0,103\check{v}_e\check{i} - 0,043\check{v}_e\check{t} + 0,317\check{p}\check{i} - \\
 & - 0,048\check{p}\check{t} - 0,194\check{i}\check{t} \text{ [Nm]}, \quad (3.16)
 \end{aligned}$$

w których poszczególne zmienne wejściowe standaryzowane są w oparciu o zależności (3.11 ÷ 3.14).

Testując istotność wpływu poszczególnych zmiennych wejściowych (dla poziomu ufności 0,95), wg testu jak wyżej, można stwierdzić, że w obu przypadkach istotny wpływ na M_0 wykazuje, poza wolnym wyrazem, jeszcze tylko nacisk jednostkowy p na pilniki ściernie.

Analizując rys. 3.8, a w szczególności zestawione parami odpowiednie wykresy M_0 , można zauważyć, oprócz dużego ich podobieństwa, że M_0 maleje w funkcji natężenia prądu i jedynie dla małego nacisku p (rys. 3.8a). W przypadku stosowania dużych

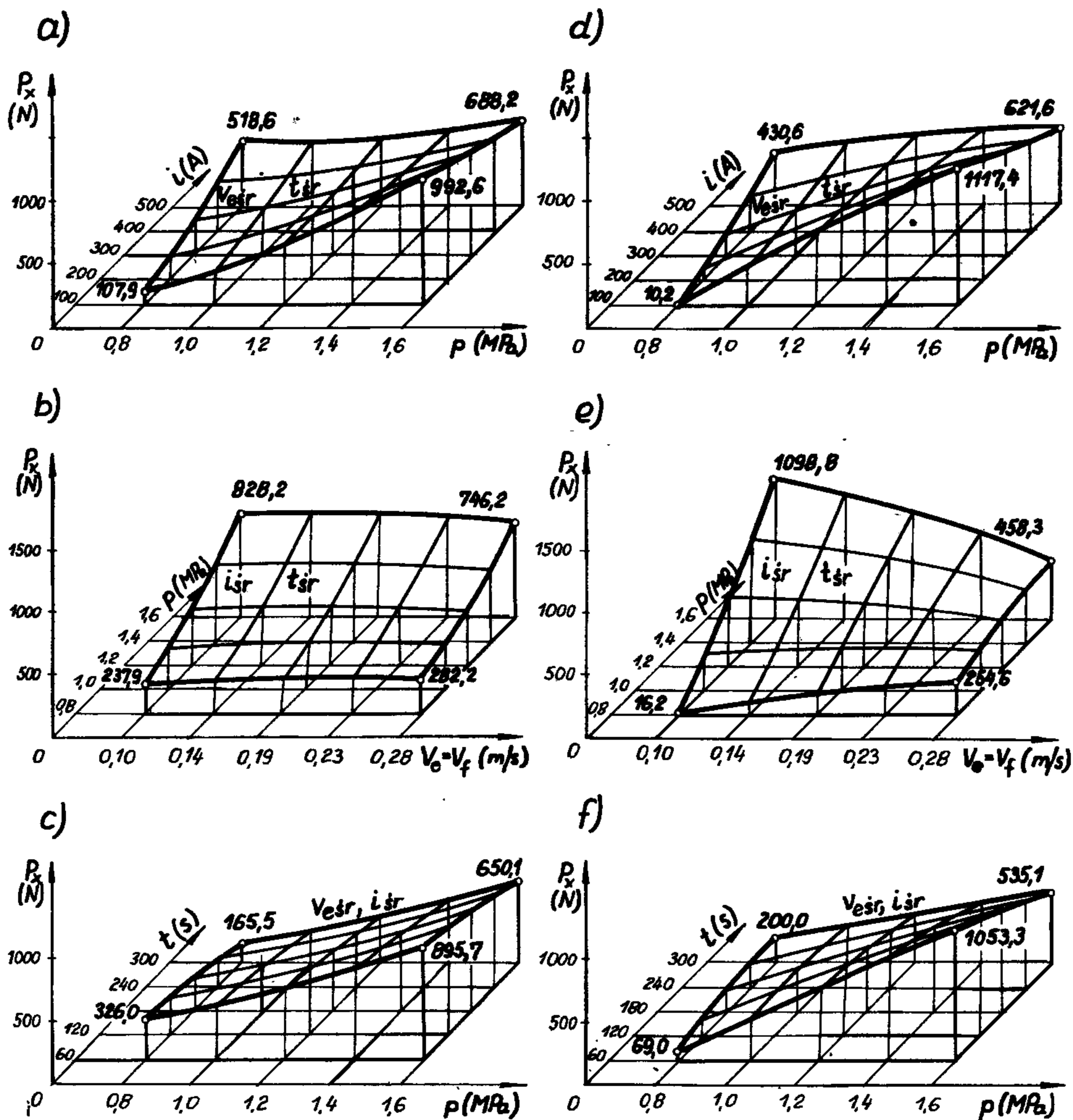


Rys. 3.8. Wpływ parametrów wejściowych na wartość średnią momentu obrotowego M_o dla HD, ustalonego na podstawie zapisu graficznego (rys. 2.2), dla: (a ÷ c) – ostatniego ruchu posuwisto-zwrotnego narzędzia podczas ECH, (d ÷ f) – ostatniego ruchu posuwisto-zwrotnego narzędzia podczas (ECH+HS)

nacisków jednostkowych p wartość M_o wzrasta wraz ze wzrostem wartości i . Można to tłumaczyć przewagą oporów powstających w wyniku generowania się prądów Foucaulta, nad zmniejszaniem się oporów skrawania w wyniku powstawania nadtrawień honowanej powierzchni (rys. 1.11). Tym spostrzeżeniem, wymagającym dalszych badań, można wytłumaczyć ogólne wrażenie, że $M_{o(ECH+HS)}$ jest mniejszy od M_{oECH} . Podobne zależności zauważono dla średnich wartości wzdłużnych sił P_x , podczas ostatniego ruchu posuwisto-zwrotnego narzędzia w czasie ECH oraz ECH+HS. Wartości tych sił, dla eksperymentu w centrum planu wynoszą: $P_{xECH} = 385,4$ N, $P_{x(ECH+HS)} = 284,1$ N.

Dla HJW można nie uwzględniać momentu obrotowego M_o , gdyż obrót narzędzia z prędkością dyskretną \bar{v}_{oc} odbywa się przy wycofanych pilnikach ściernych ($p = 0$).

Występuje tylko siła wzdłużna P_x , której średnią wartość dla ostatniego ruchu posuwisto-zwrotnego narzędzia podczas ECH oraz ECH+HS można przedstawić za pomocą rys. 3.9 oraz równań regresji (3.17) i (3.18):



Rys. 3.9. Wpływ parametrów wejściowych na wartość średnią siły wzdłużnej P_x dla HJW, ustaloną na podstawie zapisu graficznego (rys. 2.2), dla: (a ÷ c) – ostatniego ruchu posuwisto-zwrotnego narzędzia podczas ECH, (d ÷ f) – ostatniego ruchu posuwisto-zwrotnego narzędzia podczas (ECH+HS)

$$\begin{aligned}
 P_{x\text{ECH}} = & (48,350 - 0,470v_e + 13,179p + 1,329i - 5,076t - \\
 & - 0,626v_e^2 + 1,631p^2 + 0,702i^2 - 0,985t^2 - \\
 & - 0,789v_e p + 1,797v_e i - 2,839v_e t - 4,468pi - \\
 & - 0,531pt - 2,993it) 9,81 \text{ [N]}, \quad (3.17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{x\text{(ECH+HS)}} = & (53,483 - 4,619v_e + 16,484p - 0,686i - 4,847t - \\
 & - 1,569v_e^2 - 0,579p^2 + 0,705i^2 - 1,177t^2 - \\
 & - 5,695v_e p + 3,175v_e i + 2,283v_e t - 5,854pi - \\
 & - 4,054pt + 0,316it) 9,81 \text{ [N]}, \quad (3.18)
 \end{aligned}$$

w których poszczególne zmienne wejściowe standaryzowane są w oparciu o zależności (3.11 ÷ 3.14).

Testując istotność wpływu poszczególnych zmiennych wejściowych (dla poziomu ufności 0,95) według testu F – Snedecora można stwierdzić, że w obu przypadkach istotny wpływ na wartość P_x wykazuje – podobnie jak dla M_0 – jedynie nacisk jednostkowy p na pilniki ściernie i to tylko w potędze pierwszej.

Analizując rys. 3.8 i 3.9, a w szczególności rys. 3.8c i 3.9c oraz odpowiadające im równania regresji, można zauważyć, że czas stosowania ECH w pływa na wartość M_0 oraz P_x . Może to być skutkiem zmniejszania się odchyłek makrogeometrii honowanej powierzchni w funkcji czasu obróbki. Problem ten, jak i wspomniany wyżej wpływ natężenia prądu i na wartość M_0 oraz P_x , wymagają dalszych badań i wyjaśnień. Wpływ v_e na wartość M_0 oraz P_x w obu omawianych przypadkach jest niewielki i podobny (rys. 3.8b i 3.9b).

Otrzymane w badaniach średnie, maksymalne i minimalne odchyłki: okrągłości δ_r , walcowości δ_w oraz prostoliniowości osi δ_p dla otworów HD wynoszą:

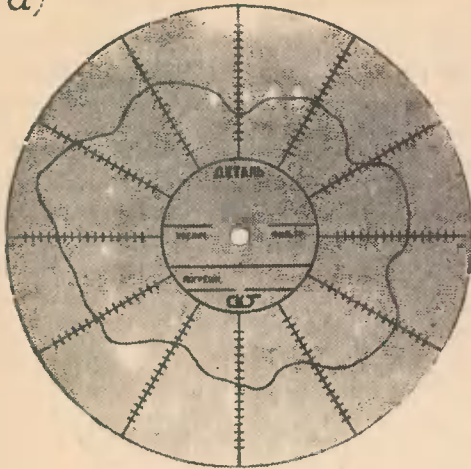
$\delta_{r\acute{s}r} = 12 \mu\text{m}$,	$\delta_{r\text{max}} = 31 \mu\text{m}$,	$\delta_{r\text{min}} = 6 \mu\text{m}$;
$\delta_{r\acute{s}i} = 8,2 \mu\text{m}$,	$\delta_{r'\text{max}} = 20 \mu\text{m}$,	$\delta_{r'\text{min}} = 4 \mu\text{m}$;
$\delta_{w\acute{s}r} = 27 \mu\text{m}$,	$\delta_{w\text{max}} = 48 \mu\text{m}$,	$\delta_{w\text{min}} = 15 \mu\text{m}$;
$\delta_{w\acute{s}i} = 8,1 \mu\text{m}$,	$\delta_{w'\text{max}} = 14 \mu\text{m}$,	$\delta_{w'\text{min}} = 4 \mu\text{m}$;
$\delta_{p\acute{s}r} = 12 \mu\text{m}$,	$\delta_{p\text{max}} = 24 \mu\text{m}$,	$\delta_{p\text{min}} = 2 \mu\text{m}$;
$\delta_{p\acute{s}i} = 1,8 \mu\text{m}$,	$\delta_{p'\text{max}} = 9 \mu\text{m}$,	$\delta_{p'\text{min}} = 1 \mu\text{m}$.

Dla otworów HJW wartości te są następujące:

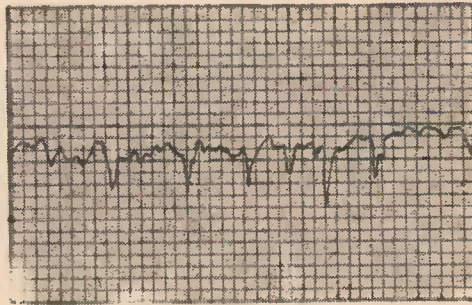
$\delta_{r\acute{s}r} = 17 \mu\text{m}$,	$\delta_{r\text{max}} = 43 \mu\text{m}$,	$\delta_{r\text{min}} = 9 \mu\text{m}$;
$\delta_{r\acute{s}i} = 11 \mu\text{m}$,	$\delta_{r'\text{max}} = 30 \mu\text{m}$,	$\delta_{r'\text{min}} = 6 \mu\text{m}$;
$\delta_{w\acute{s}r} = 33 \mu\text{m}$,	$\delta_{w\text{max}} = 57 \mu\text{m}$,	$\delta_{w\text{min}} = 18 \mu\text{m}$;
$\delta_{w\acute{s}i} = 10 \mu\text{m}$,	$\delta_{w'\text{max}} = 26 \mu\text{m}$,	$\delta_{w'\text{min}} = 5 \mu\text{m}$;
$\delta_{p\acute{s}r} = 16 \mu\text{m}$,	$\delta_{p\text{max}} = 41 \mu\text{m}$,	$\delta_{p\text{min}} = 4 \mu\text{m}$;
$\delta_{p\acute{s}i} = 5,3 \mu\text{m}$,	$\delta_{p'\text{max}} = 14 \mu\text{m}$,	$\delta_{p'\text{min}} = 1 \mu\text{m}$.

Analizując otrzymane wartości średnie odchyłek okrągłości $\delta_{r\acute{s}r}$ dla otworów HD oraz HJW można zauważyć, że mieszczą się one w klasie dokładności IT6 ÷ IT7, przy założeniu, że wypełniają one całe pole tolerancji T wykonania otworu. Uzyskanie większych odchyłek δ_r dla otworów HJW, aniżeli w przypadku HD, można tłumaczyć ich wieloślukowością, charakterystyczną dla tego procesu, omówioną w rozdziale III.3.3. Rys. 3.10a przedstawia przykładowy wykres okrągłości otworu HJW, na którym wieloślukowość jest adekwatna do przyjętych w badaniach, szczególnie niekorzystnych parametrów obróbki ($\beta = 360/z$). Porównując $\delta_{r\text{max}}$ oraz $\delta_{r\text{min}}$ dla obu sposobów honowania łatwo zauważyć, że rozstęp uzyskanych odchyłek nie jest duży i mieści się w zakresie 4 klas dokładności (IT4 ÷ IT8) dla HD oraz (IT5 ÷ IT9) dla HJW. Należy dodać, że odchyłki $\delta_{r\text{max}}$ dotyczą przeważnie otworów, których czas t obróbki jest mały. Może on być tutaj niewystarczający do usunięcia początkowych, znacznych odchyłek kształtu honowanych otworów. Uzyskanie tak małych odchyłek okrągłości $\delta_{r\text{min}}$ mo-

a)



b)



Rys. 3.10. Przykład otworu HJW: a – charakterystyczna wielolukowość, b – profilogram powierzchni wykonany równoległe do osi otworu

żna tłumaczyć zastosowaną w narzędziu katodą oraz stosowaniem elektrolitu pasywnującego silnie, których zalety omówiono we własnych badaniach teoretycznych. Świadomość, że otwory te są obrabiane za pomocą ECH bezpośrednio po obróbce cieplnej, a stopień ich deformacji odpowiada lub niekiedy nawet przewyższa klasę IT13, upoważnia do stwierdzenia, że w tym procesie kryją się duże możliwości wytwórcze, a w wielu przypadkach przewyższające potrzeby na współczesnym etapie rozwoju technosfery. Otrzymane wyniki zachęcają do prowadzenia dalszych badań w tym zakresie, szczególnie nad uzyskaniem dokładności możliwie najwyższych.

Uzyskane odchyłki walcowości $\delta_{u,si}$ mieszczą się w klasie dokładności IT8 dla HD oraz HJW. Wnikliwsza analiza otrzymanych odchyłek wykazuje, że otrzymane otwory charakteryzują się stałą postacią geometryczną, odpowiadającą podwójnej stożkowości, z największymi wymiarami w pobliżu czół próbek. Taka postać otrzymanych otworów nie jest zaskoczeniem i wynika z przyjętych w badaniach parametrów: l , l_h , h , w_1 , w_2 i ich wpływu na zróżnicowaną długość drogi pracy poszczególnych elementów narzędzia ściernego w honowanym otworze, a tym samym i zróżnicowanego ich zużycia, omówionych w rozdziale III. 3.2 (rys. 3.13). W przypadku honowania otworów, w których $l \gg 1,5d$, systematyczność ta zmniejsza się w stopniu tym większym, im l_h/h jest mniejsze, bez konieczności stosowania układu ACG, poprawiającego automatycznie tę odchyłkę kształtu, omówionego w rozdziale III.8.

Analizując otrzymane odchyłki prostoliniowości osi $\delta_{j,si}$ dla obu sposobów honowania można zauważyć, że zalety korzystnego stosunku l/d zastosowanego w badaniach narzędzia nie występują jeszcze przy obróbce otworów o stosunku $l/d = 2$.

Należy dodać, że w przebadanym zakresie zmian parametrów zmiennych nie udało się ustalić ich wpływu na δ_r , δ_u , δ_p .

W przebadanym zakresie zmian parametrów wejściowych nie udało się także ustalić ich wpływu na mikrogeometrię HD oraz HJW otworów, a w szczególności na: wartość parametru R_{ar} , maksymalną wartość chropowatości R_{max} oraz nośność liniową

N_L , ustalaną na wysokości $R = 20\%$ oraz $R = 50\%$, pomimo dokonania znacznej liczby pomiarów (w każdym otworze dokonywano pomiarów w dziewięciu miejscach, po czym je uśredniano). Tłumaczyć to można usunięciem skutków ECH przez stosowanie (ECH+HS). W przypadku HD czas ściernego działania pilników ściernych wynosi 60s, w przypadku HJW odpowiada jednemu cyklowi obróbkowemu.

Otrzymane w badaniach wartości średnie, maksymalne i minimalne poszczególnych parametrów mikrogeometrii powierzchni otworów HD wynoszą:

$$\begin{aligned} R_{a\text{śr}} &= 0,16 \mu\text{m}, R_{a\text{max}} &= 0,25 \mu\text{m}, R_{a\text{min}} &= 0,12 \mu\text{m}; \\ R_{\text{max.śr}} &= 1,07 \mu\text{m}, R_{\text{max.max}} &= 1,90 \mu\text{m}, R_{\text{max.min}} &= 0,65 \mu\text{m}; \\ N_{L(20)\text{śr}} &= 11,71\%, N_{L(20)\text{max}} &= 38,75\%, N_{L(20)\text{min}} &= 1,25\%; \\ N_{L(50)\text{śr}} &= 70,78\%, N_{L(50)\text{max}} &= 95\%, N_{L(50)\text{min}} &= 34\%. \end{aligned}$$

Dla otworów HJW wartości te są następujące:

$$\begin{aligned} R_{a\text{śr}} &= 0,28 \mu\text{m}, R_{a\text{max}} &= 0,40 \mu\text{m}, R_{a\text{min}} &= 0,20 \mu\text{m}; \\ R_{\text{max.śr}} &= 0,86 \mu\text{m}, R_{\text{max.max}} &= 1,78 \mu\text{m}, R_{\text{max.min}} &= 0,11 \mu\text{m}; \\ N_{L(20)\text{śr}} &= 20,40\%, N_{L(20)\text{max}} &= 48,10\%, N_{L(20)\text{min}} &= 1,88\%; \\ N_{L(50)\text{śr}} &= 75,80\%, N_{L(50)\text{max}} &= 97,50\%, N_{L(50)\text{min}} &= 21,9\%. \end{aligned}$$

Wartości maksymalne chropowatości powierzchni dotyczą miejsc, w których nie usunięto w całości, na skutek istnienia znacznych początkowych odchyłek kształtu powierzchni oraz stosowania minimalnych parametrów procesu, śladów obróbki poprzedzającej ECH. Analizując otrzymane wartości mikrogeometrii powierzchni dla obu sposobów honowania można zauważyć, że uzyskane wartości parametru $R_{a\text{śr}}$ w obu przypadkach są zbliżone i mieszczą się w przedziale byłej 9 + 10 klasy chropowatości, mimo że w otworach HJW większa liczba pomiarów R_a osiąga wartość 0,04 μm , niż w otworach HD. Można to tłumaczyć wpływem przyjętego sposobu pomiaru mikrogeometrii w otworze (równoległe do osi) na wyniki pomiaru. Należy dodać, że wartości R_{max} dla HJW są mniejsze, niż dla HD. Nośność powierzchni dla HJW jest w pięciu na sześć przypadków większa, niż dla HD. Rysunek 3.10b przedstawia przykładowy profilogram powierzchni HJW.

Przeprowadzone badania wytwórcze upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

- jest możliwe i celowe technicznie łączenie w procesie ECH stosowanych dotychczas sekwencyjnie obróbek: kształtującej i wykańczającej. Przekonują o tym wyniki badań wpływu parametrów zmiennych na ubytek masy Δm oraz wartości momentów M_0 i sił P_x – towarzyszących temu procesowi;
- skupione w ECH właściwości ECM i HS tworzą nową możliwość wytwórczą, przejawiającą się w uzyskiwaniu za pomocą tego procesu dużych dokładności makro- i mikrogeometrii otworów kształtowanych. Zastosowane w badaniach nowe narzędzie umożliwia kształtowanie za pomocą ECH otworów znacznie zdeformowanych, np. obróbką cieplną (IT13). W przypadku zastosowania parametrów w centrum przyjętego programu badań, wartości średnie poszczególnych odchyłek dla otworów HD wynoszą:

$$\delta_{r\dot{s}r} = 10,9 \mu\text{m}, \delta_{w\dot{s}r} = 21,4 \mu\text{m}, \delta_{p\dot{s}r} = 6,8 \mu\text{m};$$

dla otworów HJW są:

$$\delta_{r\dot{s}r} = 12,4 \mu\text{m}, \delta_{w\dot{s}r} = 25,8 \mu\text{m}, \delta_{p\dot{s}r} = 12,6 \mu\text{m};$$

czyli δ_r oraz δ_w mieszczą się w IT5 ÷ IT7 dla otworów HD oraz IT6 ÷ IT8 dla otworów HJW;

- zastosowane w badaniach narzędzie umożliwia realizację HD oraz HJW, w tym także uzyskiwanie zamierzonej struktury stereometrycznej chropowatości powierzchni honowanej,
- przeprowadzone doświadczenia wytwórcze potwierdzają postawione tezy badawcze, sprecyzowane w rozdziale II.2.

4. BADANIA KONSTRUKCYJNE POWIERZCHNI HONOWANEJ

4.1. BADANE CZYNNIKI, ZAKRES ICH ZMIENNOŚCI ORAZ SPOSOBY POMIARU

W badaniach konstrukcyjnych jako czynniki stałe przyjęto:

- C_g próbek (cylindrów) za wyjątkiem kierunkowości śladów obróbki powierzchni honowanej,
- prędkość \bar{v} , tłoka wraz z uszczelnieniem w cylindrze,
- medium hydrauliczne oraz jego ciśnienie,
- stanowisko badawcze (rys. 2.3).

Cechy geometryczne próbek do badań konstrukcyjnych przedstawia rys. 3.1. Przygotowano je w sposób opisany wyżej, pozostawiając naddatek na obróbkę za pomocą honowania $a_0 = 0,05 \div 0,1$ mm. Otwory honowano na wymiar 50H7. Uzasadnienie wyboru C_g próbek podano w p. IV. 3.1.

Prędkość v_t tłoka w badanym cylindrze ustalono na tyle małą, aby wyeliminować powstawanie klina smarowego, zmniejszającego zużycie pary kinematycznej. Prędkość ta wynika ze stałego wydatku pompy hydraulicznej oraz jednostronnej pojemności skokowej dziewięciu równolegle zasilanych, z 18 jednocześnie badanych cylindrów

(rys. 2.3b) i wynosi $v_{t\dot{s}r} = 1,69 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}} \left(1,0 \frac{\text{m}}{\text{min}} \right)$. W szczególnych przypadkach, gdy

ruch tłoków odbywa się sekwencyjnie, co może wynikać z nierównomierności oporów ruchu poszczególnych par kinematycznych, prędkość ta może wzrosnąć 9-krotnie lub osiągać chwilowe wartości mniejsze od $v_{t\dot{s}r}$, jeżeli jest ona niejednostajna lub ma charakter dyskretny. Obserwowane w czasie badań prędkości v_t poszczególnych tłoków są zbliżone do $v_{t\dot{s}r}$.

Badane cylindry (rys. 2.3b) zasilano olejem zalecanym dla układów hydraulicznych (wg licencji Rexrotha) o ciśnieniu 6,18 MPa. Przeciwi ciśnienie po pasywnej stronie zasilania cylindrów ustalane jest dławikiem. Przesterowanie rozdzielacza następujące w skrajnych położeniach wszystkich tłoków w badanych cylindrach. Tłoki osadzone są jednostronnie na drążkach tłokowych (rys. 2.3c), pasowanych suwliwie z obudową

w celu zapewnienia kontaktu badanego cylindra tylko z uszczelnieniem tłoka. Poszczególne pary tłoków łączone są za pomocą przegubów.

Do czynników zmiennych, zgodnie z koncepcją badań, zaliczono:

- sposób honowania (HJP, HD, HJW),
- sposób wytwarzania: ECH, HS, (ECH+HS) – rozumiane jako honowanie elektrochemiczne z krótkotrwałym (30 s) honowaniem ściernym, kończącym obróbkę otworu,
- cechę materiałową badanych cylindrów: cylindry stalowe (CS) – 40 H, cylindry żeliwne (CZ) – Z1250,
- cechy konstrukcyjne uszczelnienia tłoka w cylindrze: uszczelnienie pierścieniami żeliwnymi (UZ), uszczelnienie pierścieniem o przekroju okrągłym (nazywanym często uszczelnieniem gumowym typu „O”) – (UG).

Dla poszczególnych sposobów honowania (HJP, HD, HJW) wartości kąta α skrzyżowania śladów obróbki wynoszą: $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, $\alpha = 180^\circ$. Kąty: $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 180^\circ$ są charakterystyczne dla HJP oraz HJW. Przyjęty kąt $\alpha = 45^\circ$ wynika z powszechności jego stosowania w HS. Najczęściej kąt ten jest zawarty w granicach $30^\circ < \alpha < 60^\circ$ [55, 56]. Otwory, w których $\alpha = 0^\circ$, honowano za pomocą narzędzia pokazanego na rys. 6.2c, pozostałe obrabiano narzędziem pokazanym na rys. 6.2d. W obu narzędziach stosowano pilniki ścierne 99C-F280/37-K-8-V wg PN-71/M-59101. Wszystkie kąty α realizowano przy tak dobranych prędkościach \bar{v} i \bar{v}_f , aby wypadkowa prędkość skrawania wynosiła $v_e = 0,237$ m/s. W przypadku $\alpha = 0^\circ$, do prędkości \bar{v} dodano prędkość oscylacji \bar{v}_{ff} , równoległą do osi obrabianego otworu, o częstotliwości $f_f = 1$ Hz i amplitudzie $h_f = 1$ mm, co zmienia chwilowe wartości prędkości \bar{v}_e zaledwie o $0,016$ mm/s $\left(1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}\right)$. Wprowadzenie oscylacji narzędzia wynika z troski o nienakła-

danie się trajektorii ziarn ściernych pilnika (rys. 3.20 i 3.21). Realizacja ruchów narzędzia, zapewniających $\alpha = 45^\circ$ oraz $\alpha = 180^\circ$ odbywa się w sposób opisany wyżej.

W badaniach konstrukcyjnych przez ECH rozumie się taki przypadek obróbki otworu, w którym honowanie elektrochemiczne odbywa się do chwili osiągnięcia założonego wymiaru średnicy d otworu (50H7). Proces ten prowadzono przy stałych parametrach wynoszących: $i = 250$ A, $s_0 = 0,15$ mm, nacisk jednostkowy na pilniki ścierne – mierzony ciśnieniem medium zasilającego układ rozpierania pilników ściernych – wynosi $1,4$ MPa, natężenie przepływu elektrolitu – o składzie jak wyżej (NH_4NO_3) – wynosi $0,25$ dm³/s. Parametry te pozwalają uzyskać gęstość prądu elektrycznego $j = 12,5$ A/cm² oraz obliczeniowy nacisk jednostkowy na pilniki ścierne $p_j = 0,15$ MPa. Czas honowania wynika z naddatku na obróbkę. Przez (ECH+HS) należy rozumieć takie honowanie elektrochemiczne, które kończone jest ściernie (z wyłączonym źródłem prądu elektrycznego). Czas działania tylko pilników ściernych dla HD przyjęto 30 s, dla HJW wynika z cyklu obróbkowego ($K = 1; 6 \beta$). Jest on pomyślany jako czas, w którym zostanie usunięta, za pomocą ściernego działania pilników, roztworzona elektrochemicznie warstwa wierzchnia otworów honowanych. Czas ten ustalono w oparciu o badania wstępne. Przez honowanie HS rozumie się obróbkę otworów prowadzoną od początku do końca bez roztwarzającego działania

prądu elektrycznego, przy zachowaniu pozostałych parametrów jak w przypadku ECH.

Cechę materiałową badanych cylindrów przedstawia rys. 3.2. Cylindry stalowe (CS) wykonano ze stali 40H (rys. 3.2e ÷ g). Materiał Z1250 (rys. 3.2a ÷ d), z którego wykonano cylindry żeliwne (CZ), charakteryzuje się twardością ok. 165 HB. Uzasadnienie wyboru C_m cylindrów jest zawarte w p. IV. 3.1.

Z badanymi cylindrami współpracują dwojakiemu rodzajowi uszczelnienia tłoków: pierścienie żeliwne (UZ), pierścienie gumowe typu O (UG). Uszczelnienia te są wspólnie szeroko stosowane w układach hydraulicznych. Wariant UZ realizowano za pomocą 2 pierścieni uszczelniających (występujących w uszczelnieniach tłoków silników spalinowych), o przekroju $2,5 \times 2$ mm, z prostym zamkiem wynoszącym $0,05 \div 0,15$ mm. Materiał pierścieni stanowi Zs5002 wg PN-76/H-83123, o twardości $320 \div 350$ HV przy obciążeniu 294,3 N. Powierzchnie uszczelniające pierścieni szlifowano, uzyskując chropowatości $R_a = 0,32$ μm . Pierścienie osadzono symetrycznie na tłoku o średnicy zewnętrznej $\varnothing 50f6$ i długości 30 mm, w rowkach o wymiarze 2,5H7, o rozstawie 7,5 mm. Przypadek UG realizowano za pomocą pojedynczego pierścienia, o oznaczeniu $39,2 \times 5,7$ wg PN-60/M-86961, osadzonego w środku długości tłoka. Pierścienie wykonano z mieszanki kauczuku syntetycznego 70A o twardości $73 \pm 3^\circ$ Sh (skala Shorea A) wg PN-71/C-04238. Tłoki, na których osadzono pierścienie uszczelniające, wykonano ze stali 45 ulepszonej cieplnie do twardości $24 \div 32$ HRC. Powierzchnie zewnętrzne szlifowano na wymiar 50f6, z chropowatością $R_a = 0,63$ μm .

Do parametrów wyjściowych, umożliwiających ocenę ścierności i ścieralności powierzchni honowanej, zaliczono:

- przyrost średnicy Δd badanych cylindrów, świadczący o ścieralności powierzchni,
- ubytek masy Δm pierścieni uszczelniających, charakteryzujący ścierność powierzchni,
- chropowatość badanej powierzchni oraz przecieki medium przez uszczelnienie tłoka w cylindrze, odzwierciedlające docieranie się badanej pary kinematycznej oraz graniczne wartości jej poprawnej pracy.

Pomiaru przyrostów średnicy Δd badanych cylindrów dokonywano po zaplanowanych liczbach x suwów tłoka w cylindrze, częściej w pierwszym okresie pracy badanej pary kinematycznej, rzadziej po dłuższym okresie pracy, co wynika z charakterystycznej krzywej zużycia. W przypadku uszczelnienia tłoka za pomocą UZ badania przerywano po $2 \cdot 10^5$ suwach tłoka. Wynika to z zaobserwowania wyraźnego ustalania się wzniosu krzywych zużycia cylindra oraz uszczelnienia i świadczy o ustalonej pracy badanej pary kinematycznej. Badania z uszczelnieniem tłoka za pomocą UG przerywano po $5 \cdot 10^4$ suwach tłoka, gdyż ubytki masy elementu uszczelniającego są na tyle duże (niekiedy 50% masy), że przecieki stają się nadmierne i trudnomierzalne. Pomiarów przyrostu średnicy Δd badanych cylindrów dokonywano w płaszczyznach 2; 5 ÷ 6 i 9 (rys. 3.1), za pomocą średnicówki trójpunktowej, o wartości działki elementarnej 0,005 mm. W każdej płaszczyźnie pomiarów dokonywano dwukrotnie, dokonując obrotu narzędzia o kąt 60° , w celu zmniejszenia wpływu odchyłki okrągłości na wyniki pomiaru. Wyniki pomiarów uśredniono.

Pomiaru ubytku masy Δm pierścieni uszczelniających (w funkcji liczby x suwów tłoka) dokonywano przez trzykrotne ich ważenie na wadze analitycznej o zakresie pomiarowym $0 \div 200$ g i wartości działki elementarnej $0,00005$ g.

Pomiary chropowatości badanych cylindrów dokonywano w funkcji liczby x (jak wyżej) wykonanych suwów tłoka. Wartość średnią R_a dla jednego cylindra ustalono z pomiarów chropowatości w płaszczyznach $2; 5 \div 6$ i 9 (rys. 3.1), w dwóch miejscach na obwodzie cylindra, przesuniętych względem siebie o 90° . Powierzchnie badanych cylindrów obserwowano także za pomocą mikroskopu elektronowego typu Stereo – scan s 600.

Pomiaru przecieku dokonywano po odciążonej stronie badanego cylindra, za pomocą cylindrów pomiarowych o wartości działki elementarnej 2 cm^3 . Przecieki dynamiczne ustalono dla obu przypadków uszczelnienia, statyczne tylko dla UG. Pomiary przecieków dokonywano w funkcji suwów tłoka, po wykonaniu przez tłok stałej liczby suwów początkowych.

4.2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W pracy, ze względu na jej objętość, przytoczono jedynie niektóre wyniki badań, pomimo że przeprowadzono je w oparciu o program kompletny (PS/DK-v). Szerze omówienie tego problemu można znaleźć w pracach autora [33, 34, 35, 38], a w szczególności w pracy [125]*.

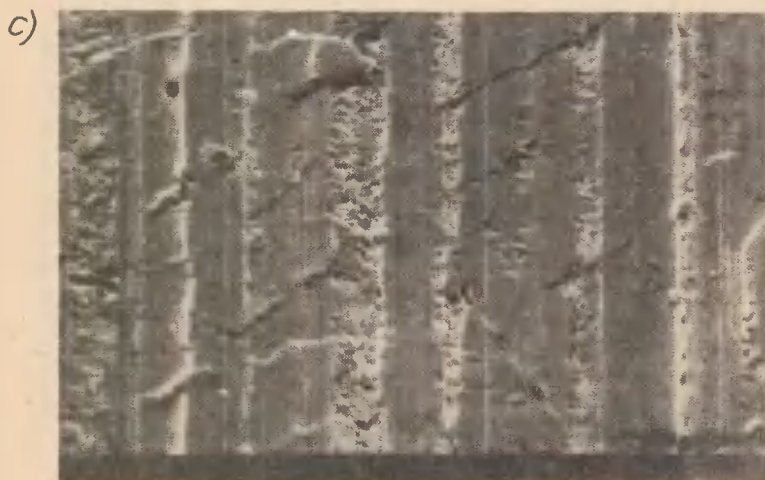
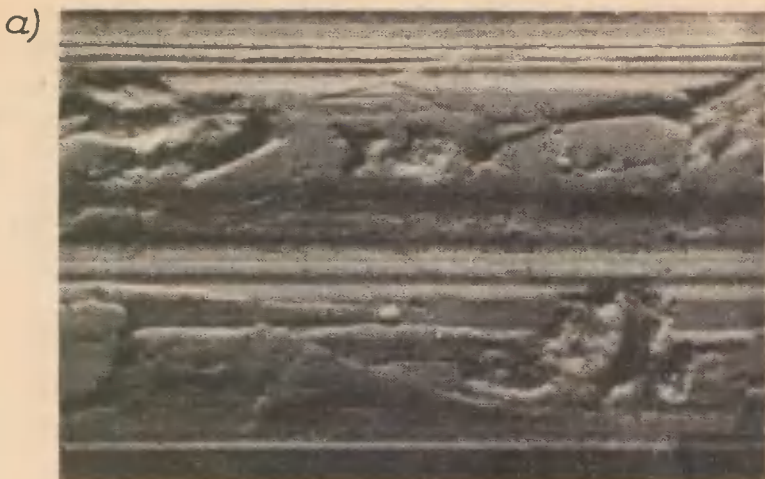
Rysunek 4.1 przedstawia fotografie powierzchni CZ po ECH (pow. $400x$), obrabianych za pomocą: HJP, HD, HJW. Ślady ziarn ściernych tworzą kąty: $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 60^\circ$, $\alpha = 180^\circ$. Poza tymi śladami widoczne są wyraźne nadtrawienia powierzchni, charakterystyczne dla ECM.

Na rys. 4.2 przedstawiono powierzchnie CS po HJW (pow. $160x$), wytworzone za pomocą: ECH, ECH+HS, HS. Widoczne ślady ziarn ściernych są równoległe do osi otworu. Nadtrawienia powierzchni, charakterystyczne dla ECM, są mniejsze dla CS w porównaniu z CZ (rys. 4.1). Stają się one niewidoczne w przypadku zastosowania (ECH+HS). Obrabiana w ten sposób powierzchnia swoim wyglądem przypomina powierzchnię HS.

Rysunek 4.3 przedstawia powierzchnie CS (pow. $400x$), zestawione parami, po ECH dla różnych sposobów honowania (HJP, HD, HJW) i po współpracy z UZ przez $2 \cdot 10^5$ suwów tłoka. Łatwo zauważyć, że bez względu na kąt α skrzyżowania śladów ziarn ściernych po honowaniu, ślady współpracy cylindra z uszczelnieniem po $2 \cdot 10^5$ suwach tłoka stają się równoległe do osi cylindra. Po tej liczbie suwów tłoka stają się niewidoczne nadtrawienia powierzchni.

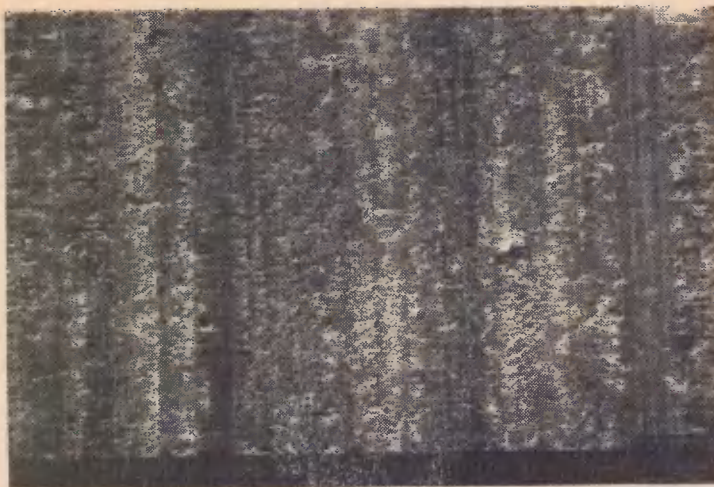
Rysunek 4.4a i b przedstawia przyrosty średnicy Δd cylindra stalowego (CS) współpracującego z UZ, w funkcji liczby x suwów tłoka, dla różnych sposobów wytwarzania (ECH, ECH+HS, HS) oraz różnych sposobów honowania (HJP, HD, HJW).

* Praca doktorska (której promotorem jest autor) St. Zakościelny: Wpływ kierunkowości chropowatości powierzchni oraz sposobów wytwarzania na ścierność i ścieralność honowanej powierzchni na przykładzie silowników hydraulicznych, Politechnika Śląska, Gliwice, 1981.

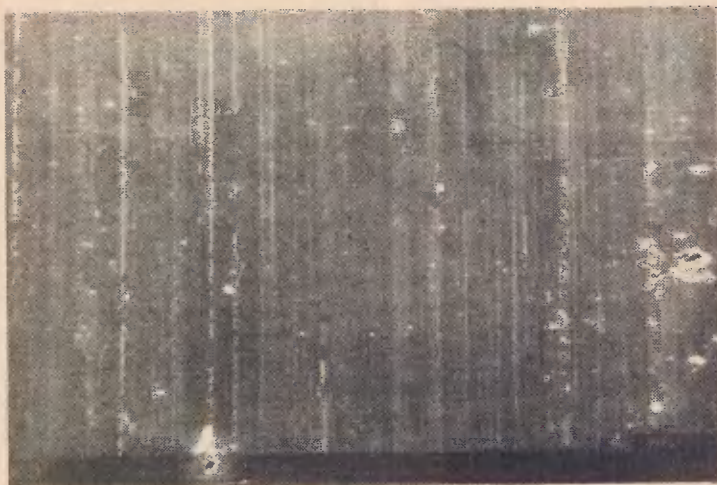


Rys. 4.1. Powierzchnia cylindra żeliwnego (CZ) po ECH: a – HJP, b – HD, c – HJW; pow. 400x

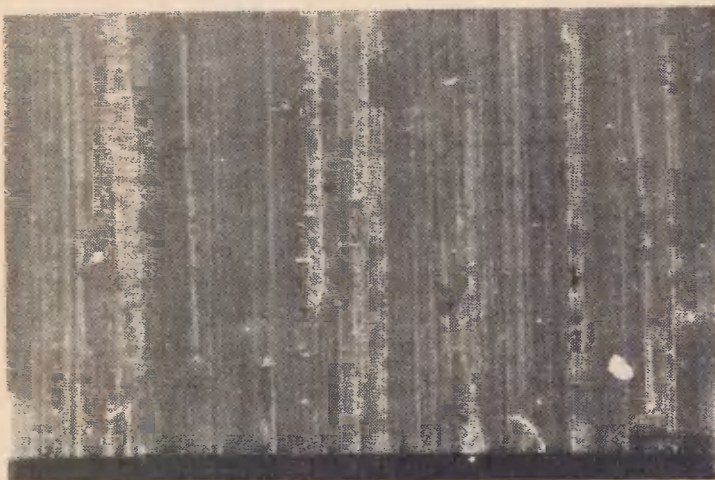
a)



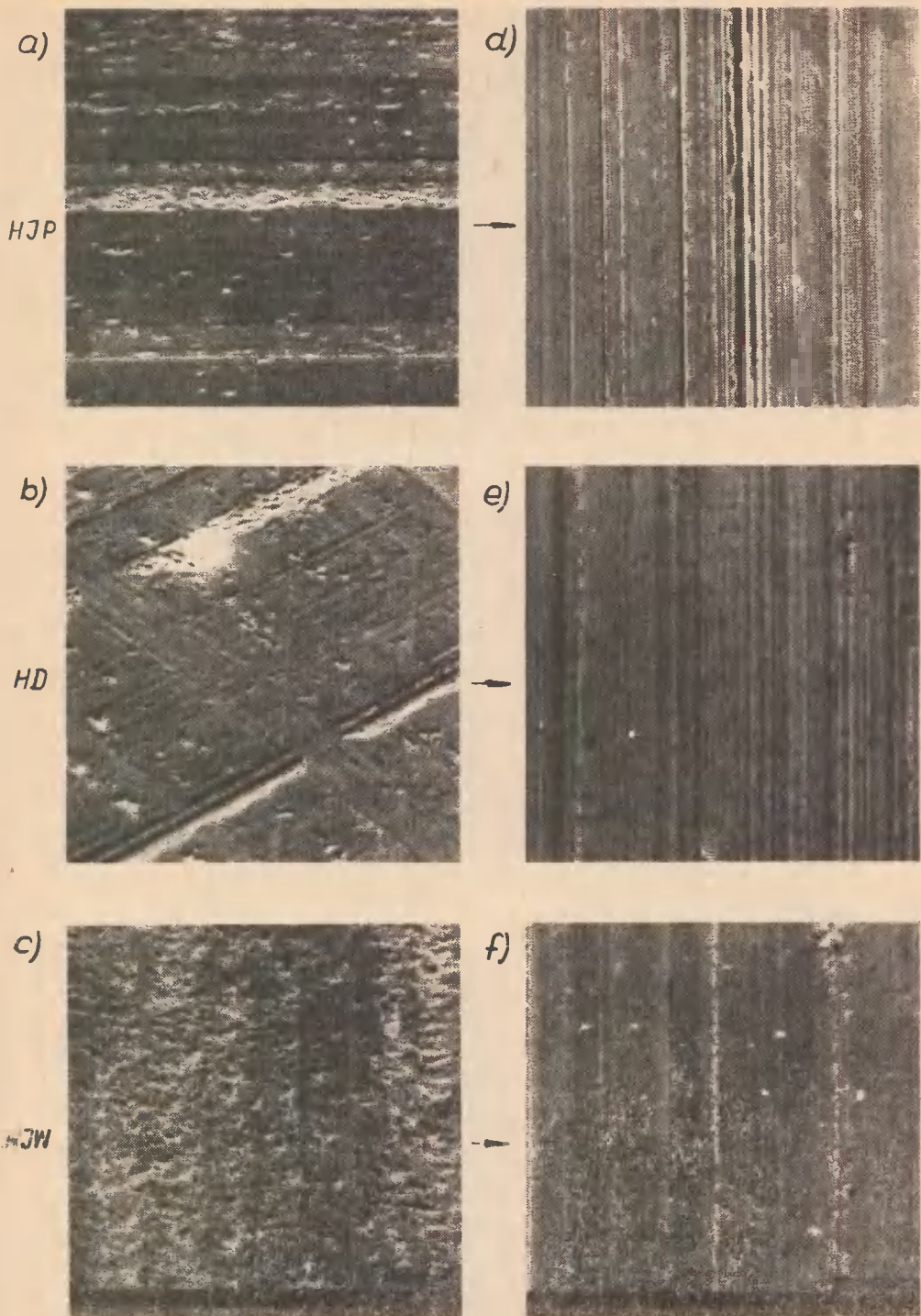
b)



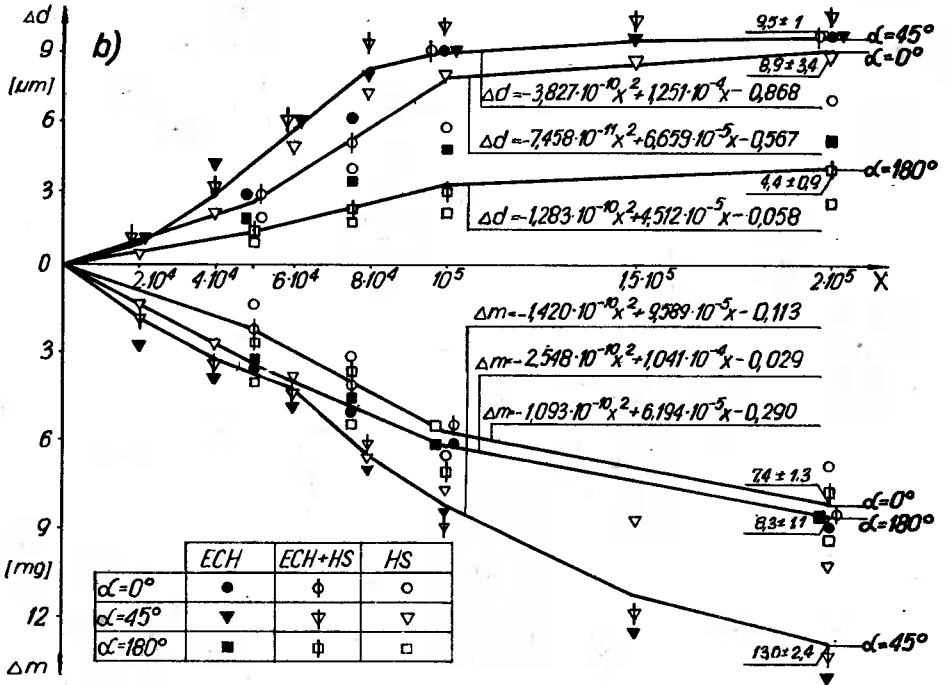
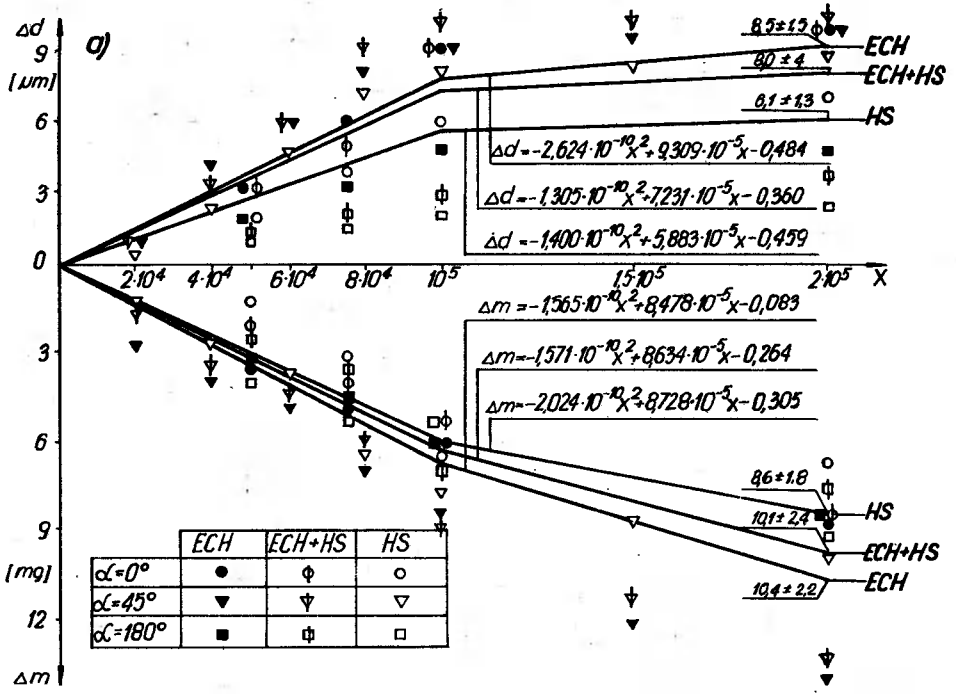
c)



Rys. 4.2. Powierzchnia cylindra stalowego (CS) po HJW: a – ECH, b – ECH+HS, c – HS; pow. 160x



Rys. 4.3 Powierzchnia cylindra stalowego (CS) po ECH (a ÷ c) oraz po współpracy z UZ przez $2 \cdot 10^5$ suwów tłoka (d ÷ f); pow. 400x



Rys. 4.4. Przyrost średnicy Δd cylindra stalowego (CS) oraz ubytek masy Δm uszczelnienia żeliwnego (UZ) w funkcji liczby x suwów tłoka w zależności od: a – sposobu wytwarzania, b – sposobu honowania [33, 35]

Wymienione wyżej rysunki przedstawiają także ubytki masy Δm uszczelnienia, w zależności jak Δd . Każdy punkt na rysunku (dla Δd) przedstawia średnią arytmetyczną 18 pomiarów. Rzędna krzywej w miejscach pomiarowych odpowiada średniej arytmetycznej 54 pomiarów. Dla przyrostów Δd oraz Δm po $2 \cdot 10^5$ suwach tłoka podano obszary ufności dla przyjętego poziomu ufności 0,95. Dla każdej krzywej na rysunku podano także równanie krzywej aproksymującej, ustalone numerycznie metodą sumy najmniejszych kwadratów (dla najmniejszej wartości $x = 1$). W przyjętym zakresie zmian liczby x suwów tłoka krzywe te są parabolami.

Z rysunku 4.4a wynika, że powierzchnia kształtowana za pomocą ECH charakteryzuje się większą ściernością i ścieralnością, aniżeli ukształtowana za pomocą HS. Ścierność i ścieralność ECH+HS zawarta jest pomiędzy ECH a HS. Zależność (4.1) przedstawia równania regresji, z których można bezpośrednio wysnuć takie wnioski.

$$\begin{aligned} \Delta d = & -2,012 + 9,193 \cdot 10^{-2}x + 5,252 \cdot 10^{-2}\alpha + 2,504 \cdot 10^{-2}H - \\ & -2,072 \cdot 10^{-4}x^2 - 2,673 \cdot 10^{-4}\alpha^2 - 2,042 \cdot 10^{-4}H^2 - \\ & -1,939 \cdot 10^{-4}x\alpha + 9,671 \cdot 10^{-5}xH + 7,212 \cdot 10^{-5}\alpha H \text{ [\mu m]}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \Delta m = & -2,196 + 8,394 \cdot 10^{-2}x + 8,402 \cdot 10^{-2}\alpha + 1,205 \cdot 10^{-2}H - \\ & -1,614 \cdot 10^{-4}x^2 - 3,965 \cdot 10^{-4}\alpha^2 - 8,232 \cdot 10^{-5}H^2 - \\ & -5,537 \cdot 10^{-5}x\alpha + 8,301 \cdot 10^{-5}xH - 2,056 \cdot 10^{-5}\alpha H \text{ [mg]}, \end{aligned}$$

gdzie: x – liczba x suwów tłoka pomnożona przez $1 \cdot 10^{-3}$,

α – wartość bezwymiarowa kąta α skrzyżowania śladów obróbki ($0 \div 180$),

H – zakodowany sposób wytwarzania ($0 \div 100$), określany jako: HS = 0, ECH = 100, (ECH+HS) = 50.

Z zależności 4.1 oraz rys. 4.4b wynika także, że na ścierność i ścieralność powierzchni honowanej bardziej wpływa sposób honowania (HJP, HD, HJW), wyróżniany kątem α skrzyżowania śladów obróbki, aniżeli sposób wytwarzania (HS, ECH+HS, HS).

Podobne – jak wyżej – można także poczynić obserwacje dla pary kinematycznej CZ-UZ (rys. 4.6). Przyrosty Δd oraz Δm można wyrazić zależnością:

$$\begin{aligned} \Delta d = & -4,584 + 1,344 \cdot 10^{-1}x + 1,417 \cdot 10^{-1}\alpha + 6,339 \cdot 10^{-2}H - \\ & -3,531 \cdot 10^{-4}x^2 - 7,130 \cdot 10^{-4}\alpha^2 - 1,258 \cdot 10^{-2}H^2 - \\ & -3,248 \cdot 10^{-4}x\alpha + 3,930 \cdot 10^{-4}xH - 1,545 \cdot 10^{-4}\alpha H \text{ [\mu m]}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \Delta m = & -3,875 + 1,397 \cdot 10^{-1}x + 1,467 \cdot 10^{-1}\alpha + 1,944 \cdot 10^{-2}H - \\ & -2,147 \cdot 10^{-4}x^2 - 7,056 \cdot 10^{-4}\alpha^2 - 1,150 \cdot 10^{-4}H^2 - \\ & -2,985 \cdot 10^{-4}x\alpha + 4,553 \cdot 10^{-4}xH + 5,345 \cdot 10^{-6}\alpha H \text{ [mg]}. \end{aligned}$$

Wyjaśnienia zróżnicowanego zużycia powierzchni kształtowanej za pomocą ECH, (ECH+HS) oraz HS można dokonać przez porównanie między sobą fotogramów powierzchni zamieszczonych na rys. 4.2a ÷ c oraz na rys. 4.5. Ten ostatni przedstawia CZ kształtowany HJP za pomocą ECH, ECH+HS oraz HS po współpracy z UZ przez $2 \cdot 10^5$ suwów tłoka. W obu przypadkach pojawiające się nadtrawienie powierzchni kształtowanej za pomocą ECH wykazuje mniejszą jej nośność [33, 35, 125] w po-

a)



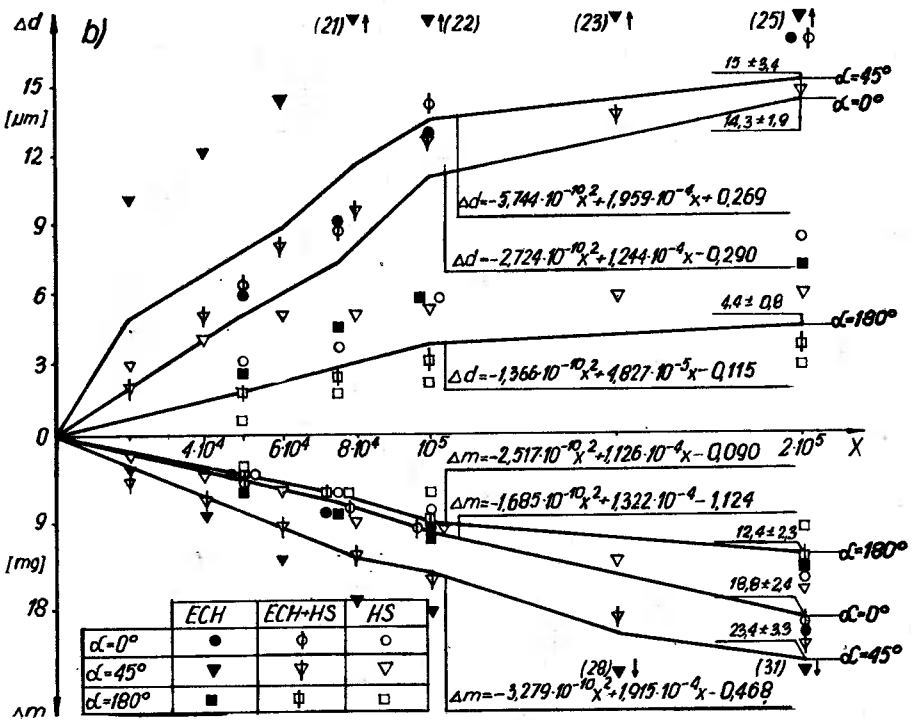
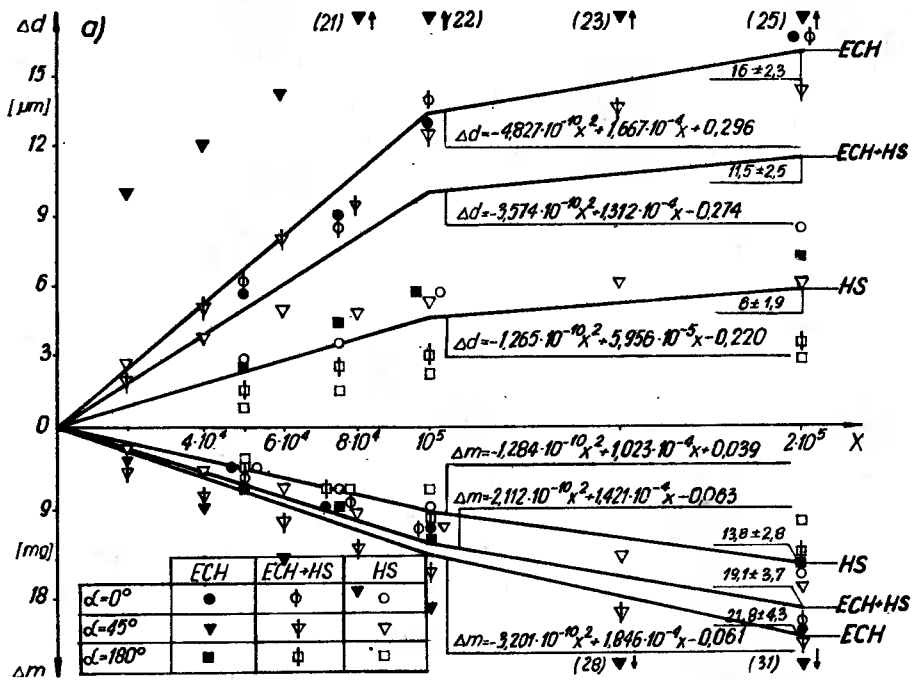
b)



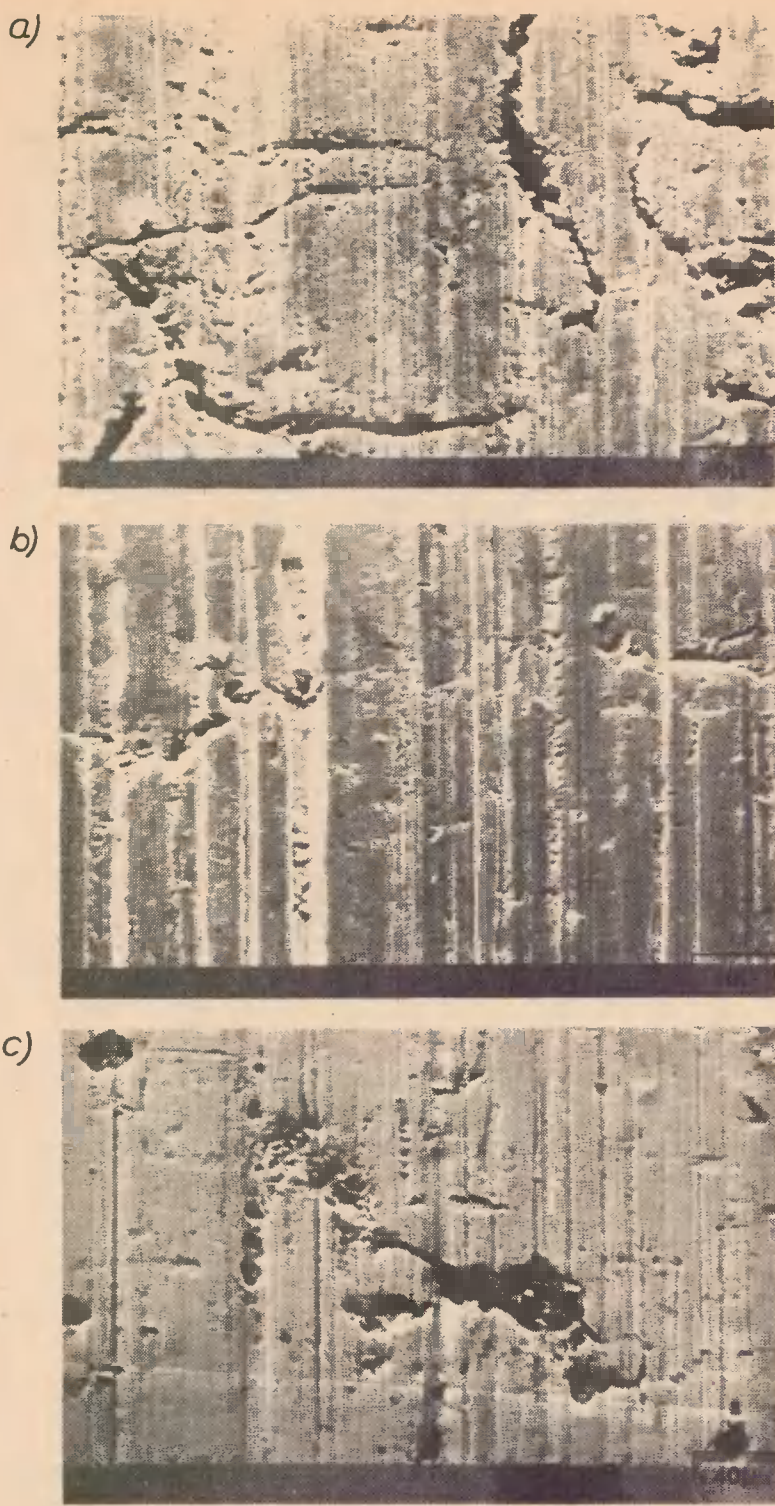
c)



Rys. 4.5. Powierzchnia cylindra żelwnego (CZ) honowanego jednokierunkowo poprzecznie (HIP) po współpracy z UZ przez $2 \cdot 10^5$ suwów tloka: a - ECH
b - ECH+HS; c - HS; pow. 160x

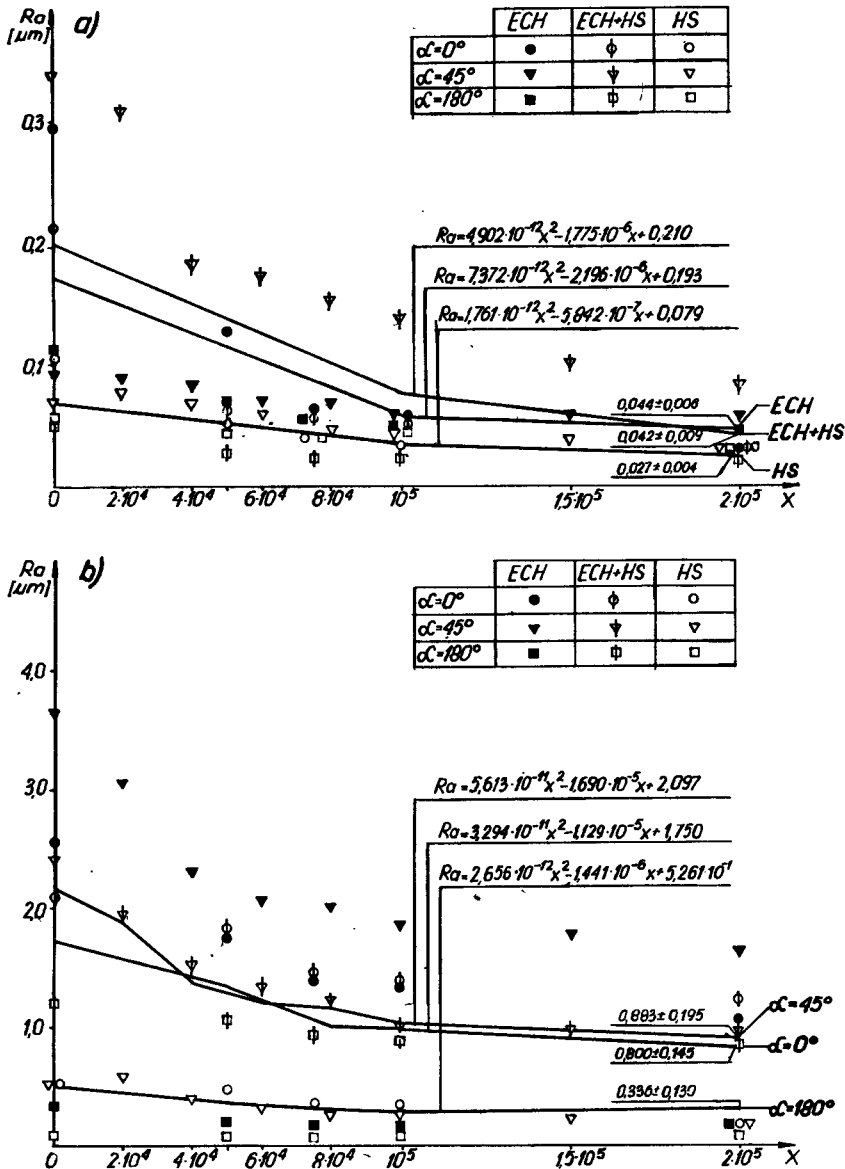


Rys. 4.6. Przyrost średnicy Δd cylindra żeliwnego (CZ) oraz ubytek masy Δm uszczelnienia żeliwnego (UZ) w funkcji liczby x suwów tłoka w zależności od: a – sposobu wytwarzania, b – sposobu honowania [33, 35]



Rys. 4.7. Powierzchnia cylindra żeliwnego (CZ) honowanego ściernie (HS) po współpracy z uszczelnieniem żeliwnym (LZ) przez $2 \cdot 10^5$ suwów tłoka: a – HJP, b – HD, c – HJW; pow. 400x

równaniu z ECH+HS a tym bardziej z HS. Nadtrawienia te w cylindrze żeliwnym są na tyle głębokie, że widać je jeszcze po współpracy z uszczelnieniem tłoka przez $2 \cdot 10^5$ suwów (rys. 4.5a), pomimo wystąpienia większych przyrostów średnicy Δd CZ w porównaniu z CS. Występują one także w CZ, kształtowanych za pomocą ECH+HS (rys. 4.5b), chociaż w dużo mniejszym nasileniu. Występujące w ECH nadtrawienia powierzchni, przejawiające się zmniejszoną jej nośnością, czynią powierzchnię nie tylko



Rys. 4.8. Zmiana chropowatości powierzchni cylindra w funkcji liczby x suwów tłoka: a) CS-UZ. b) CZ-UZ [33, 35]

bardziej ścieralną w porównaniu z ECH+HS lub HS, ale także bardziej ścierną. Potwierdzają to rys. 4.4 oraz 4.6. O zwiększonej ścieralności powierzchni kształtowanej za pomocą ECH, w porównaniu z HS, może świadczyć także zmiana parametru R_a chropowatości powierzchni w funkcji liczby x suwów tłoka (rys. 4.8a).

Porównując powierzchnie pokazane na rys. 4.1 i 4.3a ÷ c łatwo zauważyć istotną różnicę w kierunkowości śladów obróbki. Może ona wpływać na ocenę mikrogeometrii powierzchni w zależności od kierunku ruchu końcówki diamentowej profilografaometru, która w przypadku oceny chropowatości powierzchni otworów o znacznym stosunku l/d przemieszczana jest najczęściej równoległe do ich osi. Potwierdza to rys. 4.8b, na którym pokazano wartości parametru R_a (dla $x = 0$) powierzchni obrabianej za pomocą tych samych pilników ściernych, przy jednoczesnym zachowaniu stałych parametrów obróbki: v_e , p , i . Należy zauważyć, że pomiar mikrogeometrii powierzchni w przypadku $\alpha = 180^\circ$, w sposób równoległy do osi otworu, nie odzwierciedla parametru R_a a tylko jedną z jego składowych [89]. Wymieniony rysunek wykazuje także, że w przypadku $\alpha = 180^\circ$ wartość chropowatości powierzchni w funkcji liczby x suwów tłoka nie ulega zmianie w porównaniu z wartością parametru R_a dla $\alpha = 0^\circ$ oraz 45° . Przebieg zmian parametru R_a powierzchni CS współpracujących z UZ można przedstawić równaniem regresji:

$$R_a = 5,813 \cdot 10^{-1} - 9,666 \cdot 10^{-3}x + 7,602 \cdot 10^{-3}\alpha + 4,003 \cdot 10^{-2}H + \\ + 3,294 \cdot 10^{-5}x^2 - 5,271 \cdot 10^{-5}\alpha^2 - 1,787 \cdot 10^{-4}H^2 + \\ + 2,314 \cdot 10^{-5}x\alpha - 4,206 \cdot 10^{-5}xH - 7,849 \cdot 10^{-5}\alpha H \text{ } [\mu\text{m}]. \quad (4.3)$$

Utrzymywanie się parametru chropowatości, dla $\alpha = 180^\circ$ na prawie niezmiennym poziomie w funkcji liczby x suwów tłoka, może świadczyć o nie występowaniu docierania się współpracującej pary kinematycznej. Świadczą o tym także fotogramy powierzchni CZ (rys. 4.7), kształtowanej za pomocą HS z różnymi kątami ($\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, $\alpha = 180^\circ$) po współpracy z UZ przez $2 \cdot 10^5$ suwów tłoka. Z rys. 4.7 wynika, że każda powierzchnia, bez względu na początkowy kąt α skrzyżowania śladów obróbki, po odpowiednio długim okresie współpracy pary kinematycznej, przybiera ślady współpracy tak samo równoległe do osi cylindra, jak ślady ziarn ściernych w HJW. We wszystkich badanych przypadkach powierzchnie kształtowane za pomocą HD (obecnie powszechnie stosowane) charakteryzują się większą lub znacznie większą ściernością i ścieralnością w porównaniu z kształtowanymi za pomocą HJW. Wynikać to może z dotychczasowej optymalizacji kąta α [55, 129] tylko ze względu na wydajność obróbki, a to okazuje się niewystarczające. O wyższości HJW nad HD przekonują także przecieki statyczne i dynamiczne w badanych cylindrach, omówione w pracach [35, 125].

Porównując rys. 4.8a i 4.8b można zauważyć, że CS kształtowany za pomocą ECH lub ECH+HS, posiada znacznie mniejszą, w wielu przypadkach wystarczającą, chropowatość powierzchni, aniżeli CZ kształtowany za pomocą HS.

Poddając otrzymane wyniki badań testowaniu istotności wpływu poszczególnych zmiennych za pomocą testu F – Snedecora można stwierdzić, że:

- we wszystkich badanych przypadkach liczba x suwów tłoka wpływa istotnie na przyrost średnicy Δd cylindrów oraz ubytek masy Δm uszczelnienia, co jest

oczywiste i potwierdza jedynie poprawność przeprowadzonych badań i obliczeń,

- kąt α skrzyżowania śladów obróbki we wszystkich badanych przypadkach wpływa istotnie na ubytek masy Δm uszczelnienia. Należy zauważyć, że Δm najmniejsze wartości przyjmuje dla $\alpha = 180^\circ$;
- kąt α skrzyżowania śladów obróbki wpływa także istotnie na przyrost średnicy Δd cylindrów stalowych i żeliwnych współpracujących z UZ, natomiast nie wpływa istotnie w przypadku współpracy tych cylindrów z UG. Ten ostatni przypadek można tłumaczyć znikomymi przyrostami średnicy Δd , wielokrotnie mniejszymi w porównaniu z cylindrami współpracującymi z UZ. Należy dodać, że we wszystkich badanych parach kinematycznych przyrost średnicy Δd cylindrów jest najmniejszy dla $\alpha = 180^\circ$;
- sposób wytwarzania (ECH, ECH+HS, HS) nie wpływa istotnie na przyrost średnicy Δd cylindrów stalowych, lecz wpływa istotnie na Δd cylindrów żeliwnych. We wszystkich badanych przypadkach przyrost średnicy Δd cylindrów wytwarzanych za pomocą HS jest najmniejszy. W trzech na cztery przypadki, Δd cylindrów kształtowanych za pomocą ECH+HS znajduje się pomiędzy Δd cylindrów HS oraz ECH;
- sposób wytwarzania (ECH, ECH+HS, HS) istotnie wpływa na ubytek masy Δm uszczelnienia tylko dla przypadku UG,
- sposób wytwarzania (ECH, ECH+HS, HS) oraz honowania (HJW, HD, HJP) wpływa istotnie na zmianę parametru R_a chropowatości powierzchni cylindrów żeliwnych. Powierzchnie cylindrów stalowych charakteryzują się małymi wartościami parametru R_a bezpośrednio po obróbce, ulegającymi nieznacznym zmianom w funkcji liczby x suwów tłoka. Bardzo małe zmiany parametru chropowatości dla przypadku HJW mogą świadczyć o tym, że para kinematyczna: cylinder – uszczelnienie tłoka od początku współpracy pracuje w warunkach dotarcia.

Porównując ze sobą otrzymane wyniki badań można zauważyć, że CS wytworzone za pomocą ECH w sposób HJW charakteryzują się mniejszymi przyrostami średnicy Δd w porównaniu z przyrostami Δd cylindrów stalowych HS w sposób dwukierunkowy. Również ubytek masy Δm uszczelnienia współpracującego z CS, wytworzonym za pomocą ECH* w sposób HJW, jest mniejszy, aniżeli w przypadku współpracy z cylindrem stalowym HS lecz w sposób HD.

* Właściwość procesu ECH, przejawiająca się w nierównomiernym rozwarzaniu składników fazowych materiału obrabianego (wpływająca na zwiększoną ścierność i ścierność stali i żeliwa) jest obecnie wykorzystywana przez autora w pracy wdrożeniowej ECH do przemysłu samochodowego, a w szczególności do obróbki wykańczającej powierzchni cylindrów silników spalinowych, wykonywanych w całości z aluminium z dużą zawartością krzemu (AlSi17Cu4). W czasie ECH tych cylindrów, obrabia się powierzchnię honowaną tak długo, aż nie wyłonią się z niej (ok. $1 \div 3 \mu\text{m}$) bardzo twarde kryształy krzemu (ok. 1200 HV). Z kryształami krzemu współpracuje żelazowana elektrochemicznie powierzchnia tłoka, również aluminiowego. Obrobiona za pomocą ECH powierzchnia cylindra może pomieścić między wystającymi z niej kryształami krzemu dostateczną warstwę czynnika smarującego i przyczynia się, jak wykazują badania, do znacznego wydłużenia trwałości tej pary kinematycznej w stosunku do rozwiązań dotychczasowych. Jest to jednak odrębny problem – wymagający dalszych badań – i nie wchodzi w zakres tej pracy.

V. WNIOSKI

W rezultacie przeprowadzonych analiz, badań teoretycznych oraz doświadczalnych procesu ECH można przedstawić następujące wnioski teoretyczne i praktyczne:

1. Wnioski teoretyczne

1. Honowanie elektrochemiczne (ECH) jest procesem złożonym, ponieważ oddziałuje w nim jednocześnie wiele zjawisk fizycznych. Opis tego procesu modelem teoretyczno-dedukcyjnym obecnie jest praktycznie niemożliwy. Można jednak, w oparciu o analizę teoretyczną małych podsystemów (przedstawioną we własnych badaniach teoretycznych – p. III) oraz o badania doświadczalne, ustalić istotność wpływu poszczególnych czynników na wyniki tego procesu. Potwierdzeniem tego ostatniego mogą być zbudowane przez autora i zawarte w pracy modele indukcyjne tego procesu (p. IV: 3.9, 3.10, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 4.1, 4.2, 4.3);
2. Wydajność obróbki za pomocą ECH zależy od sposobu honowania (HD, HJW). W obu sposobach honowania na wydajność ECH wpływa istotnie: jednostkowa gęstość j prądu elektrycznego (natężenie prądu roztwarzającego), nacisk jednostkowy p na pilniki ściernie oraz czas obróbki t . Ponadto na wydajność HJW istotnie wpływa prędkość skrawania v_e ;
3. Dokładność wykonania odchyłek kształtu powierzchni obrabianej za pomocą ECH nie zależy istotnie od: i , t , v_e , p , w przebadanym zakresie zmian tych parametrów, co może świadczyć o sterowaniu odchyłkami kształtu jedynie za pomocą czynników stałych. Z badań teoretycznych autora wynika, że w procesie ECH można spodziewać się małych odchyłek kształtu jeżeli: doprowadzenie energii elektrycznej do strefy obróbki jest ekwipotencjalne, stosowany jest elektrolit pasywujący silnie i przepływa w kierunku najmniejszego wymiaru katody, występuje stały czas t_e oddziaływania katody z kształtowaną powierzchnią, zapewniona jest stała liczba n_t oddziaływań pilników ściernych, stosowana jest mała grubość s_0 szczeliny międzyelektrodowej;
4. Mikrogeometrię powierzchni wytworzonej w sposób (ECH+HS) za pomocą HD oraz HJW nie zależy istotnie od parametrów zmiennych (i , t , v_e , p) w przebadanym zakresie ich zmian. Dotyczy to parametrów: R_ϕ , R_{\max} oraz nośności liniowej N_L ustalonej na wysokości $R = 20\%$ oraz $R = 50\%$. Można uznać, że nośność liniowa profilu powierzchni HJW jest większa od nośności powierzchni HD. Dane te sugerują celowość szerszego stosowania HJW w miejsce HD;
5. Opory skrawania towarzyszące ECH uzależnione są od sposobu honowania (HD, HJW). Na wartość oporów skrawania w ECH, w przebadanym zakresie

zmian parametrów, istotnie wpływa tylko nacisk jednostkowy p na pilniki ściernie;

6. Ścierność i ścieralność powierzchni honowanej, oceniana w badaniach konstrukcyjnych, jest uzależniona od sposobu wytwarzania (ECH, ECH+HS, HS) oraz sposobu honowania (HD, HJW, HJP). We wszystkich badanych przypadkach zużycie powierzchni cylindrów (przyrost średnicy Δd) oraz ubytek masy Δm uszczelnienia tłoka przyjmuje najmniejsze wartości dla HJW ($\alpha = 180^\circ$). Również zużycie powierzchni cylindrów HS jest najmniejsze, pomimo że nie we wszystkich badanych przypadkach materiałów cylindrów oraz uszczelnień tłoka sposób wytwarzania (ECH, ECH+HS, HS) wpływa istotnie na ścierność i ścieralność honowanej powierzchni;

2. Wnioski praktyczne

1. Proces ECH umożliwia połączenie w jednozabiegowej operacji stosowane dotychczas dwie operacje: obróbkę wstępną (kształtującą) oraz wykańczającą. Przeprowadzone doświadczenia dowodzą, że za pomocą ECH można kształtować powierzchnie o znacznych początkowych odchyłkach kształtu (np. zdeformowane obróbką cieplną), sięgających pola tolerancji IT13. W przypadku zastosowania parametrów w centrum przyjętego programu badań, wartości średnie poszczególnych odchyłek mieszczą się: dla HD $\delta_{r_{sr}}$ oraz $\delta_{w_{sr}}$ w IT5÷IT7, dla HJW $\delta_{r_{sr}}$ oraz $\delta_{w_{sr}}$ w IT6÷IT8. Na osiągnięcie tych wartości pozwala narzędzie konstrukcji autora [27, 39], użyte w doświadczeniach. Umożliwia ono uzyskanie chropowatości powierzchni: $R_{a_{sr}} = 0,28 \mu m$ dla HJW, $R_{a_{sr}} = 0,16 \mu m$ dla HD oraz może występować w zaprojektowanym przez autora układzie ACG automatyzującym proces honowania, a w szczególności poprawianie odchyłki walcowości otworów honowanych;

2. Zbudowane modele indukcyjne procesu ECH umożliwiają, dla praktycznych przypadków procesu mieszczących się w przebadanym zakresie zmian parametrów zmiennych (i , t , v_e , p), ustalić wydajność obróbki HD oraz HJW (modele: 3.9, 3.10) oraz siły skrawania i momenty towarzyszące procesowi (modele: 3.15, 3.16, 3.17, 3.18). Zbudowane doświadczalnie modele matematyczne umożliwiają także określenie ścierności i ścieralności powierzchni wytworzonej za pomocą (ECH, ECH+HS, HS) oraz honowanej w sposób (HD, HJW, HJP) dla badanych materiałów cylindrów (40H, ZI250) oraz uszczelnień (UZ, UG). Modele: (4.1), (4.2) przedstawiają te zależności dla przypadku CS-UZ oraz CZ-UZ, a model (4.3) przebieg zmian parametru R_a powierzchni honowanej w funkcji liczby x suwów tłoka dla przypadku CS-UZ.

Analiza literatury oraz wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych, potwierdzające tezy autora, upoważniają do sformułowania wniosków dotyczących dalszych badań ECH:

1. Dalszych badań teoretycznych i doświadczalnych wymaga obszar zastosowań ECH wynikający z właściwości obrabianych materiałów oraz własności i właściwości warstwy wierzchniej,
2. Większej uwagi wymagają efekторы biorące bezpośredni udział w ECH. Dotyczy to zarówno narzędzi ściernych, jak i elektrolitów. Rozwój tych pierwszych powinien

doprowadzić do szerszego wykorzystywania ich spoiwa jako katody. Badania elektrolitów powinny zmierzać do zwiększenia ich konduktancji oraz możliwości pasywujących powierzchni kształtowanych;

3. Dalszych badań teoretycznych i doświadczalnych wymaga także problem uzyskiwanych za pomocą ECH dokładności wymiarowo-kształtowej i mikrogeometrii powierzchni. Uzyskane w doświadczeniach autora wyniki zachęcają do dalszych prac w tym zakresie, szczególnie nad uzyskiwaniem dokładności najwyższych.



LITERATURA

- [1] Аксенов В. А., Керша Ф. П., Охтенъ В. Г.: Исследование особенностей процесса микрорезания в условиях анодного растворения, *Мат. IV Конф. Размерная электрохимическая обработка деталей машин*, Тула, 1975
- [2] Albiński K.: Obróbka erozyjna i obrabiarki erozyjne — Aktualna i perspektywiczna problematyka naukowo-badawcza, *Mat. V Międzynarod. Konf. Postępy w teorii i technice obróbki materiałów*, IOS, Kraków, 1979
- [3] Albiński K.: Sposób elektrochemicznego szlifowania wałków. Patent PRL Nr 58091
- [4] Albiński K., Dąbrowa M., Ruszaj A.: Wpływ wybranych parametrów elektrycznych i hydrodynamicznych na proces elektrochemicznej obróbki bezstykowej. *Postępy w technologii maszyn i urządzeń*, PAN, Kraków, 1977, Nr 1
- [5] Аваков А. А., Будзыньский А. Ф.: Нынешнее состояние и перспектива возможностей измерения величин, характеризующих термоэлектрические явления в цепи станок-изделие-резец, „Знание”. Киев, 1974
- [6] Bannard J.: Fine hole drilling using electrochemical machining, 19-th MTDR Conference, London, 1977
- [7] Buć J.: Obróbka powierzchniowa metali oraz niektóre obróbki specjalne, *Politechnika Warszawska*, 1967
- [8] Budzyński A. F.: Automatische Maschinen vom Gesichtspunkt der Kibernetik aus, *Mat. Międzynarod. Konf. Werkzeugmaschinen-Tagung*, Warna, 1967
- [9] Budzyński A. F.: Cybernetyka a obrabiarki i narzędzia skrawające, *Mechanik*, 1969, Nr 12
- [10] Budzyński A. F.: Electrochemical honing machine, *Polish Technical Review*, WCT, Warszawa, 1978, Nr 12
- [11] Будзыньский А. Ф.: Электрические и магнитные явления при обработке резаньем, *Мат. конф. Пол. Инст. им. К. Маркса, Ереван*, 1973
- [12] Budzyński A. F.: Gładzenie elektrochemiczne, efektywna metoda obróbki wykańczającej otworów, *Przegląd Mechaniczny*, 1976, Nr 17
- [13] Budzyński A. F.: Honowanie elektrochemiczne, wyniki badań eksploatacyjnych honownicy elektrochemicznej EHCA63, *Mat. V Międzynarodowej Konf. Postępy w teorii i technice obróbki materiałów*, IOS, Kraków, 1979
- [14] Budzyński A. F.: Honownica elektrochemiczna, *Mechanik*, 1979, Nr 1
- [15] Budzyński A. F.: *Mechanika—Technologia*, WCT NOT, Warszawa, 1977
- [16] Budzyński A. F.: Możliwości technologiczne honownicy elektrochemicznej EHCA63, *Mat. Konf. Honowanie elektrochemiczno-ściernie*, Bydgoszcz, 1978
- [17] Budzyński A. F.: O uniwersalności pojęć nauki konstrukcji, *Mat. VIII Sympozjum Podstaw Konstrukcji Maszyn*, ATR, Bydgoszcz, 1977
- [18] Budzyński A. F.: Rodeuses électrochimiques, *Technique Polonaise*, WCT, Warszawa, 1978, Nr 12
- [19] Budzyński A. F.: Sposób badania trwałości ostrza, zapewniający dużą powtarzalność wyników, *Mechanik*, 1971, Nr 12
- [20] Budzyński A. F.: Structure — its meaning in the science of manufacture and in the machine design theory, *Mat. International Seminar on the Design Science*, Gliwice, 1972
- [21] Budzyński A. F.: Teoria projektowania i konstrukcji maszyn a techniki wytwarzania, *Mat. Symp. Naukowe problemy konstrukcji, technologii i eksploatacji maszyn*, Zeszyty Naukowe ATR, Bydgoszcz, 1977

- [22] Budzyński A. F.: The influence of natural and forced currents on tool life in finish turning. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Oxford, 1976. Vol. 16, Nr 2
- [23] Budzyński A. F.: Theoretical principles and technical factors of electrochemical honing. *Mat. International Symposium For Electromachining ISEM6*, Kraków, 1980
- [24] Budzyński A. F.: Wpływ naturalnych prądów termoelektrycznych oraz wymuszonych w układzie OUPN na trwałość ostrza na przykładzie obróbki wykańczającej toczeniem. *Politechnika Poznańska*, 1969. Dysertacja na stopień dr n.t.
- [25] Budzyński A. F.: Wpływ oporności elektrycznej obrabiarki na trwałość ostrza narzędzia skrawającego. *Mechanik*, 1971, Nr 7
- [26] Budzyński A. F.: Współczesne problemy technosfery. *Mat. Symp. Naukowe problemy konstrukcji, technologii i eksploatacji maszyn*, Zeszyty Naukowe ATR, Bydgoszcz, 1977
- [27] Budzyński A. F.: Patenty PRL i zgłoszenia patentowe dotyczące ECH, Nr: 59820, 109202, 109655, 110250, 111152, 205072, 205532, 205836, 207413, 207595, 207596, 207667, 207717, 208127, 208128, 208148, 208183, 208353
- [28] Budzyński A. F.: Założenia projektowo-konstrukcyjne honownicy elektrochemicznej EHCA63 (niepublikowane), Bydgoszcz, 1976
- [29] Budzyński A. F.; Karwowski K.: Układ sterowania adaptacyjnego (ACG) procesem honowania poprawiający walcowość otworów. *Mat. Międzynarodowej Konf. Sterowanie adaptacyjne w technologii maszyn*, AC'80, Warszawa, 1980
- [30] Budzyński A. F., Orobiej J.: Docieranie otworów w diamencie. *Mat. II Konf. Obróbka materiałów niemetalowych*, Rzeszów, 1976
- [31] Budzyński A. F., Orobiej J.: Racja możliwości wytwórczych małych otworów. *Mat. VIII Symp. Podstaw Konstrukcji Maszyn*, ATR, Bydgoszcz, 1977
- [32] Budzyński A. F., Seroka St.: Honowanie elektrochemiczne otworów walcowych o powierzchniach nieciągłych. *Mat. IV Konf. Obróbka ścierna*, Łódź, 1981
- [33] Budzyński A. F., Zakościelny St.: Badanie ścierności i ścierności powierzchni honowanej elektrochemicznie. *EM'82*, Bydgoszcz, 1982
- [34] Budzyński A. F., Knopik L., Zakościelny St.: Honowanie elektrochemiczne — badanie użytkowej przydatności stanu warstwy wierzchniej cylindrów silników spalinowych. *Mat. Konf. Honowanie elektrochemiczno-ścierna*, Bydgoszcz, 1978
- [35] Budzyński A. F., Seroka St., Zakościelny St.: Wpływ kierunkowości śladów obróbki na ścierność i ścierność powierzchni. *Zeszyty Naukowe AGH*, Kraków, 1981
- [36] Budzyński A. F., Szydłowski A., Wocianiec R.: Honowanie elektrochemiczne — parametry procesu. *Mat. V Międzynarodowej Konf. Postępy w teorii i technice obróbki materiałów*, IOS, Kraków, 1979
- [37] Budzyński A. F., Szydłowski A., Wocianiec R.: Wpływ ruchów kształtujących narzędzia na odchyłki kształtu otworów honowanych elektrochemicznie. *Mat. Symp. Naukowe problemy konstrukcji, technologii i eksploatacji maszyn*, Zeszyty Naukowe ATR, Bydgoszcz, 1977
- [38] Budzyński A. F. i inni: Sprawozdania z prac w Problemie Węzłów ym 05.1.6 (koordynator Prof. zw. dr hab. inż. Kazimierz Albiński) w zakresie honowania elektrochemicznego. *IOS*, Kraków, 1975—80 (niepublikowane)
- [39] Budzyński A. F. i inni: Patenty PRL i zgłoszenia patentowe dotyczące ECH, Nr: 207412, 208354, 219526, 219528
- [40] Carnely H.: Honen mit Diamantwerkzeugen. *Werkstattstechnik*, 1966, Nr 10
- [41] Чеповецкий И. X., Стрижаков В. Л., Кизиков Э. Д.: Роторное алмазное хонингование, *Станки и инструмент*, 1976, № 4
- [42] Чеповецкий И. X., Авдеев В. И., Безолюк Ю. В.: Хонингование алмазными эластичными брусками, *Вестник машиностроения*, 1974, № 11
- [43] Degner W., Völkel R.: Elektrochemisches Zieh Schleifen. *Metallverarbeitung*, 1976, Nr 2
- [44] Dietrych J.: Projektowanie i konstruowanie. *WNT*, Warszawa, 1974
- [45] Dietrych J.: System i konstrukcja. *WNT*, Warszawa, 1978
- [46] Дмитриев А. Б., Седыкин Ф. В.: Влияние электрохимической обработки на усталостную прочность сплавов, *Вестник машиностроения*, 1970, № 5

- [47] Dmochowski J.: Podstawy obróbki skrawaniem, PWN, Warszawa, 1978
- [48] Dreesmann E.: Elektrochemisches Außenhonen mit Diamantleisten. Dissertation Universität Braunschweig. 1972
- [49] Дрозд Ю. Э., Вишницкий А. Л.: О безводородной электрохимической обработке, *Электрoхим. и электрофиз. методы обработки*, 1975, № 3
- [50] Fejes I., Ionut V.: Contributie la studiul influentei parametrilor cinematici in procesul de honuire. *Construcția de Mașini*, 1968, Nr 2
- [51] Florczał T., Jurewicz W.: Wykaz technik wytwarzania. OBRPTiKM. Warszawa, 1973
- [52] Фрагин И. Е.: Алмазное хонингование закаленных чугуных гильз цилиндров, *Станки и инструмент*, 1966, № 12
- [53] Geworkjan G., Bajramjan A., Dadajan N.: Electrochemical deburring and hole drilling. *Mat. ISEM6. Kraków*, 1980
- [54] Glew D. A.: Fine hole drilling with ECM — technology and application. *Mat. ISEM6. Kraków*, 1980
- [55] Górski E.: Obróbka gładkościowa. WNT, Warszawa, 1970
- [56] Gruszka J.: Ocena powierzchni honowanej w tulejach cylindrowych silników spalinowych. *Mat. Konf. Honowanie elektrochemiczno-ścierne. Bydgoszcz*, 1978
- [57] Gwiazdowski W.: Kinematyka obrabiarek. WNT, Warszawa, 1965
- [58] Held G. R.: Honwerkzeug. Patent RFN Nr 2045769. 1975
- [59] Ибов В. А., Дрозд Ю. Э.: Электролит в ЭЦМ металов без газа на катоде, *Патент СССР № 458413*, 1975
- [60] Iskra R.: Technologia gladzenia otworów w cylindrach żeliwnych. *Mechanik*. 1972, Nr 3
- [61] Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej. ściernej i erozyjnej. WNT, Warszawa, 1970
- [62] Keller Cz.: Obróbka ścierna, materiały i narzędzia ścierne — Aktualna i perspektywiczna problematyka naukowo-badawcza. *Mat. V Międzynarod. Konf. Postępy w teorii i technice obróbki materiałów. IOS. Kraków*, 1979
- [63] Kimoto Y., Tamija K., Honda S.: Electrolytic mirror polishing assisted by mechanical abrasions of stainless steel. *Mat. ISEM6. Kraków*, 1980
- [64] Kimoto Y., Tamija K., Honda S.: Study of electrolytic abrasive mirror finishing of a cylindrical work. *Bull. Japan Soc. of Prec. Engg.* 1978, Vol 12, Nr 2
- [65] Kimoto Y. i inni: Electrolytic mirror polishing assisted by mechanical abrasions of stainless steel. *Journal of the Japan Society of Electrical—machining Engineers*. 1979, Vol 12, Nr 23
- [66] Корчагин Г. Н.: Моделирование стационарного и нестационарного процессов электрохимической размерной обработки деталей с длиномерными межэлектродными каналами, *Электрoхим. и электрофиз. методы обработки*, 1978, № 3
- [67] Kozak J.: Analiza dokładności kształtowania elektrochemicznego. *Technika lotnictwa i astronautyki. Warszawa*, 1970, Nr 8
- [68] Kozak J.: Kształtowanie powierzchni obróbką elektrochemiczną bezstykową (ECM). *Politechnika Warszawska*, 1976. Dysertacja na stopień dr hab.
- [69] Kozak J., Dąbrowski L., Łubkowski K.: Charakterystyka warstwy wierzchniej po obróbce elektrochemicznej — bezstykowej (ECM). *Mat. III Konf. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej. Gorzów*, 1980
- [70] Kozak J. i inni: Study on the influence of process parameters on the technological effects of pulse ECM. *Mat. ISEM6. Kraków*, 1980
- [71] Krawitz G.: Elektrochemisches Honen—Grundlagen und Erkenntnisse. *Werkstattstechnik*, 1976, Nr 5
- [72] Krawitz G.: Formverbesserung und Oberflächenausbildung beim Elektrochemischen Honen. *Dissertation Universität Karlsruhe*, 1976
- [73] Krawitz G.: Zylinderformkorrektur beim Elektrochemischen Honen, *HGF*, 1976, Nr 82
- [74] Krechlik R., Kusński J., Zyburą-Skrabalak M.: Wpływ warunków obróbki laserowej, elektroerozyjnej i elektrochemicznej na stan warstwy wierzchniej wybranych stali konstrukcyjnych. *Mat. III Konf. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej. Gorzów*, 1980
- [75] Кремень З. И., Медведев В. В., Дугин В. Н.: Хонингование и суперфиниширование стальных деталей брусками из эльбора, *Станки и инструмент*, 1975, № 2

- [76] Кривохижа В. Н., Кривохижа Г. П.: Статистический анализ размерной точности при электрохимическом хонинговании. Мат. IV. Коиф. Размерная электрохимическая обработка деталей машин, Тула, 1975
- [77] Kubiak M., Żebrowski H.: Wpływ warunków i parametrów gladzenia na stan warstwy wierzchniej. Mat. III Konf. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej. Gorzów, 1980
- [78] Kubota M.: Mechanical cutting ability of electrochemical grinding wheels. Mat. ISEM6. Kraków, 1980
- [79] Kunstetter S.: Narzędzia skrawające do metali. WNT, Warszawa, 1973
- [80] Lango M.: Badania w celu zwiększenia szybkości reakcji ciekłorodowych w obróbce ciekłorochemicznej. Sprawozdanie z prac n-b. IOS, Kraków, 1980 (niepublikowane)
- [81] Larsson C. N., Muzaffaruddin K.: Electrochemical effects on shape reproduction in electrochemical machining. 19-th MTDR Conference, London, 1977
- [82] Marciniak M.: Aspekty fizyczne kształtowania warstwy wierzchniej obróbką ścierną. Mat. III Konf. Wpływ technologii na stan warstwy wierzchniej. Gorzów, 1980
- [83] Маслов Л. Н., Пушкарев В. А.: Точность формообразования при алмазно-электрохимической хонинговании, Мат. IV Конф. Размерная электрохимическая обработка деталей машин, Тула, 1975
- [84] Маслов Л. Н., Могильников В. В., Сидоров Ю. В.: Влияние окружной скорости катода — инструмента на некоторые показатели процесса алмазно-электрохимического хонингования. Мат. IV Конф. Размерная электрохимическая обработка деталей машин, Тула, 1975
- [85] Маслов Л. Н., Могильников В. В., Сидоров Ю. В.: Влияние окружной скорости катода — инструмента на некоторые показатели процесса электрохимического хонингования, Электрохим. и электрофиз. методы обработки, 1978, № 3
- [86] Miś F.: Badanie wpływu elektrochemiczności obróbki luźnym ścierniwem na kształtowanie narzędzi z węglików spiekanych. Politechnika Krakowska, 1975. Dysertacja na stopień dr n.t.
- [87] Nicciąg H.: Metody pomiaru profili kołowych przy użyciu maszyn pomiarowych 3-koordynatowych. Mat. III Konf. Rozwój narzędzi skrawających i pomiarowych. Warszawa, 1980
- [88] Нечаев А. В., Левин А. Ю.: Нитратный электролит к ЭЦМ, Патент СССР № 1873384, 1975
- [89] Nowicki B.: Badania mikrostruktury geometrycznej powierzchni obrabianych i metod jej oceny. Politechnika Warszawska, 1980. Dysertacja na stopień dr hab.
- [90] Pahlitzsch G., Dreesmann E.: Einfluß des Werkstoffgefüges beim elektrochemischen Abtragen. ZWF, 1973, Nr 8
- [91] Pahlitzsch G., Dreesmann E.: Elektrochemisches Außenhonen von Hartmetallen mit Diamantleisen. Fachberichte für Oberflächen-technik, 1973, Nr 11
- [92] Pahlitzsch G., Dreesmann E.: Elektrochemisches Außen — Kurzhubhonen mit Diamantthonleisen. Annals of the CIRP, 1971, vol. 24
- [93] Piętrusewicz W.: Badania nad doбором warunków obróbki przy doglądaniu oscylacyjnym otworów. Politechnika Szczecińska, 1975. Dysertacja na stopień dr n.t.
- [94] Polański Zb.: Metody optymalizacji w technologii maszyn. WNT, Warszawa, 1977
- [95] Rosenberger R.: Untersuchungen über die Arbeitsbedingungen und den Einsatz des Elektrochemischhonsens. Dissertation TH, Stuttgart, 1969
- [96] Rosenberger R., Haasis G.: Levigatura elettrochimica. Macchine—Marzo, 1970
- [97] Ruszaj A.: Elektrochemiczna obróbka bezстыkowa — stan i możliwości zastosowania w polskim przemyśle. Mechanik, 1979, Nr 3
- [98] Ruszaj A.: Uproszczonej model matematyczny procesu elektrochemicznej obróbki bezстыkowej. Zeszyty Naukowe IOS, Kraków, 1979
- [99] Ruszaj A.: Wpływ parametrów hydrodynamicznych na proces elektrochemicznej obróbki bezстыkowej. Politechnika Krakowska, 1977. Dysertacja na stopień dr n.t.
- [100] Sawicki T.: Kinematyka procesu gladzenia otworów cylindrycznych. Mechanik, 1977, Nr 8
- [101] Schmitz A.: Die Formfehlerverbesserung beim Elektrochemischen Honen (ECH) nach den Grundlagen der EC — Bearbeitung. Industrie-Anzeiger, 1975, Nr 20
- [102] Schmitz A.: Oberflächenausbildung und Randschicht beim elektrochemischen Honen (ECH). Industrie-Anzeiger, 1975, Nr 55

- [103] Scholz E.: Elektrochemisches Honen. Technologie und Anlagen. Industrie-Anzeiger. 1970. Nr 24
- [104] Scholz E.: Untersuchung des elektrochemischen Honens. Dissertation TH. Aachen. 1968
- [105] Scholz E.: Untersuchung des elektrochemischen Honens. Industrie-Anzeiger. 1970. Nr 24
- [106] Sedykin F. W.: Some problems and perspectives of the development of electrical machining methods. Mat. ISEM6. Kraków. 1980
- [107] Seroka S., Budzyński A. F.: Badanie honowania elektrochemicznego jednokierunkowego wzdłużnego. EM'82. Bydgoszcz. 1982
- [108] Смоленцев В. П., Хайрутдинов А. К., Олейниченко Т. Ф.: Металлографические исследования поверхностного слоя сплавов после электрохимической размерной обработки, Физика и химия обработки материалов. 1971. № 1
- [109] Soliman S. M., Maksoud H. A., Lavendy M.: An investigation on the characteristics of electrolytic superfinishing. 19th MTDR Conference. London. 1977
- [110] Stankiewicz A.: Optymalizacja elektrochemicznego załamywania krawędzi. Mat. ISEM6. Kraków. 1980
- [111] Stasiaczek B., Żebrowski H.: Efektywność elektrochemicznego gladzenia otworów. Prace Naukowe Instytutu Technologii Budowy Maszyn Politechniki Wrocławskiej. Wrocław. 1979
- [112] Strauß W.: Elektrochemisches Honen von langen Bohrungen. Werkstatt und Betrieb. 1971. Nr 3
- [113] Sukemitsu I., Honda K.: Counter control in electrolytic honing. Journal of Mechanical Engineering Laboratory. 1971. Nr 2
- [114] Szafarski M.: AC — sterowanie adaptacyjne maszyn technologicznych. Mat. Międzynarodowej Konf. Serowanie adaptacyjne w technologii maszyn. AC'80. Warszawa. 1980
- [115] Szulc S., Sefko A.: Obróbka powierzchniowa części maszyn. WNT. Warszawa. 1976
- [116] Tymowski J.: Automatyzacja procesów technologicznych w przemyśle maszynowym. WNT. Warszawa. 1966
- [117] Uzarowicz A., Dobreńko W.: Własności warstwy wierzchniej stali łożyskowych po szlifowaniu ściernicami diamentowymi i elektrokorundowymi. Mechanik. 1974. Nr 4
- [118] Victor H., Krawitz G.: Maßnahmen zur Formverbesserung beim elektrochemischen Honen. Werkstattstechnik. 1976. Nr 66
- [119] Vogelgesang J., Zachwieja T.: Elektrochemiczne szlifowanie wałków i otworów. Mechanik. 1978. Nr 1
- [120] Walheim J., Sierzan T.: System przetwarzania danych do celów identyfikacji i optymalizacji procesów technologicznych. Mechanik. 1980. Nr 2
- [121] Walsch G.: Elektrochemisches Honen. Industrie-Anzeiger. 1971. Nr 42
- [122] Wieczorowski K., Przekwas J.: Wpływ zanieczyszczeń płynu obróbkowego na chropowatość szlifowanych powierzchni. Mechanik. 1978. Nr 5
- [123] Wroński L. T.: Podstawy budowy obrabiarek. WNT. Warszawa. 1964
- [124] Zachwieja T. i inni: Określenie wpływu warunków obróbki elektrochemicznej na stan warstwy wierzchniej. IOS. Kraków. 1977 (niepublikowane)
- [125] Zakościelny S.: Wpływ kierunkowości chropowatości powierzchni oraz sposobów wytwarzania na ścierność i ścieralność honowanej powierzchni na przykładzie siłowników hydraulicznych. Dysertacja na stopień dr. n. t.. Politechnika Śląska. Gliwice. 1981
- [126] Zieliński A.: Napęd i sterowanie hydrauliczne obrabiarek. WNT. Warszawa. 1969
- [127] Żebrowska-Lucyk S.: Wpływ rodzaju okręgu odniesienia na wynik oceny odchyłki kołowości. Mechanik. 1979. Nr 4
- [128] Żebrowski H.: Dokładność wymiarowo-kształtowa i jakość powierzchni honowanych otworów jako kryterium procesu. Mat. Konf. Honowanie elektrochemiczno-ściernie. Bydgoszcz. 1978
- [129] Żebrowski H.: Wpływ warunków obróbkowych na przebieg i wyniki gladzenia otworów w żeliwie. Politechnika Wroclawska. 1964. Dysertacja na stopień dr. n. t..
- [130] Żebrowski H., Mazurkiewicz M.: Badania nad zarysowaniem poicylnym naturalnym ziarnem ściernym. Mechanik. 1967. Nr 1
- [131] Żebrowski H., Stasiaczek B., Adamiak A.: Sprawozdania z prac w ramach PW 05.1.6. ATR. Bydgoszcz. 1980 (niepublikowane)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ХОНИНГОВАНИЯ (ЕСН)

Резюме

В работе рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования процесса электрохимического хонингования (ЕСН).

В теоретических исследованиях, кроме анализа существующих работ охватывающей: производительность обработки, получаемые точности размера и формы, шероховатость поверхности, роль абразивного зерна (НС) в процессе, а также эксплуатационное качество верхнего слоя, внимание сосредоточено, главным образом, на: определении места электрохимического хонингования среди других производственных техник, с обращением особого внимания на способы формирования внутренних поверхностей в виде кругового цилиндра методом двунаправленного хонингования (НД, скрещивающиеся следы обработки), однонаправленного поперечного хонингования (НП, круговые следы обработки) и продольного хонингования (НД, следы обработки вдоль образующих цилиндра), на влияние способа подвода электрической энергии и электролита и его движения на отображение геометрической формы катода, на влиянии времени воздействия катода на приращение диаметра формируемого отверстия, влиянии толщины межэлектродного зазора и свойства электролита на быструю убывания отклонения формы, на автоматизации формирования поверхности в виде кругового цилиндра а также ограничении применения ЕСН по поводу геометрических примет хонингованных отверстий.

Опираясь на теоретические и предварительные экспериментальные исследования спроектированы и созданы промышленные прототипы электрохимических хонинговальных станков (ЕНСА 63) вместе со специальными инструментами. С помощью этих станков проведены технологические экспериментальные исследования НД и НДВ охватывающие выяснение влияния основных параметров процесса (i , t , g , p) на: убыль массы определяющую производительность процесса, получаемые отклонения от круглости, прямолинейности оси и цилиндричности хонингованных отверстий, шероховатости поверхности и моменты M_0 и силы P_x сопутствующие ЕСН. Эти исследования дали возможность построить ряд индукционных математических моделей определяющих эти зависимости. Кроме этого проведены предварительные исследования адаптивной системы (АСГ) позволяющей автоматически исправлять цилиндричность хонингованных отверстий.

В экспериментальных конструкционных исследованиях хонингованной поверхности установлено, с помощью специального испытательного стенда, влияние способа производства (ЕСН, НС, ЕСН + НС) и хонингования (НД, НП, НДВ) на абразивность и стираемость хонингованной поверхности. Это влияние представлено также с помощью математических индукционных моделей.

В заключительной части работы представлены теоретические и практические выводы и предложения дальнейших исследований носящих общий характер. Ряд подробных выводов содержится в отдельных главах или вытекает при их изучении.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE PROCESS OF ELECTROCHEMICAL HONING (ECH)

Summary

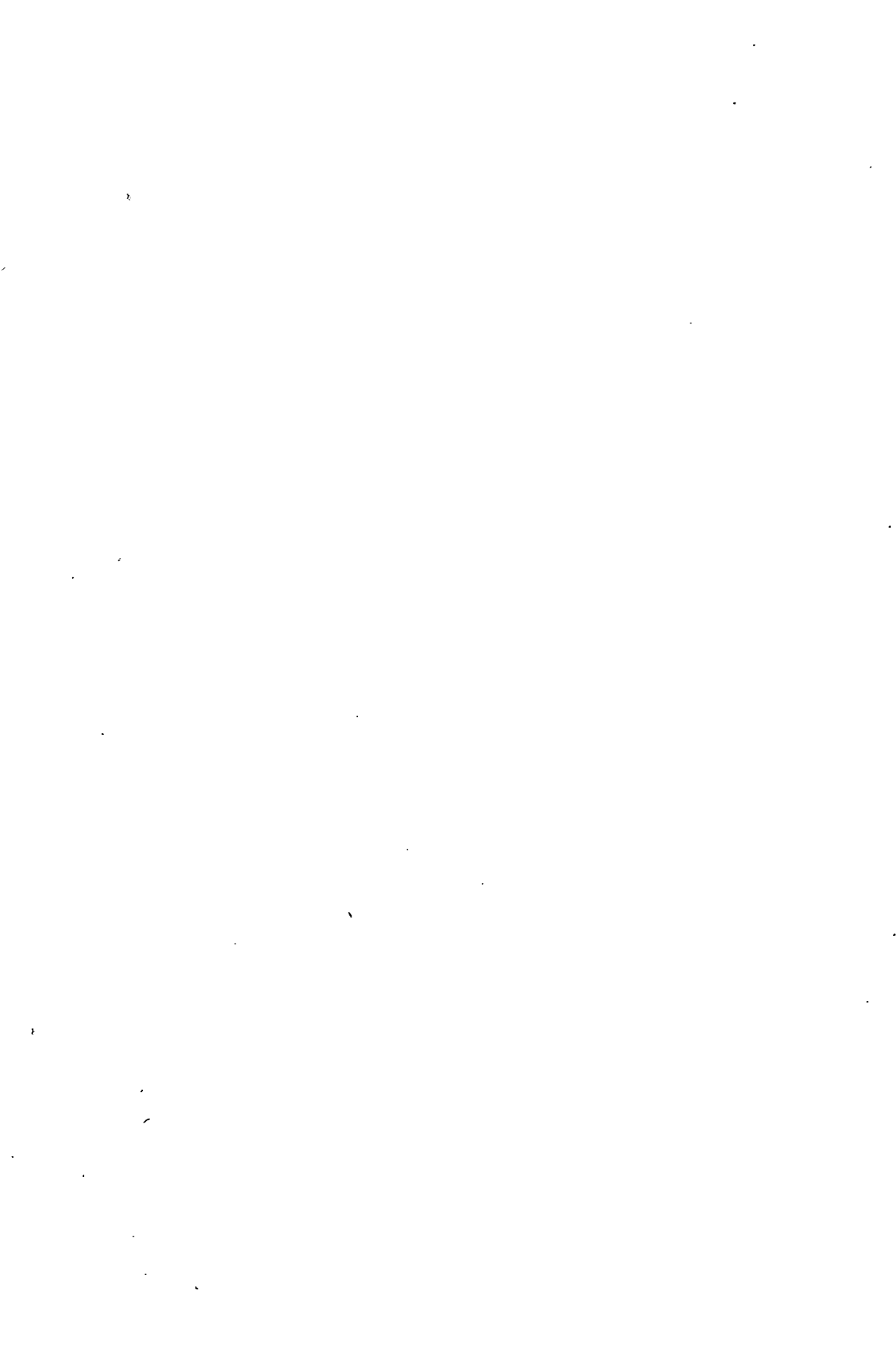
The dissertation deals with a discussion on a theoretical and experimental research on the process of electrochemical honing (ECH).

The theoretical part of the research (besides an analysis of the publications concerning machining output, precision of shape and dimensions, surface roughness, role of abrasive grain (HS) in the process as well as functional value of surface layer) includes mainly: determining significance of the ECH among other production techniques, particularly taking into consideration modes of forming inner layers of rotation cylinder shape by means of two-direction honing (HD) as well as one-direction transverse (HJP) and longitudinal (HJW) honing, the effect of the way of electrical energy supply and electrolyte and its motion on mapping geometrical features of the cathode, the effect of the time of the cathode activity on the increase in hole diameter, the effect of the gap thickness between electrodes and electrolyte properties on the rate of diminishing shape deviation, automatization of surface forming of rotation cylinder shape as well as restraints in applying the ECH caused by geometrical features of honed holes.

On the basis of theoretical and preliminary experimental tests there were designed and constructed prototypes of electrochemical honing machines (EHCA 63) together with specific tools for industrial purposes. Using these machine tools there were made technological experimental tests (know how) of the HD and HJW aiming at explaining the effect of the process basic parameters (i , t , v_e , p) on mass decrement determining the process output, roundness deviations obtained, axis rectilinearity and cylindrical shape of the honed holes, surface roughness as well as moments M_0 and forces P_x accompanying the ECH. The tests made it possible to construct a number of inductive mathematical models including these dependences. Additionally, preliminary tests of the adaptive system (ACG) enabling automatic correcting of cylindrical shape of the honed holes were made.

During construction experimental tests of the honed surface there – was defined, by means of a special test stand, the effect of a way of production (ECH, HS, ECH+HS) and honing (HD, HJP, HJW) on grindability and wear of the honed surface. The effect was presented by means of mathematical inductive models.

The final part of the work includes theoretical and practical conclusions of general character as well as suggestions for further research. Particular chapters include detailed conclusions and some of them follow from studying the contents of the chapters.



Biblioteka Główna ATR
w Bydgoszczy

	61745
--	--------------