

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

P. 3353/80

HUTNICTWO

**Z. 22
GLIWICE
1980**

P. 3353/80

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 676



FRANCISZEK GROSMAN

ANALIZA WPŁYWU PROCESU
KUCIA W KOWARKACH
NA WŁASNOŚCI WYROBU

PL ISSN 0324-802X

GLIWICE

1980

Cz. 4150

OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Adolf Maciejny

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Mistolek

**REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ**

Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU

Izabella Hyla

SEKRETARZ REDAKCJI

Wojciech Mikołajków

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Anna Błażkiewicz

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 170+85	Ark. wyd. 8,98	Ark. druk. 9,125	Papier offset kl. V 70x100, 80 g
Oddano do druku 19.08.80	Podpis. do druku 13.09.80	Druk ukończ. w paźdz. 1980	
Zamówienie 1044/80 S-23			Cena zł 22,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŚCI

	Str.
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WSTĘP	7
2. STUDIUM LITERATURY	8
2.1. Wprowadzenie	8
2.2. Kowarki do wstępnego przerobu	9
2.3. Cechy procesu wstępnego przerobu w kowarkach	14
2.4. Charakterystyka procesu kształtowania w kowarkach	18
2.5. Wpływ przeróbki plastycznej na strukturę i własności materiału	27
2.6. Podsumowanie przeglądu literaturowego	35
3. ZAŁOŻENIA I TEZA PRACY	37
4. TEORETYCZNA ANALIZA PROCESU KUCIA W KOWARKACH	39
4.1. Kotlina odkształcenia i przebieg odkształcenia w procesie kucia w kowarkach	39
4.2. Teoretyczna analiza wpływu warunków kucia na cechy geometryczne wyrobów	64
4.3. Podsumowanie	70
5. EKSPERYMENTALNE BADANIA PROCESU KUCIA W KOWARKACH	71
5.1. Program i metodyka badań	71
5.2. Charakterystyka stanowiska technologicznego i materiałów użytych w badaniach	77
5.3. Wyniki badań	80
5.3.1. Rozkład odkształceń w prętach odkutych w kowarce ...	80
5.3.2. Cechy geometryczne odkutych w kowarce prętów	83
5.3.3. Struktura prętów odkutych w kowarce	104
5.4. Analiza wyników badań eksperymentalnych	112
5.4.1. Rozkład lokalnych odkształceń	112
5.4.2. Cechy geometryczne przekroju prętów	124
5.4.3. Struktura prętów	127
5.4.4. Korelacja pomiędzy lokalnym odkształceniem a strukturą	128
6. WNIOSKI	134
LITERATURA	136
STRESZCZENIA	140

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a - wymiar poprzeczny pręta odpowiadający rozwarciu kowadeł
- b_k - szerokość części kalibrującej kowadła
- b_{og} - szerokość ogniska odkształcenia
- d - średnica lub wymiar poprzeczny pręta
- d' - wymiary sworzni w składanych próbkach
- d'' - jw.
- d_g - średnica gotowego pręta
- e - mimośrodowość wału napędowego kowarki
- F_n - nacisk narzędzia na materiał w procesie kucia w kowarce
- f_u - częstość uderzeń
- l - długość w kierunku osi pręta (z)
- l_k - długość części kalibrującej kowadła
- l_{og} - długość ogniska odkształcenia
- n_p - liczba uderzeń niezbędna do całkowitej redukcji przekroju w przepuście
- n_T - liczba uderzeń wykonana w czasie pełnego obrotu głowicy manipulatora
- p - podanie materiału między kolejnymi uderzeniami kowadeł
- p_s - skok linii śrubowej wyznaczonej śladami uderzeń na pręcie
- R - promień kołowego przekroju pręta
- r - współrzędna walcowego układu współrzędnych, względny promień
- r_w - promień wytoczenia wykroju kalibrującego
- S - powierzchnia płaskiego przekroju skupiska węglików
- S_n - przekrój wyjściowy
- S_{n-1} - przekrój wejściowy
- s - stopień przylegania
- T_x - czas pełnego cyklu pracy kowadeł
- T_m - czas pełnego obrotu głowicy manipulatora lub kutego materiału
- t - czas redukcji przekroju pręta w przepuście

- t_u - czas odkształcenia w uderzeniu
- t_{pc} - czas przerwy pomiędzy odkształceniami w kolejnych przepustach określonego przekroju pręta
- t_p - czas przerwy między kolejnymi odkształceniami
- v_m - prędkość posuwu manipulatora
- v_p - prędkość podawania
- x - wielkość zmienna lub współrzędna układu
- y - jw.
- z - jw.
- α_L - kąt skręcenia pręta na długości l
- α_u - kąt obrotu materiału między uderzeniami
- α_r - kąt pochylenia powierzchni roboczej kowadła
- α_w - kąt nachylenia powierzchni wprowadzającej kowadła
- γ - kąt odkształcenia postaciowego
- Δd - gniot całkowity w przepuście
- δ - kąt nachylenia dłuższej osi przekroju poprzecznego do kierunku promieniowego (r)
- $\Delta d'$ - gniot w pojedynczym uderzeniu
- Δx_{S-Cr} - wskaźnik zmienności wielkości ziarna
- Θ - kąt nachylenia promienia środka przekroju poprzecznego sworznia do kierunku osi układu (r, Θ, z)
- Θ - współrzędna walcowego układu współrzędnych
- μ - współczynnik tarcia
- φ - odkształcenie rzeczywiste
- φ_z - odkształcenie zastępcze
- $\dot{\varphi}$ - prędkość odkształcenia
- $\bar{\varphi}$ - średnia prędkość odkształcenia
- φ_p - odkształcenie w przepuście
- $\varphi_{poj.}$ - odkształcenie w pojedynczym uderzeniu
- Ψ - kąt współśrodkowy rozłożenia nacisku kowadeł na materiał

1. WSTĘP

Postęp w hutnictwie jest efektem doskonalenia znanych procesów technologicznych lub opracowania nowych procesów, których wprowadzenie wiąże się z zastosowaniem nowych urządzeń, a tym samym rozwojem bazy technicznej. Przykładem tego typu postępu jest zastosowanie kowarek do wstępnego przerobu materiałów [1 - 15]. Urządzenia te, jakkolwiek znane wcześniej, zastosowano w hutnictwie światowym dopiero pod koniec lat sześćdziesiątych. W hutnictwie polskim nastąpił w okresie ostatnich 10 lat szczególnie intensywny proces modernizacji bazy technicznej. Wyrazem tego jest m.in. uruchomienie w 1975 roku linii kowarek w Hucie "Batory" i planowane w najbliższym czasie wprowadzenie dalszych tego typu urządzeń.

W tych warunkach szczególnie znaczenia nabiera lepsze poznanie procesów kucia w kowarkach i ich doskonalenie w celu wykorzystania wszelkich rezerw tkwiących w tym procesie technologicznym. Z dotychczasowych publikacji na temat kowarek znane są ich walory eksploatacyjne i technologiczne. Publikacje te mają bowiem w zdecydowanej większości charakter informacyjno-reklamowy. Rzadko natomiast dotyczą analizy tego procesu, a zupełnie brak jest pozycji, które zawierałyby dane z zakresu racjonalnego postępowania przy doborze parametrów kucia. Pewne nieliczne pozycje [16-25] z zakresu analizy procesu przeróbki plastycznej w kowarkach poświęcone są procesom kucia precyzyjnego, w którym zasadniczym celem jest nadanie wymaganych cech geometrycznych wyrobom. Są wśród nich pozycje literaturowe poświęcone zagadnieniu stanu naprężeń oraz parametrom siłowo-energetycznym procesu kucia w kowarkach.

Zamierzeniem niniejszej pracy jest dokonanie weryfikacji dotychczasowych poglądów w odniesieniu do wstępnego przerobu w kowarkach. Wymagało to zebrania i uporządkowania zawartych w literaturze wiadomości oraz przeprowadzenia teoretycznej i eksperymentalnej analizy procesu "kowarkowego". W konsekwencji tych działań zmierzano do opracowania naukowo uzasadnionych, racjonalnych podstaw i zasad projektowania procesów wstępnego przerobu w kowarkach.

2. STUDIUM LITERATURY

2.1. Wprowadzenie

Podstawowymi zadaniami nowoczesnego hutnictwa są: wytwarzanie odkuwek zbliżonych maksymalnie do kształtu i wymiarów gotowego wyrobu, a więc ograniczenie do minimum potrzeby stosowania obróbki skrawaniem; uzyskanie wyrobów o powtarzalnej i wysokiej jakości przy minimalnym nakładzie kosztów i dużej wydajności; możliwość przeróbki plastycznej stopów o małej odkształcalności i dużym oporze odkształcenia; zapewnienie bezpiecznych i nieuciążliwych warunków pracy. Zastosowanie w hutnictwie kowarek stworzyło większe możliwości spełnienia wyżej wymienionych wymagań.

Szczególnymi cechami kowarek są: duża wydajność, możliwość mechanizacji i automatyzacji procesu oraz wyjątkowa, nie osiągnięta w innych procesach kucia, precyzja.

Zakres zastosowania kowarek jest stosunkowo szeroki i można wyszczególnić następujące zasadnicze ich przeznaczenie:

- do wstępnego przerobu materiałów, tzw. kowarki redukcyjne,
- do precyzyjnego kucia odkuwek wydłużonych o zmiennym przekroju na długości,
- specjalizowane, np. do ostrzenia końcówek wsadów przed ciągnięciem, do zakuwania szyjek butli itd.

W zależności od ułożenia osi przekuwanego materiału kowarki dzieli się na:

- poziome, stosowane głównie do wstępnego przerobu i kucia odkuwek o dużych przekrojach i długościach,
- pionowe, stosowane głównie jako kowarki precyzyjne do kucia mniejszych odkuwek.

Cechami najbardziej różniącymi kowarki są budowa i zasady działania. Przekazanie nacisku na kowadełko może być hydrauliczne lub mechaniczne.

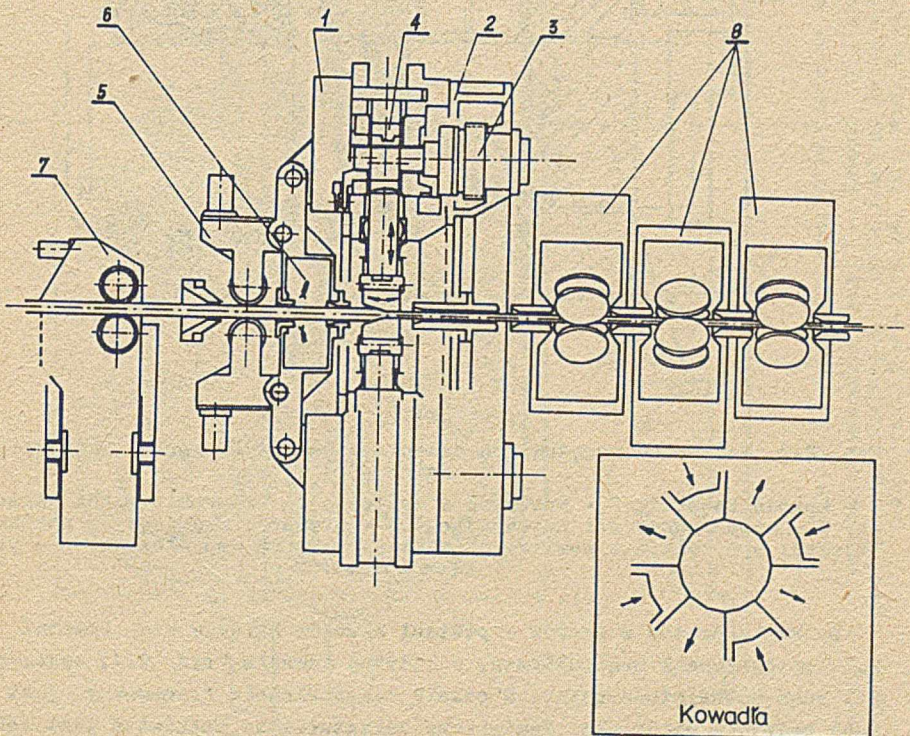
Kowarki hydrauliczne stosuje się głównie do ostrzenia końców rur przed ciągnięciem i do zakuwania szyjek butli. Stosunkowo niedawno pojawiły się również kowarki hydrauliczne do wstępnego przerobu. Do tej pory kowarki te nie są szerzej stosowane; trudno ustalić ostatecznie ich walory użytkowe w tym zakresie zastosowania. W pracy [4] autor stwierdza, że doświadczenia prowadzone nad zastosowaniem tego typu kowarki w Zakładach Stali Szlachetnych w Witten (RFN) zakończyły się niepowodzeniem, a główną przyczynę upatruje w małej częstotliwości uderzeń, szerokich tolerancjach wymiaro-

wych i dużych stratach energii spowodowanych ściśliwością oleju (medium zasilającego).

Kowarki mechaniczne są znacznie bardziej rozpowszechnione niż hydrauliczne. Do wstępnego przerobu stosuje się głównie kowarki mechaniczne, które pozbawione są wad znamiennych dla kowarek hydraulicznych.

2.2. Kowarki do wstępnego przerobu

Pod pojęciem kowarek do wstępnego przerobu rozumie się kowarki mogące kuc z materiału wsadowego o strukturze pierwotnej (lanej), tzn. z wlewków konwencjonalnych lub z ciągłego odlewania. Kowarki do wstępnego przerobu muszą zapewnić możliwość przekuwania prętów o dużych przekrojach, osiągnięcie dużych redukcji przekroju w jednym przejściu, co sprowadza się do zwiększonych wymagań w zakresie mocy napędu i wytrzymałości elementów kowarki. Moc kowarki jest szczególnie ważna w przypadku kucia stali wysokostopowych i stopów o dużym oporze odkształcenia plastycznego i wąskim zakresie temperatur przeróbki plastycznej. Przeróbka plastyczna na gorąco

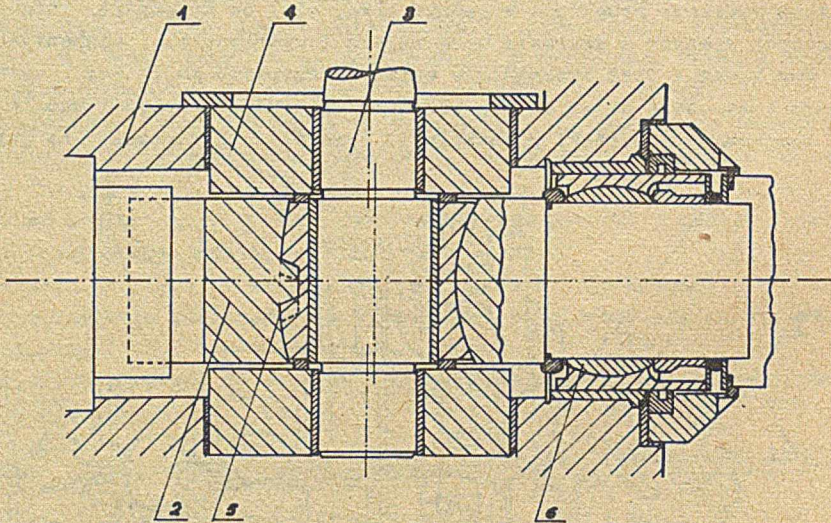


Rys. 2.1. Kowarka przelotowa do kucia wsadu z ciągłego odlewania [15]

1 - korpus kowarki, 2 - korpus napędu; 3 - koła napędowe; 4 - napęd posuwu; 5 - urządzenie podające; 6 - zbiornik zgorzeli; 7 - urządzenie do formowania pasma, 8 - blok walcowniczy

tych materiałów jest efektywna i niejednokrotnie w ogóle możliwa jedynie przy użyciu kowarek.

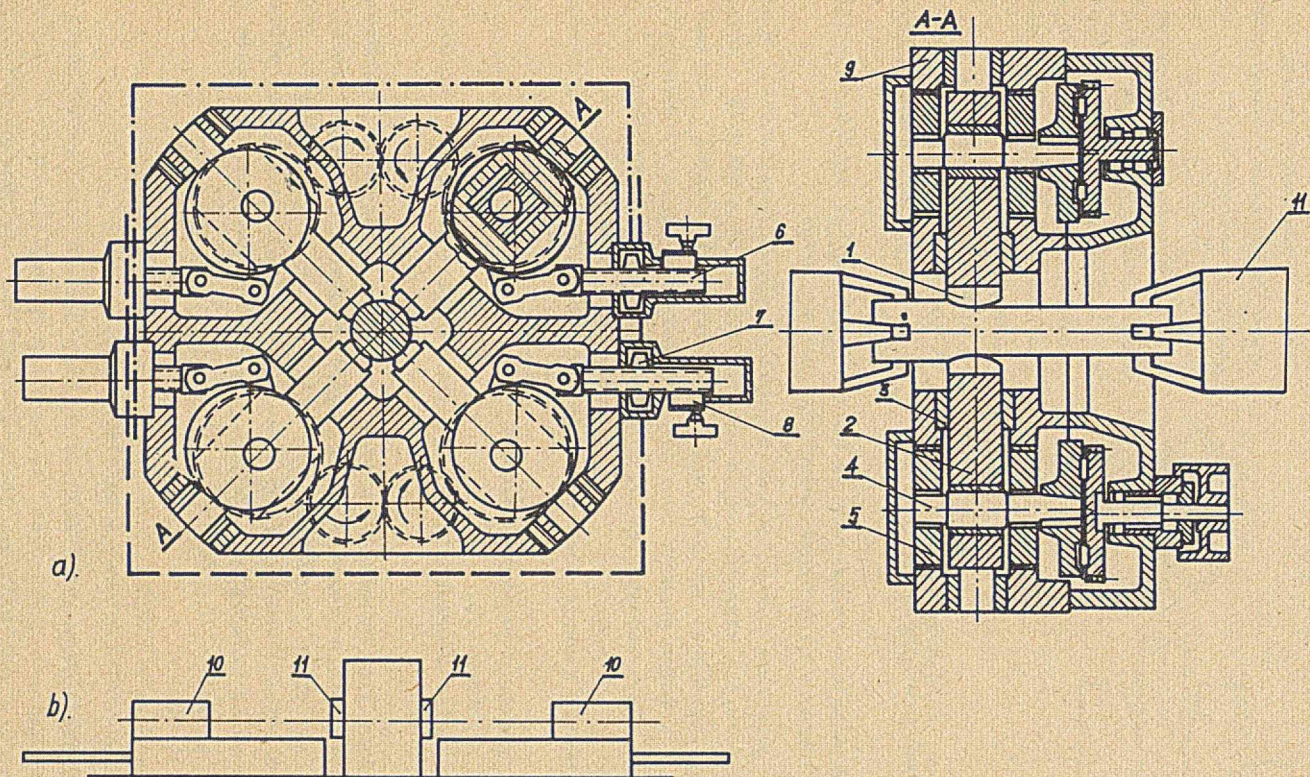
Wśród kowarek do wstępnego przerobu można wyodrębnić kowarki przeznaczone do kucia przelotowego oraz do kucia nawrotnego. Kowarki do kucia przelotowego (rys. 2.1), zwane również krótko kowarkami przelotowymi, charakteryzują się możliwością przemieszczania materiału w trakcie odkształcenia, co zapewnia odpowiedni wahadłowy ruch narzędzi. Jest on uzyskiwany dzięki specjalnemu rozwiązaniu konstrukcyjnemu mechanizmu napędu kowadeł [32-33] (rys. 2.2). Dzięki temu ruchowi można znacznie zwiększyć prędkość wylotową kutego pręta. Wsad do tego typu kowarek pochodzi najczęściej z ciągłego odlewania. W tym przypadku kowarka stanowi wstępny zespół układu, w którym jako pośrednie i wykańczające zespoły stosowane są walcarki w postaci bloków walcowniczych.



Rys. 2.2. Mechanizm napędowy do nadania wahadłowego ruchu podającego kowadła [32]

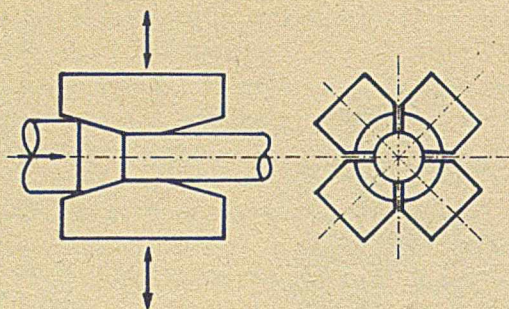
1 - korpus kowarki; 2 - korbwód z występem do nadawania ruchu wahadłowego; 3 - mimośrodowy wał napędzający; 4 - mimośród regulacyjny nastawy kowadełek; 5 - tuleja z rowkiem do nadawania ruchu wahadłowego; 6 - prowadnica korbwodu

Do kucia prętów z wsadów w postaci wlewków stosuje się kowarki (rys. 2.3) wyposażone w manipulatory, w których kowadła (rys. 2.4) wykonują prosty ruch posuwisto-zwrotny. W czasie odkształcenia zahamowany jest więc ruch podający materiału. Zamierzone odkształcenie całkowite jest nadawane przez kilkakrotne nawrotne przejście materiału przez strefę kucia. Aktualny stan rozwoju tych kowarek pozwala na kucie prętów z wsadu o średnicy dochodzącej do 800 mm.



Rys. 2.3. Kowarka nawrotna do kucia ze wsadu w postaci wlewka [1]:

a - kowarka, b - kowarka z manipulatorami; 1 - kowadło, 2 - korbówód; 3 - prowadnica; 4 - mimośrodowy wał napędowy; 5 - mimośród regulacyjny; 6 - śruba nastawy rozwarcia kowadeł, 7 - nakrętka nastawy kowadeł; 8 - bezpiecznik; 9 - korpus; 10 - manipulator; 11 - łąpy wprowadzające



Rys. 2.4. Rozmieszczenie kowadeł w kowarkach nawrotnych [4]

Ponieważ praca niniejsza jest głównie poświęcona procesowi kucia w kowarkach nawrotnych z wsadów w postaci wlewków, szerzej przedstawiony zostanie przebieg tego procesu oraz układ zespołu produkcyjnego, w jakim tego typu kowarka pracuje. W procesie wstępnego przerobu wlewków można wyodrębnić trzy zasadnicze fazy [1]:

- a) skuwanie zbieżności,
- b) kucie zasadnicze dla nadania odpowiedniego stopnia przerobu,

- c) kucie wykańczające polegające na nadaniu powierzchni odpowiedniej gładkości i dokładności wymiarów przekroju poprzecznego.

Skuwanie zbieżności prowadzi się na ogół w trzech przejściach, w których jedno z przejść stanowi nawrót bez odkształcenia z uchwytu jednego manipulatora. Następnie prowadzi się kucie z możliwie dużymi gniotami w przejściach i z dużym posuwem pomiędzy uderzeniami. Kucie wykańczające powinno odbywać się w jednym przejściu z zastosowaniem małego gniotu i posuwu.

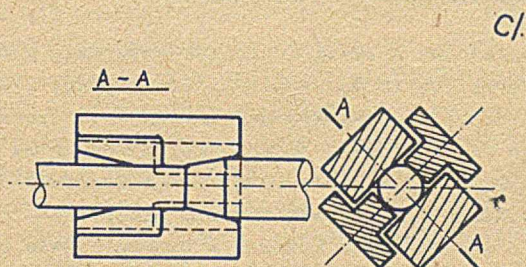
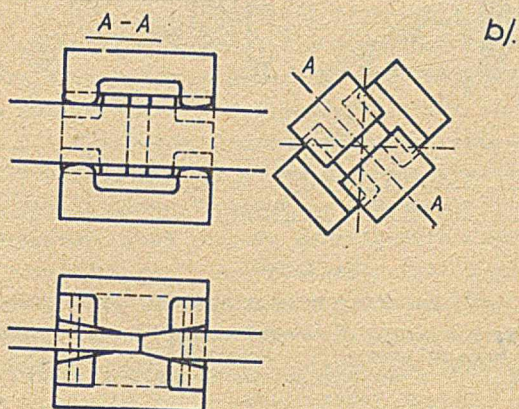
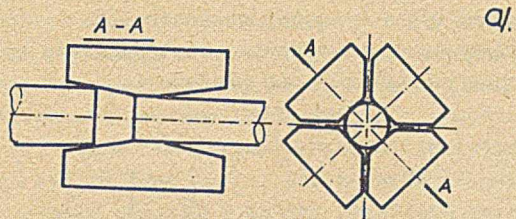
Jako narzędzia stosuje się trzy typy kowadełek (rys. 2.5), a mianowicie:

- a) do kucia prętów o przekroju kołowym,
- b) do kucia płaskowników,
- c) do kucia prętów o przekroju kołowym lub kwadratowym, tzw. "uniwersalne".

Dwa ostatnie typy kowadeł są stosowane wyłącznie do kucia wykańczającego. Jedynie kowadła pierwszego typu umożliwiają nadanie materiałowi odpowiedniego wstępnego przerobu. Narzędzia te dają bowiem możliwość stosowania dużego gniotu. Jednocześnie stwarzają one możliwości, przy odpowiednim doborze ruchu podającego materiał, zastosowania różnych systemów kalibrowania, a w tym:

- "koło - koło",
- "koło - kwadrat - koło",
- "koło - kwadrat - ośmiokąt - koło" i innych.

Dobór odpowiedniego kalibrowania powinien być dokonany ze świadomością związków przyczynowo-skutkowych, co niestety ze względu na brak badań w tym zakresie nie jest możliwe. Dobór ten jest więc dokonywany intuicyjnie w oparciu o ogólne zasady znane z przebadanych procesów konwencjonalnych. Doszukiwanie się w tym przypadku analogii może jednakże, uwzględniając specyficzny przebieg procesu kowarkowego, doprowadzić do dużych błędów.



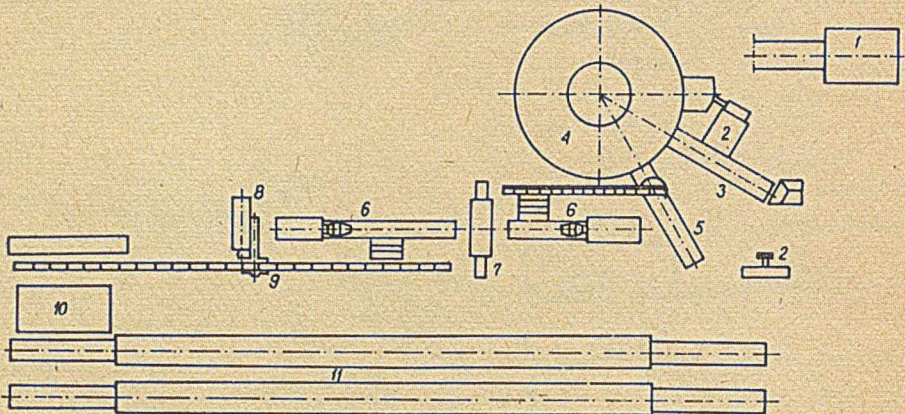
Rys. 2.5. Typy kowadeł

a - do przekrojów kołowych; b - do płaskowników; c - uniwersalne [1]

Kowarki są urządzeniami o dużej wydajności, a sposobem pracy zbliżone są do walcarek nawrotnych. Różnią się natomiast od walcarek zdecydowanie różnorodnością formatów i gatunków materiału wsadowego oraz możliwościami produkcji wyrobów o zróżnicowanych wymiarach w bardzo małych partiach, w

tym nawet pojedynczych sztuk. Narzuca to odpowiednie wymagania co do rozmieszczania oraz doboru typów urządzeń pomocniczych.

Na rysunku 2.6 pokazano schematycznie rozmieszczenie elementów zespołu jednokowarkowego o dużej elastyczności produkcji.



Rys. 2.6. Zespół jednokowarkowy wraz z urządzeniami pomocniczymi [1]:

- 1 - piec podgrzewczy; 2 - waga; 3 - wsadzarka; 4 - piec obrotowy grzewczy;
- 5 - wysadzarka; 6 - manipulatory, 7 - kowarka; 8 - piła; 9 - samotok; 10 - chłodnia; 11 - piec przelotowy do obróbki cieplnej

2.3. Cechy procesu wstępnego przerobu w kowarkach

Zawarte w literaturze dane dotyczące procesu wstępnego kucia w kowarkach ograniczają się praktycznie do omówienia zasad pracy i cech eksploatacyjnych urządzeń oraz opisów skutków objawowych tego procesu. Należy ponadto stwierdzić, że nie wszystkie pozycje można uważać za źródłowe w zakresie wyrażanych opinii odnośnie do zalet i wad kowarek. Często stwierdzenia są jedynie powielane bez sprawdzenia ich słuszności.

Pierwsze wzmianki o zastosowaniu kowarek w przetwórstwie hutniczym znalazły się w literaturze [12] w 1969 roku. O zastosowaniu kowarek redukcyjnych do wstępnego przerobu można znaleźć wiadomości w publikacjach [4-13, 26, 27] z roku 1974. Publikacje te omawiają głównie zasadę działania kowarek, parametry techniczne oraz możliwości zastosowania. Dalsze publikacje poświęcone są omówieniu zalet tych urządzeń na tle możliwości technicznych, organizacyjnych i technologicznych konwencjonalnych procesów przeróbki plastycznej.

Po raz pierwszy obszerniejszego całościowego omówienia kowarek do wstępnego przerobu dokonali Hojas H. i Valencak M. [2]. W pracy poświęconej mo-

dernizacji kuźni jednej z hut austriackich opisali wydział kuźni, w którym zainstalowano kowarkę, jak również przebieg kucia, parametry techniczne i program produkcji kowarki. Odrębny punkt artykułu poświęcono w tej pracy omówieniu zalet procesu kowarkowego na tle tradycyjnych procesów kucia. Podkreślono powtarzalność warunków procesu kucia gwarantujących równomierne, stałe, optymalne własności jakościowe. Duża częstość uderzeń i bardzo krótki czas zetknięcia narzędzi z materiałem dają w efekcie nieznaczne straty ciepła. W każdym przejściu pręta przez kowarkę następuje jej wtórne nagrzewanie związane z ciepłem pracy odkształcenia plastycznego, a więc proporcjonalne do oporu odkształcenia oraz prędkości odkształcenia. Na przykład przy stalach szybko tnących przeciętnie temperatura rośnie o 50°C , a straty ciepłone dają w przybliżeniu ten sam spadek temperatury. Daje to w efekcie możliwość stosowania dużych stopni przekucia (do 10 z jednego nagrzania wsadu) dla stali lub stopów mało plastycznych o wąskim zakresie temperatury przeróbki plastycznej. Podczas gdy przeróbka plastyczna molibdenowych i wolframowych stali szybko tnących w przypadku stosowania młota 2 i 5 Mg i zastosowania stopnia przekucia 8 nie była możliwa poniżej 5-krotnego nagrzewania, zastosowanie kowarki pozwala prowadzić ten proces z jednego nagrzania. Dodatkowym efektem ograniczenia krotności nagrzewania jest znaczne zmniejszenie grubości warstwy odwęglonej, która w przypadku stali narzędziowych zmniejsza się 2-krotnie w stosunku do kutej z wielokrotnego nagrzewania na prasach i młotach. Prędkość odkształcenia uzyskiwana w procesie kucia kowarkowego jest mała i odpowiada osiąganą w prasach hydraulicznych. Jest to niewątpliwie zaletą, szczególnie w przypadku kucia stali wysokostopowych i stopów, w których ze wzrostem prędkości odkształcenia rośnie opór odkształcenia, a zmniejsza się odkształcalność graniczna. Równoczesne odkształcanie przez cztery kowadła pozwala uniknąć zjawiska poszerzenia i towarzyszących mu szkodliwych naprężeń rozciągających - szczególnie na powierzchni odkuwki. Eliminuje się tym samym problem pęknięć powierzchniowych, a więc konieczność kosztownego i czasochłonnego szlifowania powierzchni wsadu. We wlewkach ze stali stopowych tworzy się często gruboziarnista struktura transkryształiczna stanowiąca obszar potencjalnie możliwych pęknięć wewnętrznych. Naprężenia rozciągające, występujące w rdzeniu odkuwek kutej w kowadłach płaskich na młocie lub prasie, powodują często występowanie pęknięć wewnętrznych znanych ogólnie jako wada o nazwie "krzyż kucia". Odpowiednio dobierając plan gniotów, można osiągnąć dobre krzekucie rdzenia odkuwki i zlikwidować ewentualne nieciągłości zalegające w strefie osiowej wlewka. Szczególnie korzystne jest w tym przypadku zastosowanie systemu kalibrowania "koło-kwadrat-koło" (przekrój pomiędzy przejściami jest kolejno kołowy - kwadratowy - kołowy). W pracy [2] sugeruje się, że kucie z zastosowaniem kalibrowania "koło - koło" (przekrój pomiędzy kolejnymi przejściami jest stale kołem) daje przy identycznym stopniu przerobu zbliżony efekt do procesu walcowania. Natomiast kucie z zastosowaniem kalibrowania

"koło - kwadrat - koło", podobnie jak kucie konwencjonalne, pozwala uzyskać efekt przerobu zbliżony do walcowania przy zastosowaniu tylko 70% stopnia przerobu niezbędnego w walcowaniu. W przeciwieństwie do procesów kucia na prasach i młotach (z jednego manipulatora - uwaga własna) w każdym przejściu przez kowarkę pręt przekuty jest na całej długości. W stosunku do prętów kutyh konwencjonalnie struktura pręta jest więc znacznie bardziej jednorodna przez eliminację strefy gruboziarnistości występującej w pręcie odkutym zwykłym sposobem, a spowodowanej koniecznością dogrzewania pręta przed kuciem na gotowo drugiego końca pręta. W pracy [2] autorzy zwracają również uwagę na zalety ekonomiczno-organizacyjne. Wydajność uzyskiwania dawniej w nowych warunkach produkcji wymaga zatrudnienia jedynie 15% poprzedniego stanu załogi i to pracowników o znacznie niższych kwalifikacjach. Istotną korzyścią jest wzrost uzysku, który w zależności od stali lub stopu wyniósł 5 do 20%. Duża poprawa uzysku została osiągnięta przy stalach wysokostopowych, z których pręty w czasie kucia pod młotem często pękały (pęknięcia wewnętrzne lub rozwarstwianie końców). Duża dokładność kucia, możliwa do osiągnięcia w kowarkach, pozwala znacznie zmniejszyć tolerancje wykonania oraz nadatki na obróbkę skrawaniem.

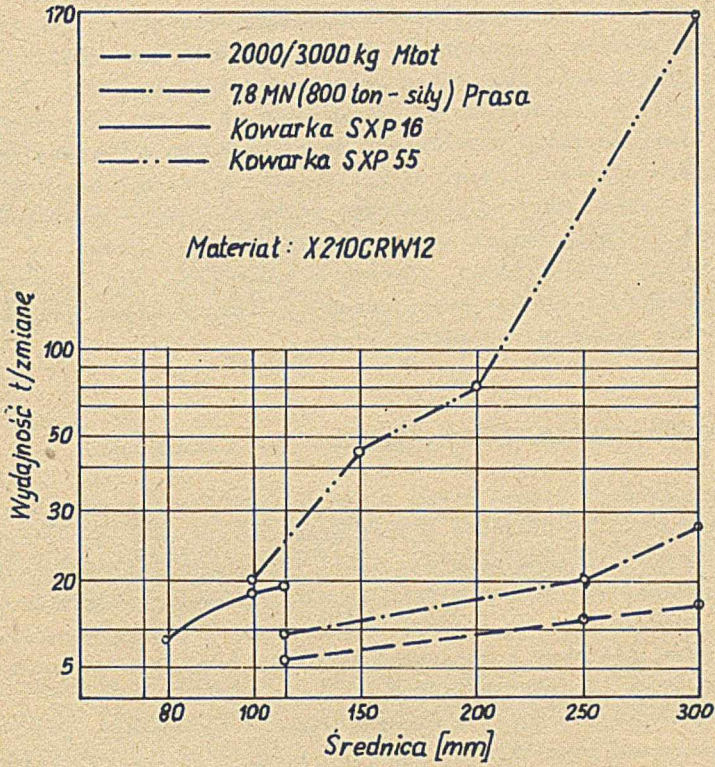
Wyszczególnione wyżej cechy procesu kucia w kowarkach znajdują w pełni potwierdzenie w pracach [4, 5, 6, 13] oraz częściowo w pracach [3, 7, 8, 9, 10, 11, 12 i 15].

Autorzy pracy [6] mają odmienne zadanie co do prędkości odkształcenia, stwierdzając, że "w przypadku kucia na kowarce szybkości odkształceń są bardzo duże". W pracy [4] autor uściśla wiele wyszczególnionych cech kowarek, podając konkretne ilościowe wskaźniki. I tak, podając dane odnośnie do wydajności kowarek w stosunku do pras lub młotów stwierdza, że "w przypadku stali konstrukcyjnych jest ono 4-krotnie a przy stalach wysokostopowych 6-krotnie większa".

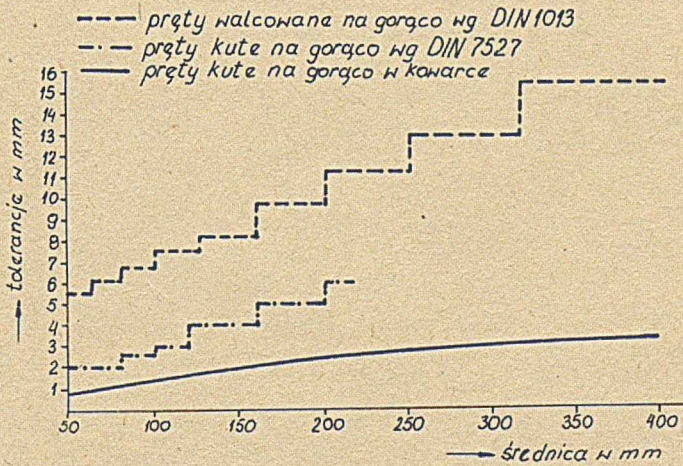
Dla porównania wydajności osiaganych w młotach, prasach i w kowarce przytoczono wykresy (rys. 2.7). W zakresie dokładności tolerancje odkuwek kutyh w kowarkach mieszczą się w granicach 1/2 tolerancji walcowania i 1/6 tolerancji kucia (rys. 2.8).

Prace [10, 11 i 15] są poświęcone omówieniu zespołu kuźniczo-walcowniczych z zastosowaniem kowarek przelotowych. Dla tych układów w pracach [10 i 11] podkreślono szczególnie wysokie wartości wskaźników odkształceń uzyskiwanych w jednym przepuszczeniu, dużą wydajność, dokładność (osiagane tolerancje mogą stanowić 1/4 lub 1/5 tolerancji walcowania) i wysoką jakość powierzchni. Stwierdza się między innymi, że pręty wyprodukowane na tych urządzeniach mogą być stosowane zamiast ciągnionych lub szlifowanych.

W pracy [15], stanowiącej najbardziej obszerne opracowanie z zakresu analizy procesu kucia w kowarkach do wstępnego przerobu, zawarte są materiały dotyczące zarówno walorów techniczno-ekonomicznych i technologicznych układu kuźniczo-walcowniczego, jak i wyniki badań odkształceń i sta-



Rys. 2.7. Porównanie wydajności kowarek, młotów i pras [1]



Rys. 2.8. Porównanie osiągniętych tolerancji [4]

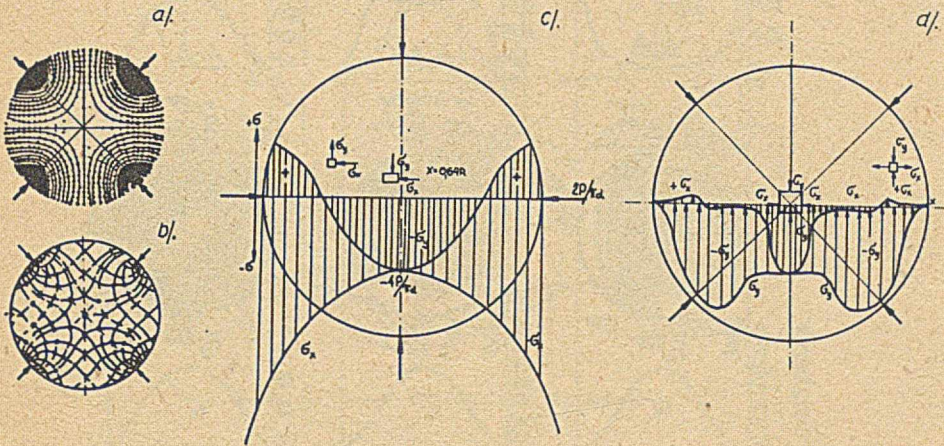
nów naprężeń w kotlinie odkształcenia. W zakresie oceny walorów techniczno-ekonomicznych i technologiczno-eksploatacyjnych występuje pełna zgodność z oceną zawartą w pracach [10 i 11]. Nowością jest podkreślenie wagi znajomości rozkładu lokalnych naprężeń i odkształceń, które decydują o szeroko pojętej strukturze materiału wyrobów. W pracy zwrócono uwagę na korzystne stany naprężeń pozwalające na zlikwidowanie typowej wady wlewków z ciągłego odlewania, tzn. zlokalizowanej w osi nieciągłości materiałowej. Wyznaczając rozkłady lokalnego odkształcenia, stwierdzono również, że najniższą wartość osiąga ono w osi materiału i narasta w kierunku warstw brzegowych. Wyniki badań, zawarte w pracy [15], nie mogą być niestety transponowane do kowarek pracujących nawrotnie, ze względu na odmienny ruch kowadełek wywołujących odkształcenie.

2.4. Charakterystyka procesu kształtowania w kowarkach

Przytaczając dane literaturowe z zakresu analizy procesu kucia w kowarkach, postanowiono wyłączyć z niej prace własne oraz te, których autor niniejszej pracy był współautorem. Uwaga ta dotyczy szczególnie zagadnienia geometrycznej kotliny odkształcenia oraz przebiegu kształtowania i odkształceń. Podejmując taką decyzję, kierowano się chęcią podania w zwartej formie kompleksowego opracowania tych zagadnień z włączeniem wyników pracy do tej pory nie publikowanych.

W badaniach procesu kucia w kowarce szczególnie ważnym problemem jest ustalenie rozkładu odkształceń, naprężeń i zależności między naprężeniami i odkształceniami oraz wyznaczenie sił i energii kucia.

Problemem szczególnie interesującym w analizie procesu kucia w kowarkach jest stan naprężeń w poddanym przeróbce plastycznej materiale. Znajomość rozkładu naprężeń pozwala bowiem na ustalenie obszarów największych odkształceń plastycznych i miejsc przypuszczalnych pęknięć materiału oraz odpowiadających im dopuszczalnych odkształceń granicznych. Zagadnienia rozkładu naprężeń w procesie kucia były przedmiotem badań E.P. Unksowa [34], W. Lohmana [35] i W.G. Osipowa [36]. Badania te przeprowadzono przy zastosowaniu metod elastooptyki, a tym samym uzyskane wyniki rozkładu trajektorii naprężeń składowych odpowiadają płaskiemu stanowi odkształcenia i to w zakresie sprężystym (na pograniczu stanu sprężysto-plastycznego). Przebadano trzy sposoby obciążenia - dwoma [34], trzema [35] i czterema kowadełkami [36]. Z przebiegu trajektorii naprężeń oraz rozkładu naprężeń normalnych (rys. 2.9) wynika, że w rdzeniu pręta nie występują naprężenia styczne, a tym samym strefa ta nie jest odkształcona plastycznie. Podobnie przedstawia się zagadnienie w przypadku obciążenia trzema kowadełkami. Jedynie obciążenia dwoma kowadełkami wskazują na efekt odkształceń plastycznych w strefie rdzenia. Takie rozumowanie jest oczywiście nie do przyjęcia. Uwzględniając bowiem warunek spójności materiału,



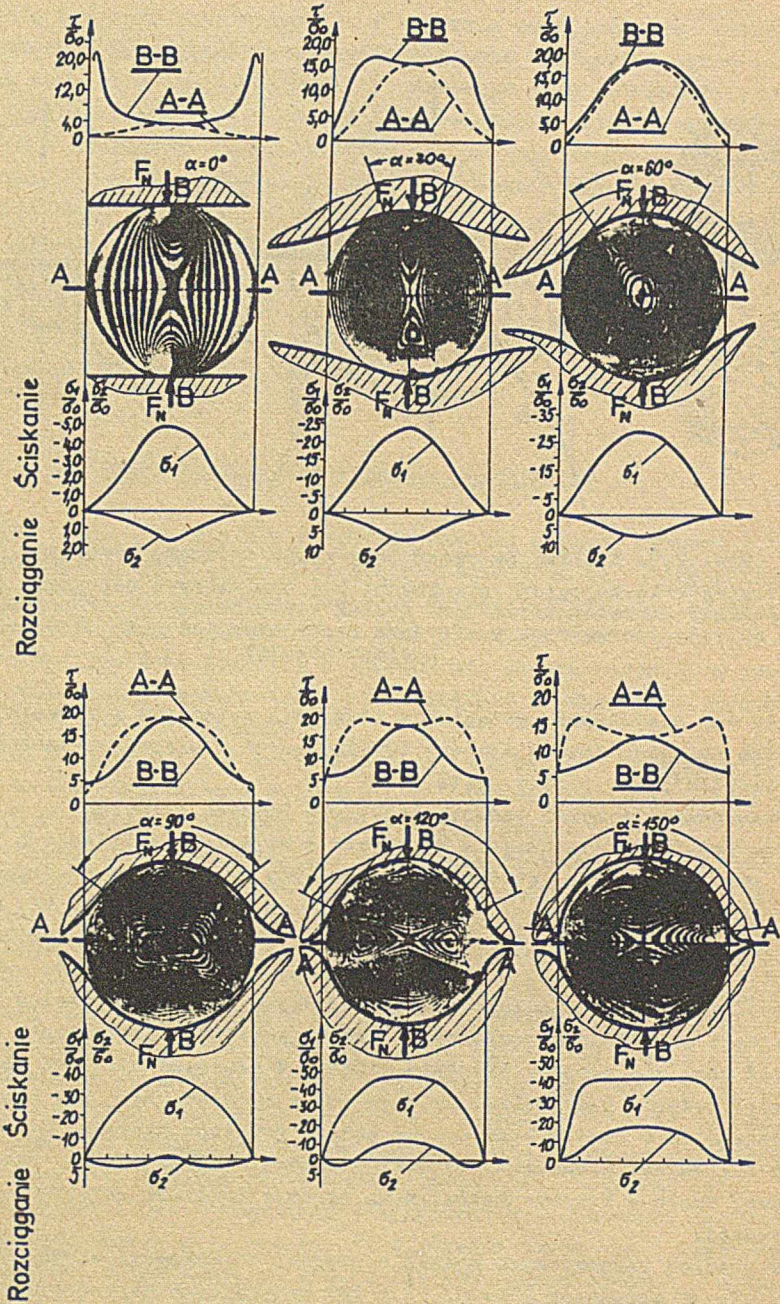
Rys. 2.9. Rozkład naprężeń przy kuciu czterema kowadłami [36]:

a - trajektorie naprężeń normalnych; b - trajektorie naprężeń stycznych; c - rozkład naprężeń normalnych wzdłuż kierunku nacisku kowadeł; d - rozkład naprężeń normalnych w kierunku nachylonym pod kątem 45° do kierunku nacisku kowadeł

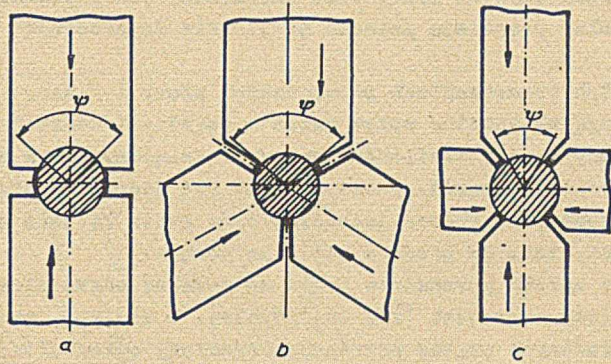
należy się spodziewać wystąpienia płynięcia materiału w rdzeniu pręta pod wpływem naprężeń dopełniających (wynikających z niejednorodności odkształceń współosiowych warstw pręta).

Przedstawione wyżej badania dotyczyły kowadeł płaskich, a ściślej warunków punktowego zetknięcia narzędzia z materiałem. Badania E.P. Unksowa [34] wykazały bardzo istotny wpływ kształtu narzędzi na rozkład naprężeń w przekroju pręta (rys. 2.10). Należy w tym miejscu dodać, że niewątpliwie problem jeszcze bardziej się skomplikuje, jeżeli chciałoby się uwzględnić wielkość wciśnięcia kowadeł w materiał i związane z nim: szerokość i długość powierzchni nacisku kowadła. Podkreślić należy również to, że w kolejnych przekrojach rozłożonych wzdłuż kotliny odkształcenia stany naprężeń mogą się również istotnie różnić. W konsekwencji tych rozważań można więc jedynie podkreślić, że uzyskane w pracach [34 - 36] wyniki należy traktować jako bardzo uproszczone modele rozkładu naprężeń w prętach kutyh w kowarce. Rozwiązanie modeli bardziej zbliżonych do rzeczywistego procesu kucia w kowarce natrafia na ogromne trudności natury matematyczno-fizycznej.

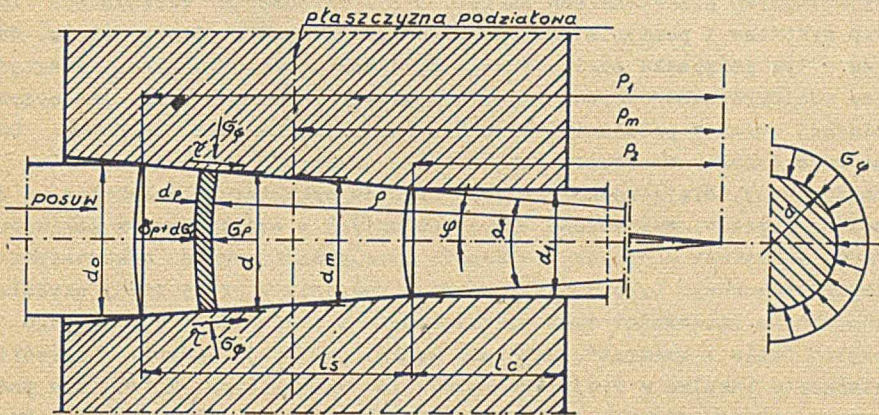
W pracach poświęconych analizie procesu kowarkowego szczególnie bogaty jest udział opracowań [16-20, 22 i 24] dotyczących obliczania sił nacisku kowadeł oraz pracy i mocy kształtowania. Wśród tych prac większość zawiera analizę procesu kucia na zimno w kowarkach rotacyjnych. Zakres zastosowania wyprowadzonych wzorów jest ponadto ograniczony ze względu na przyjęty model zakładający kucie dwoma kowadłami, w których kąt rozłożenia na-



Rys. 2.10. Rozkład naprężeń normalnych i stycznych w zależności od kąta chwytu narzędzi [34]



Rys. 2.11. Siły nacisku kowadeł



Rys. 2.12. Schemat procesu kucia wg Zwierajewa [24]

cisków $\psi = 150^\circ$ (rys. 2.11). W procesach wstępnego kucia w kowarkach kąt ψ jest zawsze mniejszy od 90° . Biorąc powyższe pod uwagę, do obliczania nacisków w procesie kucia na gorąco w kowarkach czterokowadłowych można zalecać wzór opracowany przez Zwierajewa [24], który założył model obciążeń przedstawiony schematycznie na rys. 2.12. Uwzględnił on w swoich rozważaniach wpływ sił tarcia przy kuciu z dużymi częstościami uderzeń oraz naprężenia występujące w części kalibrującej.

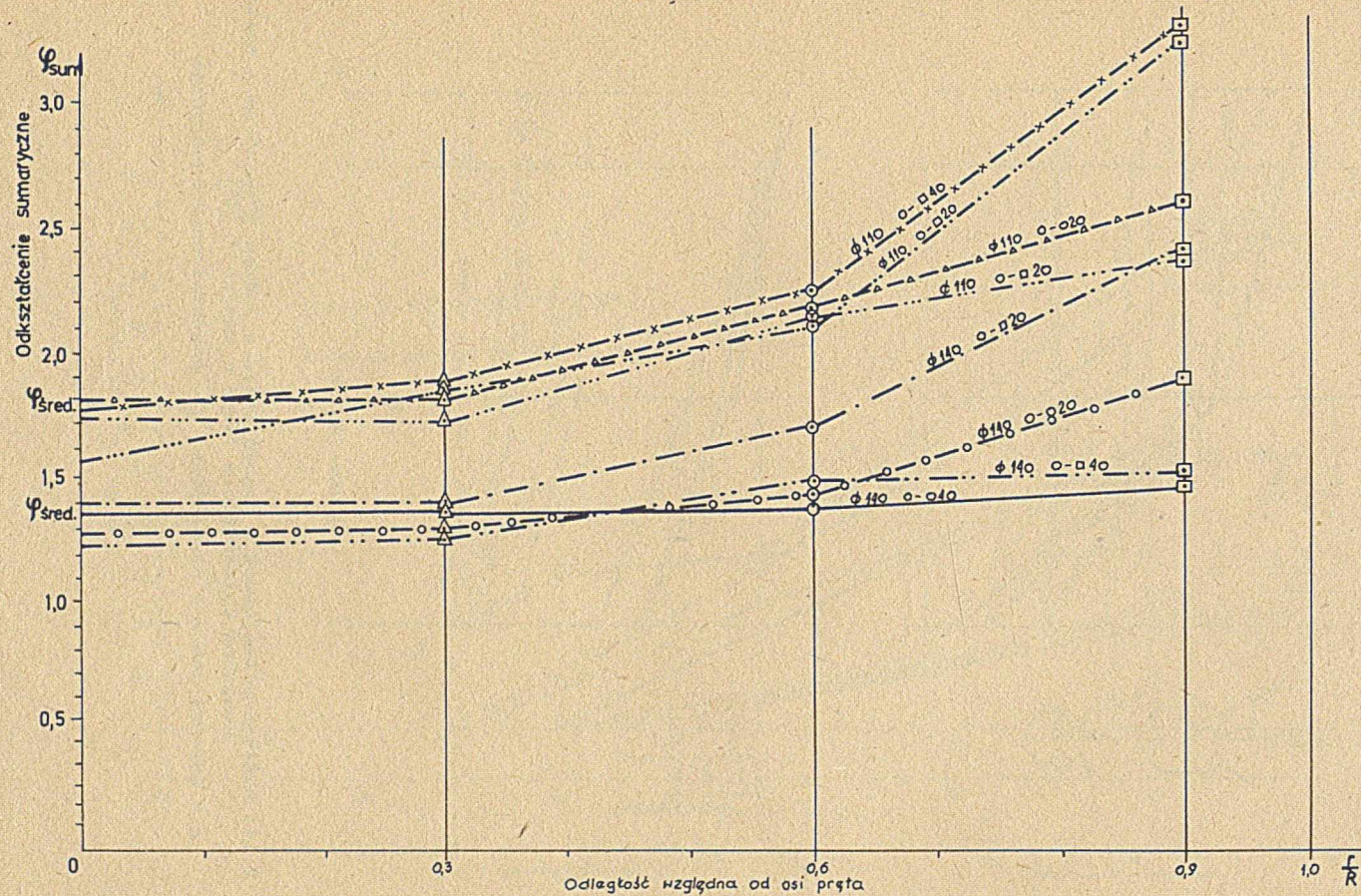
Generalnej krytyce poddał w swoich pracach A. Uhlig [19, 20 i 21] wszystkie teoretyczne modele procesu kucia w kowarkach. Uważa on m.in., że błędem jest nieuwzględnienie w obliczeniach sił wzdłużnych działających od manipulatorów i założenie rozkładu nacisków kowadeł na całym obwodzie. Przeprowadzone przez tego autora własne badania potwierdziły słuszność wysuwanych zarzutów. Wyprowadził on własny wzór na obliczanie

sił kucia, jednak zarówno poczynione założenia, jak i dokonana weryfikacja doświadczalna pozwalają zalecać go jedynie do procesów kucia na zimno.

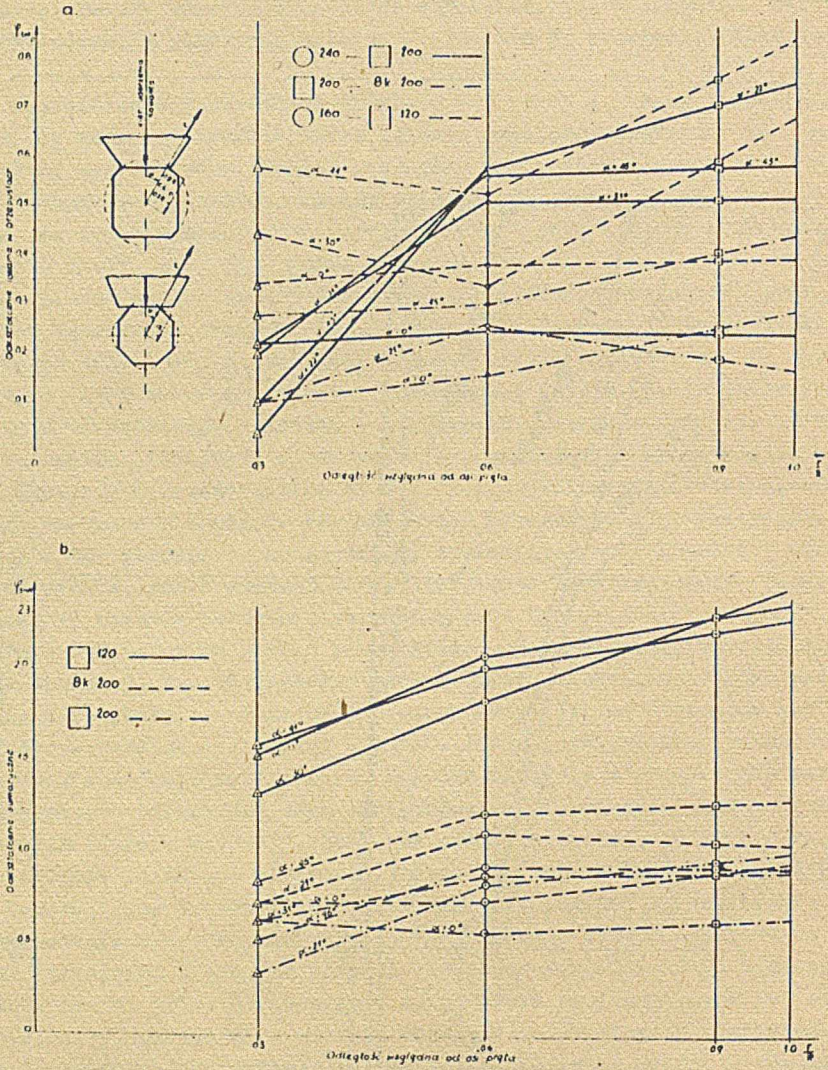
We wszystkich opracowaniach poświęconych pracy i mocy odkształcenia zwraca się uwagę na istotny wpływ wzrostu częstości uderzeń na wzrost niezbędnej pracy i mocy zasilania kowarek i związany z tym spadek sprawności energetycznej procesu. Uwaga ta może być jednak niesłuszna, jeżeli będzie się rozpatrywać proces technologiczny kucia łącznie z procesami nagrzewania wsadu, tzn. do procesu kucia na gorąco.

Zagadnienie wpływu parametrów kucia na rozkład odkształceń jest przyczynowo omówiony w pracach [28, 29, 30, 35]. W wyniku przeprowadzonych prób kucia składanych prętów wyznaczono rozkłady odkształceń w prętach poddanych kuciu ze zróżnicowanymi parametrami gniotu, prędkości podawania, przekroju poprzecznego, systemu kalibrowania. Uzyskane rozkłady odkształceń dla prętów przekutych w warunkach odpowiadających kuciu prętów ze stali szybko tnących przedstawiono na rys. 2.13. Obliczenia odkształceń lokalnych wykonano z pomiarów sworzni przed przepustem i po przepuście. Można mieć w tym przypadku zastrzeżenia, że odkształcenie lokalne, uwzględniające wielokrotność uderzeń odkształcających materiał, przy jednoczesnej ciągłej zmianie położenia sworzni, może być znacznie większe. Odkształcenie lokalne ma bowiem niewątpliwie charakter nieproporcjonalny i niemonotoniczny. Niejednoznaczne jest również odkształcenie lokalne, co zaznaczono w pracy, wyznaczone w prętach kutych z zastosowaniem kalibrowania "koło - kwadrat - ośmiokąt - koło". Duże zróżnicowanie odkształcenia w kierunku obwodowym było zresztą powodem podjęcia w pracy próby określenia charakteru zmienności tego odkształcenia w przekroju pręta kutego z przejściem "koło - kwadrat". Uzyskane wyniki pozwalają jedynie określić odkształcenie lokalne w miejscach założenia sworzni (rys. 2.14). Nie podjęto bowiem próby opisanie funkcją rozkładu w postaci $\varphi_1 = f(r, \theta)$. Bardzo ważne było stwierdzenie w pracy [28] znikomo małych odkształceń wywołanych skręcaniem pręta pod wpływem mimośrodowego obciążenia siłą uderzeń kowadeł. Wyniki próby kucia prętów ze wstępnie nawierconymi w osi otworami (rys. 2.15) wskazują na znaczny udział w odkształceniu strefy rdzeniowej promieniowych i obwodowych naprężeń ściskających. Jedynie udział takich naprężeń tłumaczy tak intensywne "zamykanie się" nieciągłości. Autorzy pracy [28] stwierdzają w tym przypadku szczególnie korzystne oddziaływanie kucia "przez kwadrat" i stosowania dużych gniotów i prędkości podawania w przepuście.

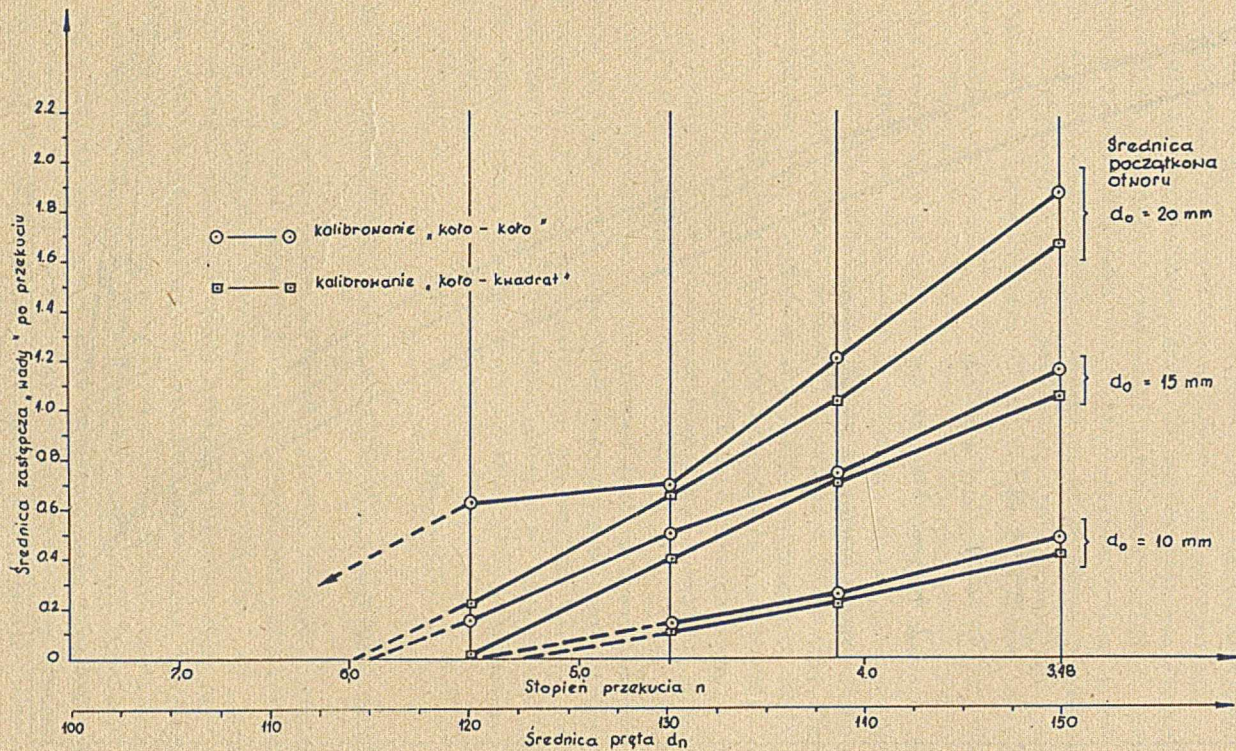
W pracach [23 i 28] omówiono wpływ cech geometrycznych narzędzi i parametrów kucia na cechy geometryczne wyrobu. A. Uhlig [23] prowadził badania nad procesem kucia na zimno. Praca ta zasługuje jednakże na uwagę ze względu na zastosowaną metodykę pomiaru błędów kształtu (profilograf bieżunowy) i ogólne podobieństwo geometryczne do będącego przedmiotem niniejszej pracy procesu kucia w kowarkach. Przeanalizowano w niej wpływ takich



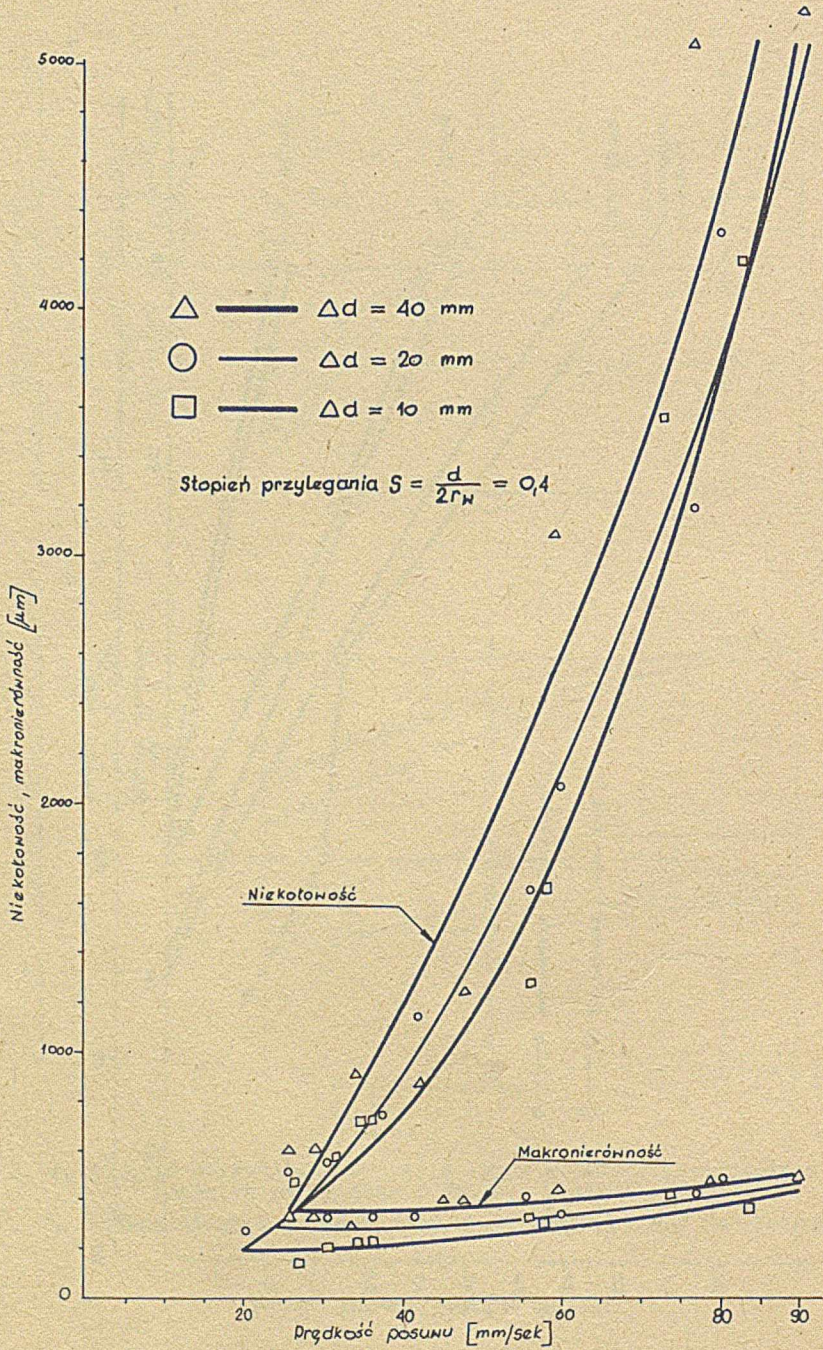
Rys. 2.13. Rozkład odkształceń w przekroju prętów kątów w kowarce [28]



Rys. 2.14. Rozkład odkształceń w pręcie kuty w jednym przepuszczeniu z zastosowaniem kalibrowania "koło - kwadrat" [28]
 a - odkształcenie w przepuszczeniu, b - odkształcenie sumaryczne



Rys. 2.15. Wpływ stopnia przekucia na zmniejszenie wielkości wady zlokalizowanej w osi wsadu [28]



Rys. 2.16. Wpływ parametrów kucia w kowalce na niezkołowość i makronierówność prętów ze stali szybko tnącej [28]

parametrów, jak: sztywność układu, kształt narzędzi (wyrażony stopniem przylegania) i parametry kucia (wyrażone kątem obrotu między uderzenia α_u oraz przemieszczaniem wzdłużnym między śladami uderzeń kolejnych kowadeł). Badania eksperymentalne prowadzono na kowarce 4-kowadełkowej.

We wnioskach końcowych stwierdzono, że należy stosować stopień przylegania około 0,95 oraz unikać stosowania kątów obrotu między uderzeniami α_u , których wielokrotność jest równa kątowi pełnemu. Badania prowadzone w pracy [28] dotyczą bezpośredniego wpływu warunków kucia kalibrującego na kowarkach do wstępnego przerobu. Autorzy wyróżniają dwie zasadnicze charakterystyczne cechy geometryczne prętów kutych w kowarce, a mianowicie: makronierówność i niekołowość. Niekołowość jest określona jako "efekt 4 symetrycznie biegnących po linii śrubowej występów, powstałych w miejscach zetknięcia śladów od uderzeń kolejnych (różnych) kowadeł. Makronierówność jest natomiast następstwem nierówności między śladami od uderzeń tego samego kowadła". Podjęto również próbę matematycznego ujęcia zależności tych cech od prędkości podawania i gniotu w przepuście. Uzyskane wyniki badań aproksymowano wielomianem drugiego stopnia (rys. 2.16).

Badania są jednak jedynie przyczynkowe, gdyż dotyczą prętów o jednym wymiarze. Brak jest prób dokonania uogólnienia zaobserwowanych zjawisk. Pominięto zupełnie problem procesu zużywania się kowadeł i jego wpływu na efekty kucia kalibrującego.

W pracach poświęconych analizie procesu kucia w kowarkach bardzo skąpo potraktowane są zagadnienia poświęcone geometrycznej kotlinie odkształcenia oraz przebiegu procesu odkształcenia. Szczególnie uderza brak danych do obliczeń takich wielkości, jak odkształcenie w pojedynczym uderzeniu i prędkość odkształcenia oraz wartości liczbowych cech geometrycznych kotliny odkształcenia.

2.5. Wpływ przeróbki plastycznej na strukturę i własności materiału

Struktura i własności materiału są sumarycznym efektem oddziaływania kolejnych etapów procesu technologicznego. Możliwości oddziaływania w procesie przeróbki plastycznej są w sposób istotny zależne od poprawności prowadzenia zabiegów oraz uzyskanych efektów wcześniejszych faz procesu wytwarzania. Ogólnie biorąc, proces przeróbki plastycznej powinien zapewnić istotną poprawę struktury oraz uzyskanie wymaganych kształtów, tolerancji wymiarowych i jakości powierzchni bez naruszenia spójności materiału. Przyjmuje się, że zasadniczy wpływ na efektywność przeróbki plastycznej mają struktura i cechy geometryczne wlewka, parametry procesu nagrzewania, temperatura początku i końca przeróbki plastycznej, odkształcenie cząstkowe (w przepuście) i całkowite (stopień przekucia), schemat przebiegu procesu odkształcenia oraz stan naprężeń w procesie przeróbki plastycznej. Dobór wlewka zależy w istotny sposób od gatunku materiału i wielko-

ci przekroju pręta, na który ma być przerobiony. Konieczność starannego doboru parametrów wlewka wynika z potrzeby uzyskania korzystnej struktury pierwotnej, decydującej o odkształcalności materiału o strukturze pierwotnej oraz o niezbędnym dla zapewnienia wymaganej struktury stopniu odkształcenia. Zakres temperatur przeróbki plastycznej na gorąco powinien zapewnić dużą odkształcalność, mały opór odkształcenia i największą efektywność oddziaływania tego procesu na strukturę i własności. Wpływ temperatury na wyżej wymienione cechy omawiają liczne prace [38-44]. Warto zaznaczyć, że przyjmowane często w praktyce za warunkujące dobór temperatury przeróbki plastycznej: temperatura największej odkształcalności i temperatura najmniejszego oporu odkształcenia (średniego nacisku jednostkowego) nie zawsze odpowiadają temperaturze zapewniającej najkorzystniejszą strukturę.

W procesach kształtowania - szczególnie małych plastycznych stali - o jakości "wewnętrznej" (struktura) i "zewnętrznej" (cechy geometryczne) wyrobu, a niejednokrotnie o możliwości przeróbki plastycznej w ogóle, decyduje stan naprężeń. Odkształcalność materiału zależy głównie od wartości średniego naprężenia (σ_m)

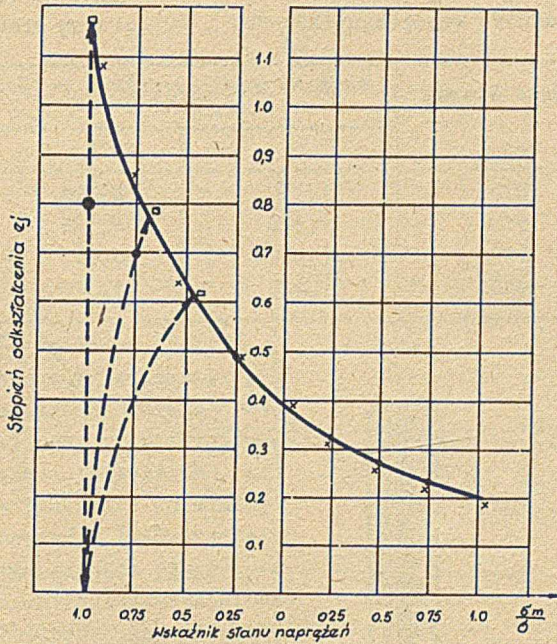
$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.1)$$

gdzie:

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - składowe naprężenia główne.

Ze wzrostem średniego naprężenia σ_m maleje podatność do odkształceń (rys. 2.17). Stan naprężeń zależy od sposobu przyłożenia sił odkształcających, kształtu i wymiarów powierzchni roboczych narzędzi, kształtu i wymiarów kutego materiału i wielkości gniotu [45-47]. W procesach kucia stan naprężeń można poprawić stosując kształtowe kowadła [56-59], zaś w procesie walcowania przez zastosowanie odpowiednich wykrojów.

W pracach dotyczących wpływu przeróbki plastycznej na strukturę i własności materiałów podkreśla się szczególne znaczenie odkształcenia. Wskaźnikiem przyjmowanym powszechnie do oceny efektywności wpływu odkształcenia na strukturę i własności materiału jest stopień przerobu. Jeżeli odkształcenie jest następstwem procesu kucia, to wskaźnik ten nosi nazwę stopnia przekucia. Szczególnie wiele prac poświęcono wpływowi stopnia odkształcenia na strukturę i własności stali szybkołączących [49-55]. Autorzy tych prac wyrażają bardzo odmienne opinie co do niezbędnego stopnia przekucia gwarantującego prawidłowe własności wyrobom. Dla stali szybkołączących wartość ta waha się w granicach od 4 wg [9] do 30 i więcej wg [55]. Nawet dla tych samych gatunków stali podawane wartości wahają się od 7 wg [52] do 20 wg [53]. Wśród wymienionych prac na uwagę zasługuje praca Doromina i Winogradowa [54], którzy podali funkcyjną zależność stopnia segregacji od stopnia przerobu (n):



Rys. 2.17. Wykres odkształcalności granicznej dla stali szybko tnącej R18 (SW18) [63]

$$\lg(NW) = b - K \cdot \ln n \quad (2.2)$$

gdzie:

- NW - stopień segregacji węglików wg GOST 5952-63,
- b - stała charakteryzująca skłonność stali do tworzenia segregacji węglików zależna od masy wlewka (patrz tabl. 2.1),
- K - współczynnik charakteryzujący odporność siatki eutektycznej przeciw rozbiciu jej w procesie przeróbki plastycznej (patrz tabl.2.1),
- n - stopień przerobu.

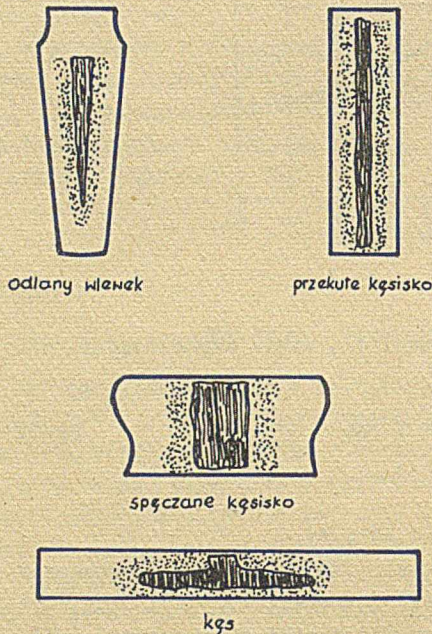
Odmienność opinii co do wymaganego stopnia przerobu jest niewątpliwie spowodowana zróżnicowaną jakością wlewków stanowiących wsad, niejednoznacznością opisu odkształcenia przez stopień przerobu, jak również zróżnicowaniem warunków przeróbki plastycznej. Badania wpływu charakteru przyłożenia siły [39] wykazały większą skuteczność kucia na młocie od kucia na prasie. Możliwości korzystnego oddziaływania upatruje się również w odpowiednim ukształtowaniu powierzchni kowadeł [45, 56-59]. W pracy [58] stwierdzono korzystny wpływ kucia kowadłami z naciętym na powierzchni reliefem, a w pracach [59 i 45] kucie kowadłami rombowymi o kącie rozwarcia odpowiednio 155° i 135° (uwaga wł. - odpowiada kątowi wewnętrznemu ośmiokąta foremnego).

Tablica 2.1
Zależność współczynników "b" i "k" od masy wlewka

Masa wlewka kg	Wartość współczynników we wzorze (3.11)	
	b	K
270	1,150	0,328
500	1,175	0,325
750	1,200	0,323
1000	1,225	0,320

W wielu pracach [39, 60] uważa się za korzystne stosowanie dla wyrobów o dużych przekrojach kucia z wielokrotnym spęczaniem i wydłużaniem. Możliwości korzystnego oddziaływania na strukturę stali w procesie przeróbki plastycznej przez zastosowanie różnych schematów odkształcenia na konwencjonalnych urządzeniach zostały potwierdzone w pracach [61, 62]. Rondak i jego współpracownicy [61] przeprowadzili badania procesu przeróbki plastycznej, w którym zasadniczym elementem odróżniającym go od klasycznych sposobów kucia była zmiana orientacji osi wlewka względem osi kutek prętów (rys. 2.18). Podobny proces, który nazwano Cross Roll, opracowano w Stanach Zjednoczonych [62].

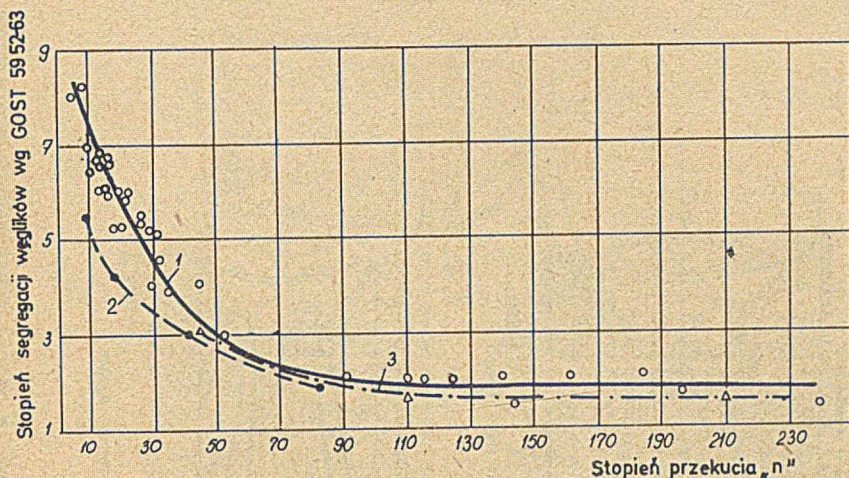
Wpływ różnych procesów technologicznych na strukturę jest przedstawiony na rys. 2.19. Przykładowo, w procesie wyciskania zachodzi intensywne turbulentyne płynięcie sprzyjające, przy tym samym stopniu przekucia,



Rys. 2.18. Załeganie strefy makrosegregacji w wyniku zróżnicowanej orientacji kierunku kształtowania [61]

lepsze rozbić siatki węglików i zmniejszenie segregacji węglików. Metoda ta stwarza duże możliwości na przyszłość, jednakże z uwagi na trudność uzyskania narzędzi do wyciskania o odpowiedniej trwałości nie jest do tej pory szerzej stosowana.

Podobnie nowe możliwości stwarza zastosowanie procesu kucia w kowarkach. Dane literaturowe [1-27, 13, 14, 28-31, 64] dotyczące zalet tego procesu w zakresie oddziaływania na strukturę są ogólnikowe. Ograniczają się do stwierdzenia [2], że kucie przy zastosowaniu w przejściach kalibrowania "koło - koło" daje efekt zbliżony do walcowania, a zastosowanie

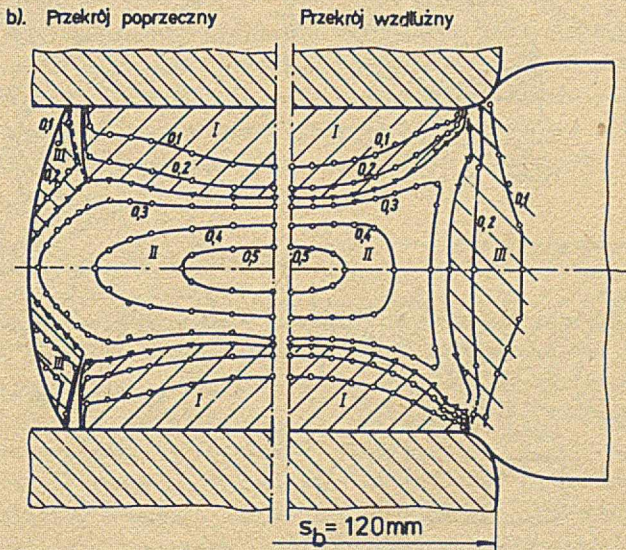
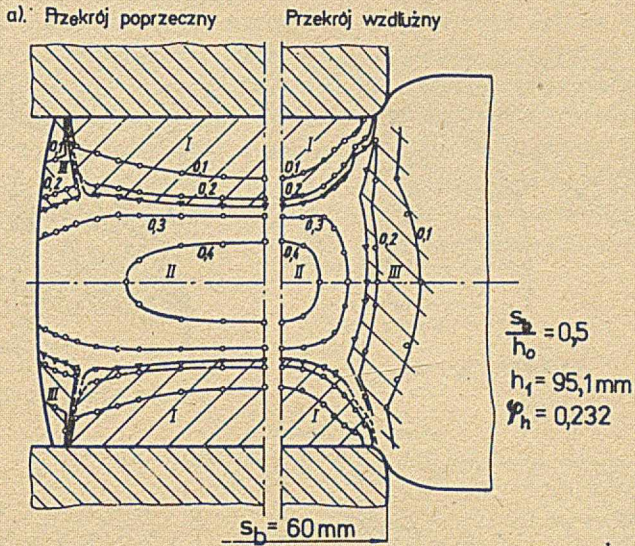


Rys. 2.19. Wpływ sposobu przeróbki plastycznej i stopnia przerobu na segregację węglików [39]:

1 - konwencjonalne kucie; 2, 3 - wyciskanie wstępnie kutych wsadów ze stopniem przekucia odpowiednio ok. 4 i ok. 11

kalibrowania "koło-kwadrat-koło" pozwala uzyskać ten sam efekt przy zastosowaniu 70% tego stopnia przerobu. Bardziej szczegółowe dane z tego zakresu są zawarte w pracach [28-31] oraz [64]. Autorzy pracy [28] zwracają uwagę na własności finalne wyrobu. Oceny wpływu parametrów kucia dokonano, stosując do określenia struktury metody metalografii ilościowej oraz testy statystyczne do wykazania istotności wpływu parametrów kucia na strukturę. Badania te wykazały istotnie korzystny wpływ kucia dużymi gniotami oraz zastosowania kalibrowania "koło-kwadrat" w ostatnich przepustach.

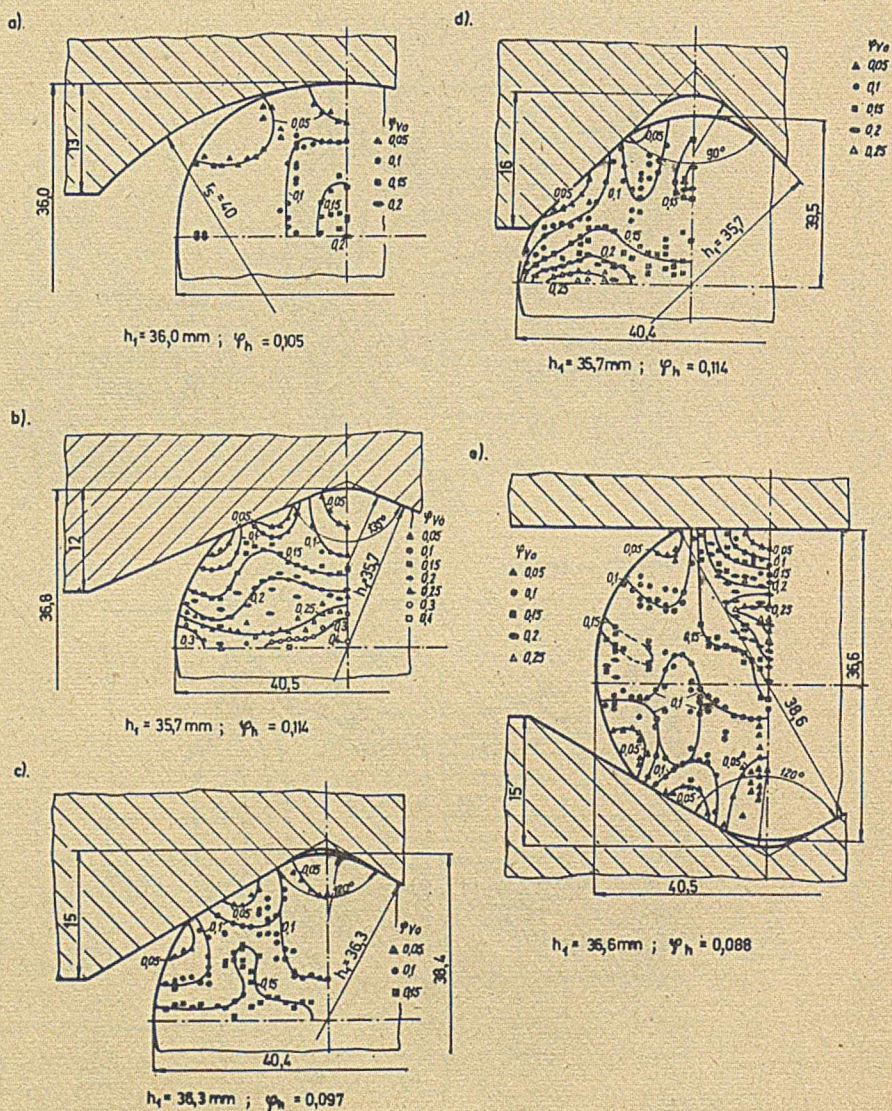
Pomijając prace [28-31], ocena wpływu odkształcenia na strukturę zależy od wielkości stopnia przekucia. Istotnym brakiem tego sposobu oceny jest nieuwzględnianie odkształcenia lokalnego. Ponieważ w procesach przeróbki plastycznej odkształcenie jest niejednorodne, stopień odkształcenia może co najwyżej wyrażać bliżej nieokreślone średnie odkształcenie w objętości przerabianego materiału. Bardzo szczegółowo przebadane są rozkłady odkształceń w prętach kutych konwencjonalnie [45, 46, 56, 57]. Heil [57], stosując do badań modelowe próbki składane, przeprowadził szczegółową analizę wpływu kształtu narzędzi, wielkości gniotu i podania na rozkład odkształceń lokalnych w przekroju poprzecznym oraz wzdłużnym pręta (rys. 2.20-2.22). Zróznicowanie odkształceń w odkuwce i wpływ sposobu prowadzenia procesu (gnioty pojedyncze) na rozkład tych odkształceń każą wątpić w możliwość porównania wyników poszczególnych prac. Dużą trudnością przedstawia uzyskanie powtarzalnych warunków w procesie kucia na młotach.



$$\frac{S_b}{h_0} = 1,0 ; h_1 = 92,9 \text{ mm} ; \varphi_h = 0,256$$

Rys. 2.21. Rozkład lokalnych odkształceń (składowa w kierunku wysokości) w przecie prostokątnym wydłużonym kowadłami płaskimi o różnej szerokości na prasie hydraulicznej przy zastosowaniu stałego gniotu ($\varphi_h = \text{const}$) [57].

Materiał St37 (wg DIN), $t = 1100^\circ\text{C}$



Rys. 2.22. Rozkład lokalnych odkształceń zastępczych po wydłużeniu pręta o przekroju kołowym kowadźmi o stałej szerokości z gniotami o zbliżonych wielkościach [57]. Materiał: CK45 (wg DIN), $\Delta d = 20 \text{ mm}$, $a_b/d_0 = 0,5$

Ponieważ w wielu pracach brak jest dokładnej charakterystyki przeprowadzonego procesu przeróbki plastycznej, trudności te jedynie się pogłębiają.

Potwierdzeniem niedoskonałości dotychczasowego ujęcia wpływu odkształcenia jest różnorodność stosowanych sposobów obliczania tego parametru [65] i ciągle prowadzone w tym zakresie badania. Opis wpływu procesu przeróbki, uwzględniający wartość odkształceń lokalnych, jest ważny m.in. ze względu na konieczność unikania możliwości występowania obszarów gniotu krytycznego. Niewystarczające jest dochowanie warunku średniego odkształcenia większego od odpowiadającego gniotowi krytycznemu. Jako najbardziej właściwą miarę odkształcenia przyjmuje się [66] zastępcze odkształcenie rzeczywiste (φ_z) wyrażone zależnością:

$$\varphi_z = \int_0^{\varphi} d\varphi_z \quad (2.3)$$

$$d\varphi_z = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{d\varphi_1^2 + d\varphi_2^2 + d\varphi_3^2} \quad (2.4)$$

gdzie:

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - składowe odkształcenia w kierunkach głównych.

Z. Marciniak [66] uzasadnił przyjęcie tego wskaźnika jako miary dużych odkształceń i przedstawił jego interpretację geometryczną i energetyczną. Podał również metodykę postępowania przy wyznaczaniu tej wielkości dla odkształceń przestrzennych zachodzących przy dochowaniu stałej orientacji kierunków głównych i zmiennym stosunku odkształceń składowych.

2.6. Podsumowanie przeglądu literaturowego

Przeprowadzony w pracy krytyczny przegląd literatury pozwolił na ustalenie aktualnego stanu problematyki związanej z zastosowaniem kowarek do procesów wstępnego przerobu. Publikacje poświęcone tym zagadnieniom mają bowiem często charakter przyczynkowy lub informacyjno-reklamowy. Jedynie zagadnienia dotyczące analizy rozkładu naprężeń oraz sił i pracy kształtowania opisane są szerzej w dostępnej literaturze technicznej. Badania, które pozwoliłyby stworzyć racjonalne podstawy do projektowania procesów wstępnego kucia w kowarkach, powinny więc przede wszystkim objąć analizę:

- geometrycznej kotliny odkształcenia, przebiegu procesu kształtowania, odkształceń i prędkości odkształceń,
- wpływu parametrów procesu kucia kalibrującego oraz cech geometrycznych narzędzi na cechy geometryczne wyrobu,
- wpływu warunków kucia na rozkład odkształceń lokalnych,
- korelacji pomiędzy strukturą a odkształceniem lokalnym.

W świetle dokonanego przeglądu literaturowego szczególnego znaczenia nabiera problem właściwego ujęcia wpływu odkształcenia w procesie przeróbki plastycznej na strukturę i własności wyrobu. Z zasady badania te ograniczają się do określenia związków pomiędzy odkształceniem, obliczonym na podstawie zmiany zewnętrznych wymiarów, a strukturą i własnościami. Metody oceny struktury, a także wybranych własności mechanicznych pozwalają na określenie lokalnych cech materiału. Zachodzące w trakcie procesu przeróbki plastycznej zmiany zewnętrznych wymiarów nie determinują w sposób jednoznaczny przebiegu i rozkładu odkształceń lokalnych. Odkształcenia lokalne są zróżnicowane i zależą bardzo silnie od warunków prowadzenia procesu przeróbki plastycznej określanych cechami kotliny odkształcenia, prędkością odkształceń, temperaturą i własnościami kutego materiału oraz trybologicznymi własnościami warstw kontaktu narzędzi i materiału. Uwzględniając te fakty, wszelkie badania wyrażające zależność między odkształceniem obliczonym ze zmiany wymiarów zewnętrznych a strukturą i własnościami nie mogą być uogólnione, są bowiem słuszne jedynie dla rozkładu odkształceń odpowiadających konkretnym badaniom (charakter rozkładu odkształcenia) i sposobem prowadzenia prób (miejsce pobrania próbek do badań). Przy ocenie struktury porównywalność badań jest dodatkowo obciążona subiektywnością ich oceny w przypadku stosowania jakościowych lub porównawczych metod badań.

Uniwersalna metoda oceny wpływu przeróbki plastycznej na strukturę powinna uwzględniać następujące warunki:

- ocena struktury powinna być przeprowadzona przy użyciu metod metalografii ilościowej,
- odkształcenie lokalne powinno być wyrażone zastępczym odkształceniem rzeczywistym (z uwzględnieniem historii odkształcenia),
- ocena struktury przed odkształceniem i po odkształceniu powinna być dokonana przy użyciu tych samych wskaźników.

W literaturze fachowej jest bardzo wiele pozycji poświęconych rozkładowi odkształceń uzyskanych w następstwie różnych procesów przeróbki plastycznej. Znane są również rozkłady struktur w materiałach wsadowych.

Znajomość zależności funkcyjnej "cecha strukturalna - odkształcenie lokalne", przy znajomości struktury wyjściowej, pozwoliłaby na określenie lokalnej struktury w wyrobach.

Takie podejście do problemu daje przy nagromadzeniu odpowiednio bogatego materiału eksperymentalnego szereg nowych możliwości w zakresie kształtowania własności materiału wyrobów hutniczych. W zależności od potrzeb zdeterminowanych zastosowaniem finalnego produktu, można by dobrać proces technologiczny zapewniający najkorzystniejszy rozkład struktury.

3. ZAŁOŻENIA I TEZA PRACY

Jakość prętów jest najczęściej zdeterminowana własnościami mechanicznymi i cechami geometrycznymi. O własnościach mechanicznych decyduje przede wszystkim struktura materiału, która zależy od struktury pierwotnej materiału wsadowego, odkształcenia nadanego w procesie przeróbki plastycznej, warunków temperaturowych tego procesu oraz zabiegów obróbki cieplnej. Jeżeli ustalić parametry obróbki cieplnej oraz warunki temperaturowe przeróbki plastycznej na stałym poziomie, to możliwe będzie wyodrębnienie wpływu odkształcenia na strukturę i własności wyrobu.

Ponieważ zarówno wyjściowa struktura materiału wsadowego, jak i lokalne odkształcenie nadane w procesie przeróbki plastycznej są niejednorodne, należy również ten czynnik uwzględnić w badaniach. Można to osiągnąć, wyrażając wpływ odkształcenia poprzez opis lokalnej struktury wsadu oraz przez podanie związku między lokalną strukturą a odpowiadającym jej lokalnym odkształceniom. Jeżeli znany jest rozkład struktury wsadu i lokalne odkształcenie w procesie przeróbki plastycznej, to uzyskaną zależność "struktura - odkształcenie" będzie można stosować do przewidywania rozkładu struktury w wyrobach po dowolnym procesie przeróbki plastycznej.

Próbę określenia tej zależności dla procesu kucia w kowarce stali szybkoekotnącej podjęto w niniejszej pracy.

Chcąc znaleźć tę funkcję oraz mieć możliwość jej zastosowania do programowania struktury prętów odkutych w kowarce, niezbędne jest ustalenie wpływu parametrów kucia na rozkład lokalnych odkształceń oraz struktury w przecie. W prowadzonych w tym zakresie badaniach przyjęto następujące założenia:

- ocena struktury powinna być dokonana przy użyciu metod metalografii ilościowej,
- odkształcenie lokalne wyrażone będzie zastępczym odkształceniem rzeczywistym,
- ocena struktury przed i po odkształceniu zostanie dokonana przy użyciu tych samych wskaźników.

Zatem przyjęto następującą tezę pracy:

Poprzez dobór cech geometrycznych roboczej powierzchni kowadła i sposobu kalibrowania oraz takich parametrów kucia w kowarkach, jak: prędkość posuwu i gniot w przepuście, można w sposób zamierzony wpływać na lokalne odkształcenie i charakterystyczne dla tego procesu cechy geometryczne wyrobów, tzn. makronierówność i niekołowość. Możliwość uzyskania zamierzone-

go rozkładu lokalnych odkształceń pozwala z kolei na racjonalne kształtowanie w określonych obszarach wyrobu struktury materiału.

Dla dokonania weryfikacji postawionej tezy przeprowadzono studium literaturowe, teoretyczną analizę oraz eksperymentalne badania procesu kucia w kowarce.

Analiza literaturowa obejmuje uporządkowanie zagadnień dotyczących wstępnego przerobu w kowarkach oraz wpływu przeróbki plastycznej na strukturę. W zakresie teoretycznej analizy procesu opisano kotlinę odkształcenia oraz przebieg odkształceń wynikający ze zmiany wymiarów zewnętrznych.

Badania eksperymentalne obejmują określenie rozkładu lokalnych odkształceń i lokalnej struktury w prętach, ustalenie korelacji między strukturą i odkształceniem oraz ustalenie wpływu warunków kucia na cechy geometryczne wyrobów.

4. TEORETYCZNA ANALIZA PROCESU KUCIA W KOWARKACH

4.1. Kotlina odkształcenia i przebieg odkształcenia w procesie kucia w kowarkach

Proces kucia w kowarce polega na wywołaniu dużego odkształcenia (φ_p) odpowiadającego redukcji przekroju w przepuszcie, poprzez nakładanie dużej liczby odkształceń małych (φ_{poj}), odpowiadających redukcji przekroju w pojedynczym uderzeniu. Kucie materiału można prowadzić podając materiał z równoczesnym obrotem (kucie prętów o przekroju kołowym) lub bez obrotu (kucie prętów o przekroju wielokątów foremnych).

Proces kształtowania charakteryzują parametry geometrycznej kotliny odkształcenia, prędkość kształtowania, prędkość odkształcenia, wielkość odkształcenia oraz czasy przerw między odkształceniami. Ponieważ w dostępnej literaturze brak jest szczegółowego ujęcia wymienionych zależności charakteryzujących proces kucia w kowarkach, podjęto próbę ich określenia w prowadzonych badaniach własnych.

Geometryczna kotlina odkształcenia

Geometryczną kotlinę odkształcenia stanowi obszar ograniczony powierzchniami roboczymi narzędzia, powierzchnią swobodną kształtowanego materiału i płaszczyznami wejścia i wyjścia. Kształt i parametry geometrycznej kotliny odkształcenia są uzależnione od:

- sposobu podawania materiału,
- cech geometrycznych narzędzi,
- parametrów kucia,
- cech geometrycznych kutego pręta.

W procesie kucia w kowarkach takie parametry kucia, jak: częstość uderzeń (f_u), czas pełnego obrotu głowicy manipulatora (T_m) są stałe, charakterystyczne dla danego typu kowarki. Zmieniać można natomiast prędkość posuwu manipulatora (V_m) oraz wielkość przeswitu między kowadełkami (d_n).

Geometryczna kotlina odkształcenia przy podawaniu materiału ruchem złożonym

Podawanie materiału ruchem posuwistym z równoczesnym obrotem umożliwia kucie prętów o przekroju kołowym z wsadu o przekroju kołowym, 8-kątnym lub zbliżonym do kwadratu. Dla scharakteryzowania podstawowych parametrów tego procesu zostaną przeprowadzone rozważania dotyczące przypadku kucia pręta o przekroju kołowym z wsadu o tym samym wyjściowym kształcie przekroju (rys. 4.1).

$$\alpha_u = \frac{2\pi}{T_m \cdot f_u} \quad (4.2)$$

gdzie:

T_m - czas pełnego obrotu głowicy manipulatora (s).

Jeżeli powierzchnię części kalibrującej stanowi płaszczyzna, to, uwzględniając kinematykę wzajemnych ruchów narzędzi i materiału, przekrój pręta po odkuciu nie jest idealnym kołem, lecz wielokątem foremnym, w którym liczba boków jest równa liczbie uderzeń wykonanych w czasie pełnego obrotu głowicy manipulatora (n_T)

$$n_T = T_m \cdot f_u \quad (4.3)$$

Aby przekrój gotowego wyrobu maksymalnie zbliżyć do idealnego koła, na powierzchni kalibrującej wykonuje się wgłębienie (rys. 4.2) o promieniu wytoczenia r_w dobranym odpowiednio do średnicy gotowego pręta (d_g). Wgłębienie powinno być jednocześnie na tyle łagodne, aby nie wywodzić powstawania zakuć na powierzchni prętów kutych we wcześniejszych fazach procesu, tj. począwszy od kucia wsadu. Parametrem ujmującym ilościowo stopień dopasowania promienia wytoczenia do średnicy gotowego pręta jest stopień przylegania (s):

$$s = \frac{d_g}{2r_w} \quad (4.4)$$

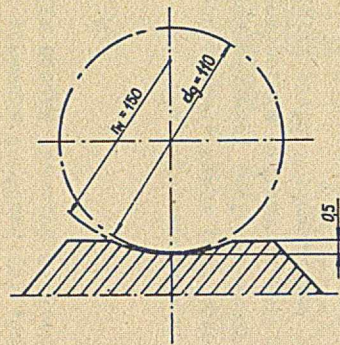
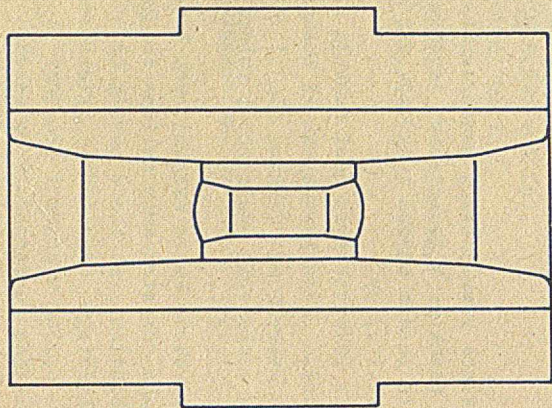
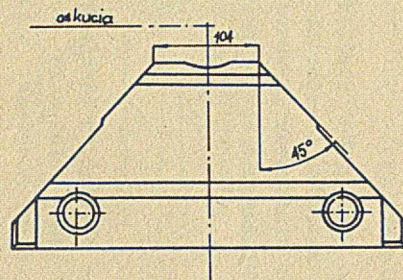
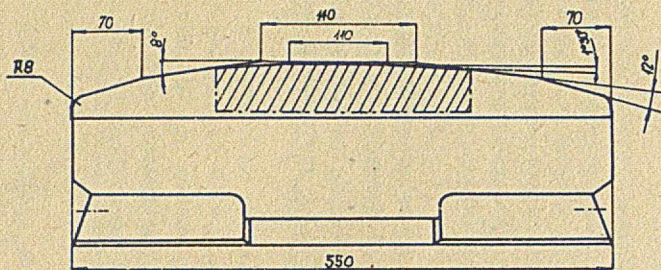
W praktyce przemysłowej powierzchnie kalibrujące nowych kowadeł są najczęściej płaskie. W trakcie ich użytkowania na skutek postępującego procesu zużycia bardzo szybko pojawiają się wgłębienia stanowiące "naturalny" wykrój kalibrujący.

Ognisko odkształcenia jest funkcją cech geometrycznych narzędzi i parametrów kucia. Charakterystycznymi parametrami narzędzi do kucia pręta o przekroju kołowym są: długość (l_k) i szerokość (b_k) części kalibrującej oraz kąty nachylenia powierzchni roboczej (α_r) i powierzchni wprowadzającej (α_w)-rys. 4.1.

Do parametrów kucia wpływających bezpośrednio na kształt i powierzchnię ogniska odkształcenia zalicza się gniot (Δd) - regulowany prześwitem między kowadłami, wielkość posuwu (p) i kąt obrotu (α_u) między uderzeniami. Uwzględniając odpowiednie zależności geometryczne, ognisko odkształcenia można opisać wymiarami długości (l_{og}) i szerokości (b_{og}) obliczonymi z zadowalającą dokładnością ze wzorów:

$$l_{og} = \frac{\Delta d}{2} \operatorname{ctg} \alpha_r + v_p \cdot \frac{T_m}{4} \quad (4.5a)$$

$$b_{og} = \frac{(d_{n-1} - \Delta d) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_u}{2} + \sqrt{\frac{5 \cdot v_p \cdot \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u} (d_{n-1} - \frac{5 \cdot v_p \cdot \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u})}}{2} \quad (4.5b)$$



Rys. 4.2. Kowadło do kucia prętów o przekroju kołowym

Przekrój wejściowy (S_{n-1}) i wyjściowy (S_n) oraz gniot całkowity w przejściu (Δd) są to wielkości ściśle ze sobą związane, co zostanie omówione w dalszej części opracowania.

Przy kuciu z podawaniem materiału ruchem złożonym gniot w pojedynczym uderzeniu ($\Delta d'$) zależy od wielkości posuwu między uderzeniami leżącymi wzduż jednej tworzącej, tj. skeku linii śrubowej wyznaczonej śladami uderzeń (p_s) i wyrażony jest zależnością:

$$\Delta d' = 2 p_s \cdot \operatorname{tg} \alpha_{Tr} \quad (4.6)$$

gdzie:

$$p_s = v_p \cdot \frac{T_m}{4}$$

a stąd:

$$\Delta d' = \frac{v_p \cdot T_m}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{Tr} \quad (4.7)$$

Geometryczna kotlina odkształcenia przy podawaniu materiału ruchem posuwistym

Podawanie ruchem posuwistym stosuje się w zasadzie do kucia prętów o przekrojach typu wielokątów foremnych (rys. 4.3). W przypadku wstępnego przerobu materiału stosuje się głównie kucie z przekroju kołowego na kwadrat (rys. 4.3a) z zaokrąglonymi narożami oraz z kwadratu na ośmiokąt (rys. 4.3b). Parametrami charakteryzującymi kotleinę odkształcenia w takim procesie są:

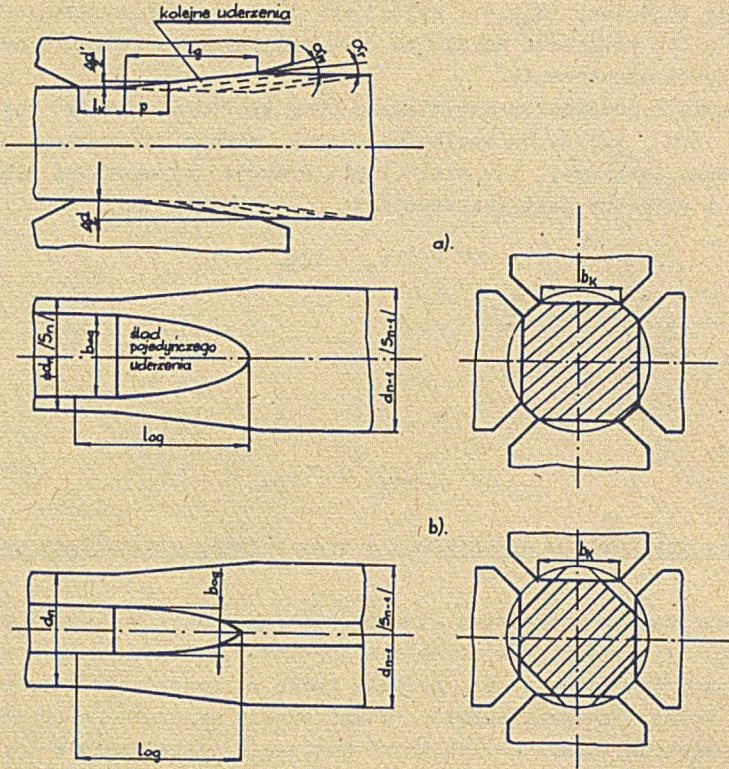
- podanie materiału (p),
- długość (l_{og}) i szerokość (b_{og}) ogniska odkształceń,
- przekrój wejściowy (S_{n-1}) i wyjściowy (S_n),
- gniot całkowity w przepuszczeniu (Δd),
- gniot w pojedynczym uderzeniu ($\Delta d'$).

Zależności przytoczone w punkcie dotyczącym geometrycznej kotleiny odkształcenia przy podawaniu ruchem złożonym dla posuwu materiału, przekroju wejściowego i wyjściowego oraz gniotu całkowitego są słuszne również dla kucia materiału podawanego ruchem posuwistym.

Wymiary ogniska odkształcenia są natomiast wyrażone odmiennymi zależnościami.

Długość ogniska odkształcenia dla kucia przy podawaniu materiału ruchem posuwistym oblicza się ze wzoru:

$$l_{og} = \frac{\Delta d}{2} \cdot \operatorname{ctg} \alpha_{Tr} + \frac{v_p}{f_u} \quad (4.8)$$



Rys. 4.3. Geometryczna kotlina odkształcenia przy podawaniu materiału ruchem posuwistym:
 a - dla kalibrowania "koło - kwadrat", b - dla kalibrowania "kwadrat - ośmiokąt"

Szerokość ogniska odkształcenia dla kucia z przekroju kołowego na kwadratowy wyraża wzór:

$$b_{og} = \sqrt{\Delta d(2d_{n-1} - \Delta d)} \quad (4.9a)$$

- a dla kucia z przekroju kwadratowego na ośmiokąt wzór:

$$b_{og} = d_{n-1} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{4} \quad (4.9b)$$

Wielkość gniotu w pojedynczym uderzeniu wyrażona jest wzorem:

$$\Delta d = \frac{2v_p \cdot \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u} \quad (4.10)$$

- różniącym się od odpowiedniego wyrażenia (wzór 4.7) dla kucia materiału podawanego ruchem złożonym.

O d k s z t a ł c e n i e w p r z e j ś c i u i w p o j e d y n c z y m u d e r z e n i u

Obliczenie odkształcenia w przejściu wymaga ustalenia powierzchni przekroju pręta przed odkształceniem (S_{n-1}) i po odkształceniu (S_n).

Odształcenie w przejściu (φ_p) można wyrazić wskaźnikiem odkształcenia obliczonym z zależności:

$$\varphi_p = \ln \frac{S_{n-1}}{S_n} \quad (4.11)$$

W procesie kucia w kowarkach stosowane są systemy kalibrowania "koło - koło", "koło - kwadrat - ośmiokąt - koło", "koło - kwadrat - koło".

Przekrój kołowy nie jest w tym przypadku, jak już wspomniano, idealnym kołem. Obliczenia powierzchni przekroju można jednakże sprowadzić do obliczenia powierzchni koła, bez istotnego uszczerbku dla wymaganej dokładności (błąd względny wynosi ok. 0,6%):

$$S_{n-1} = \frac{\pi d_{n-1}^2}{4} \quad (4.12a)$$

$$S_n = \frac{\pi d_n^2}{4} \quad (4.12b)$$

Przekrój uzyskany po przepuszczeniu "koło - kwadrat" nie jest, ściśle biorąc, kwadratem, lecz figurą zbliżoną do kwadratu o boku d_n i zaokrąglonych narożach.

Powierzchnię tego przekroju oblicza się z zależności:

$$S_n = \frac{\pi d_{n-1}^2}{4} - d_{n-1}^2 \cdot \arccos \frac{d_n}{d_{n-1}} + d_n \sqrt{d_{n-1}^2 - d_n^2} \quad (4.13)$$

Przekrój uzyskany po przepuszczeniu "kwadrat - ośmiokąt" jest zbliżony kształtem do idealnego ośmiokąta. Powierzchnię przekroju oblicza się z zależności:

$$S_n = 0.8284 d_n^2 \quad (4.14)$$

Całkowite odkształcenie w przepuszczeniu dla poszczególnych rodzajów kalibrowania można wyrazić wzorami:

- dla kalibrowania "koło - koło"

$$\varphi_p = 2 \ln \frac{d_{n-1}}{d_n} \quad (4.15a)$$

- dla kalibrowania "koło - kwadrat"

$$\varphi_p = \ln \frac{\pi \left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2}{\pi \left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 - 4 \left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 \cdot \arccos \frac{d_n}{d_{n-1}} + 4 \sqrt{\left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 - 1}} \quad (4.15b)$$

- dla kalibrowania "kwadrat - ośmiokąt"

$$\varphi_p = \ln \frac{1}{0,9284} \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 - \left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 \arccos \frac{d_n}{d_{n-1}} + \sqrt{\left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 - 1} \right] \quad (4.15c)$$

Wymiary d_{n-1} oraz d_n są odpowiednio średnicą przekroju kołowego przed kuciem na przekrój kwadratowy oraz odległością między płaskimi bokami "kwadratu" o zaokrąglonych narożach.

- dla kalibrowania "kwadrat - koło"

$$\varphi_p = \ln \frac{\pi d_{n-2}^2 - 4 d_{n-2}^2 \cdot \arccos \frac{d_{n-1}}{d_{n-2}} + d_{n-1} \sqrt{d_{n-2}^2 - d_{n-1}^2}}{\pi d_n^2} \quad (4.15d')$$

Wzór (4.15d') jest wzorem ogólnym uwzględniającym kucie z kwadratu o zaokrąglonych narożach, o wymiarach d_{n-2} (przekątna naroży) i d_{n-1} (rozwarcie boków) na koło o średnicy $d_n = d_{n-1}$. W praktyce przemysłowej, ze względu na duże zróżnicowanie obciążeń w uderzeniach, ogranicza się redukcję przekroju do wymiaru koła o średnicy odpowiadającej rozwarciu boków ($d_n = d_{n-1}$). Jeżeli przyjąć dla takiego przypadku, że wymiary d_{n-1} i d_n są wymiarami oznaczonymi, jak dla kalibrowania "kwadrat - ośmiokąt", to wzór przyjmie postać:

$$\varphi_p = \ln \frac{\pi \left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 - 4 \left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 \arccos \frac{d_n}{d_{n-1}} + 4 \sqrt{\left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 - 1}}{\pi} \quad (4.15d'')$$

- dla kalibrowania "ośmiokąt - koło"

$$\varphi_p = \ln \left[\frac{3.3136}{\pi} \cdot \left(\frac{d_{n-1}}{d_n} \right)^2 \right] \quad (4.15e)$$

Obliczanie odkształceń w przepuście z przytoczonych wzorów, szczególnie w przypadku przepustów, w których przekrój pręta zbliżony jest do kwadratu, jest uciążliwe. Dla ułatwienia sporządzono na podstawie wyprowadzonych wzorów nomogramy (rys. 4.4) do wyznaczania odkształceń w przepuście. Całkowitą redukcję przekroju w przepuście można rozpatrywać jako sumę kolejnych odkształceń w poszczególnych uderzeniach. Wielkość średniego odkształcenia w pojedynczym uderzeniu nie zależy od sposobu podawania materiału. Zależy natomiast od wielkości odkształcenia w przepuście (φ_p), prędkości podawania (v_p), częstości uderzeń (f_u), wielkości gniotu bezwzględnego (Δd) oraz kąta pochylenia powierzchni roboczej kowadła (α_r) i wyrażona jest zależnością:

$$\varphi_{poj} = \frac{2 \cdot v_p \cdot \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u (d_{n-1} - d_n)} \cdot \varphi_p \quad (4.16)$$

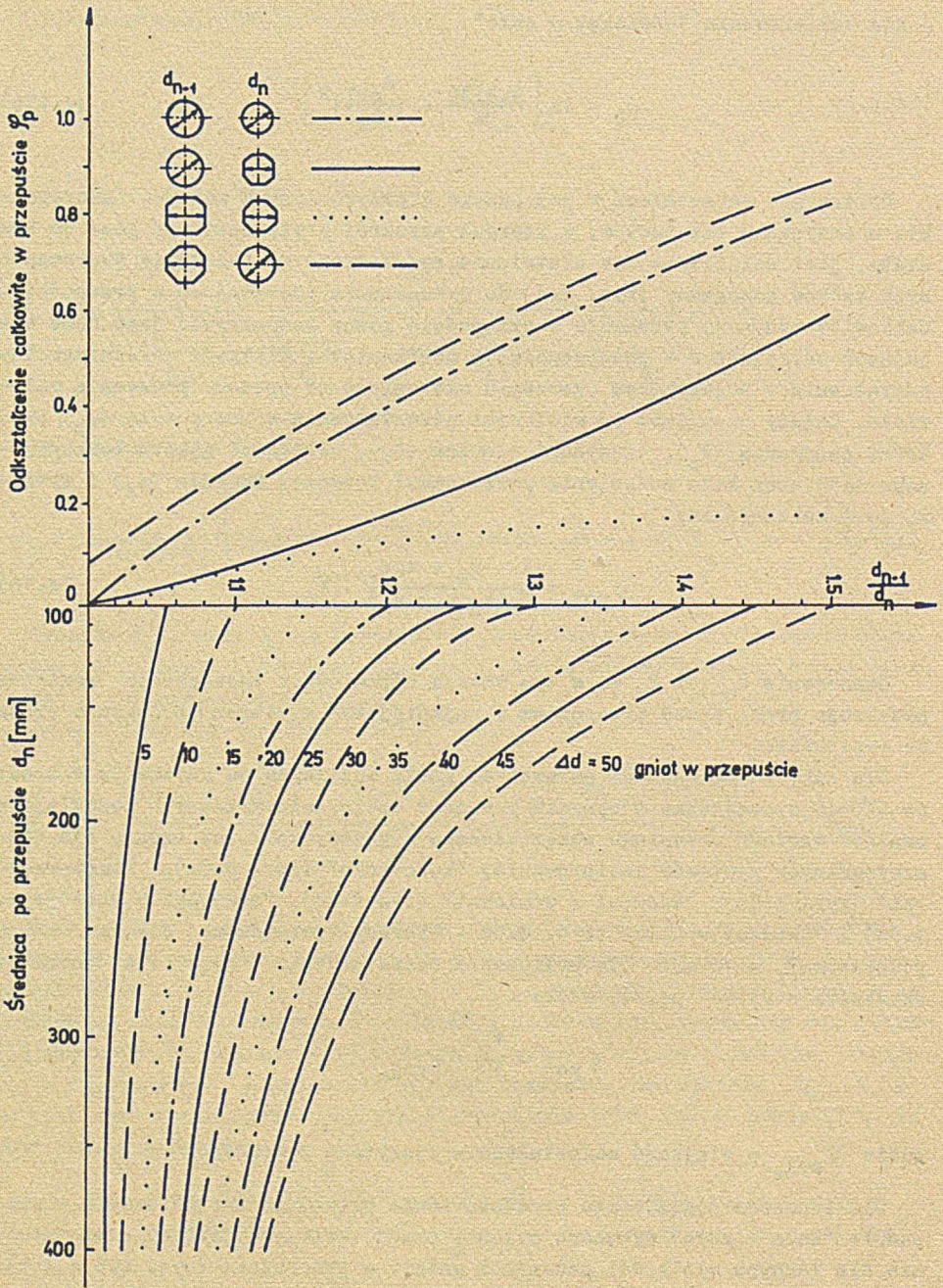
Oznaczenia d_{n-1} i d_n są w tym wzorze odpowiednio największym wymiarem przekroju pręta przed przepustem i najmniejszym wymiarem przekroju pręta po przepuście.

Dla zakresu zmienności parametrów kucia możliwych do uzyskania w kowarce SXL-40 sporządzono w oparciu o własne dociekania wykresy pozwalające znaleźć wartość średniego odkształcenia w pojedynczym uderzeniu dla poszczególnych systemów kalibrowania: "koło-koło" (rys. 4.5a), "koło-kwadrat" (rys. 4.5b), "kwadrat - ośmiokąt" (rys. 4.5c), "ośmiokąt - koło" (rys. 4.5d) i "kwadrat - koło" (rys. 4.5e). Wykresy sporządzono dla prędkości podawania $v_p = 10$ m/s. Dla obliczenia odkształcenia φ_{poj} dla dowolnej prędkości stosować należy wzór:

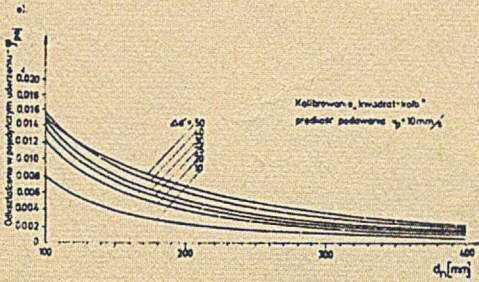
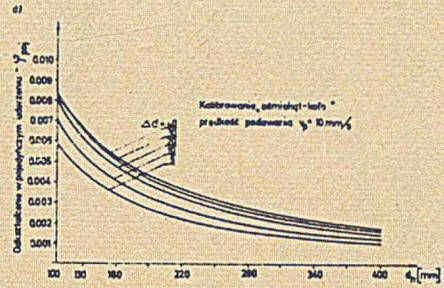
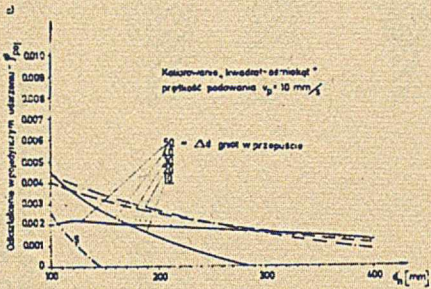
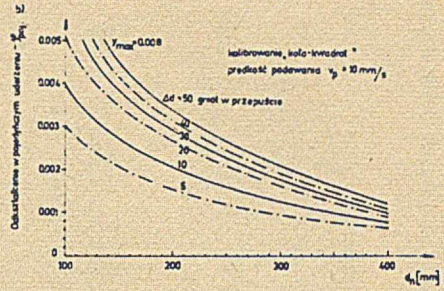
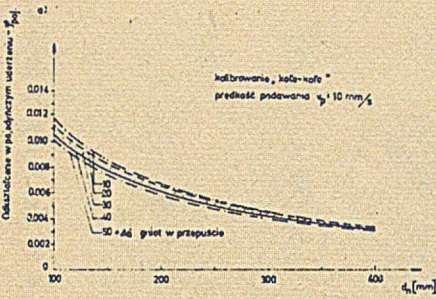
$$\varphi_{poj} = \frac{v_p}{10} \cdot \varphi_{poj_w} \quad (4.16a)$$

gdzie φ_{poj_w} - wielkość odkształcenia odczytana z wykresu.

Dla lepszego poglądowego przedstawienia przebiegu kształtowania w przepuście "koło - koło" wykonano rysunki przedstawiające kotliny odkształcenia dla różnych wielkości podania i gniotu w przepuście (rys. 4.6 - 4.9). Na rysunkach oznaczono ponadto przebieg redukcji przekroju wzdłuż kotliny odkształcenia.

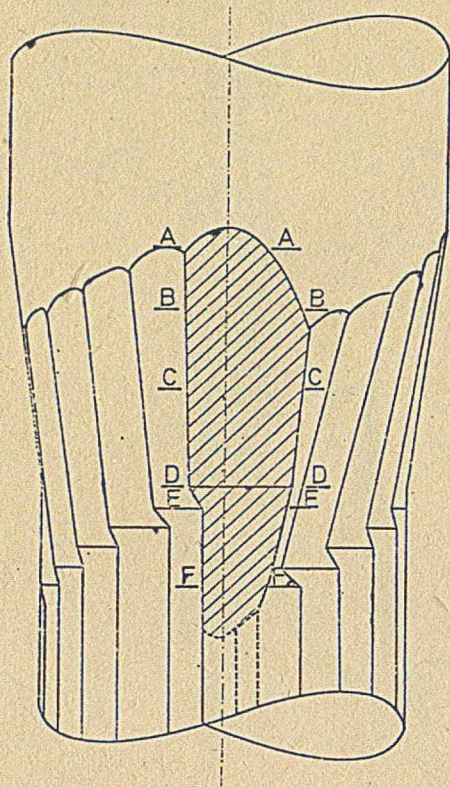


Rys. 4.4. Nomogram do wyznaczania odształceń w przepuszczeniu w zależności od kształtu przekroju i parametrów kucia pręta

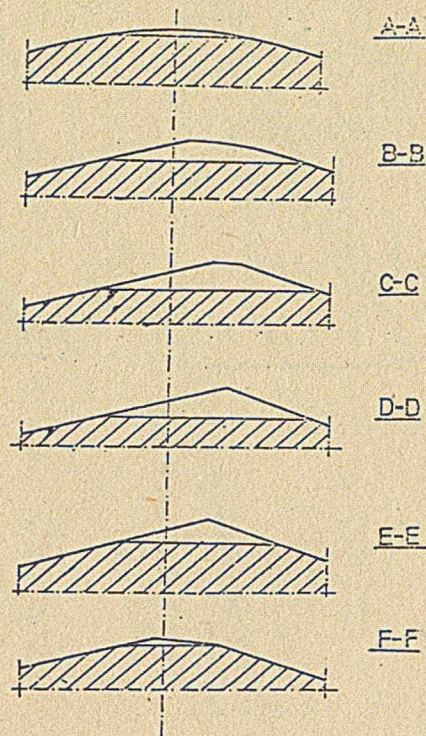


Rys. 4.5. Średnie odkształcenie w pojedynczym uderzeniu w zależności od średnicy i wielkości grotu dla kalibrowania: a - "koło - koło", b - "koło - kwadrat", c - "kwadrat - ośmiokąt", d - "ośmiokąt - koło", e - "kwadrat - koło"

a.

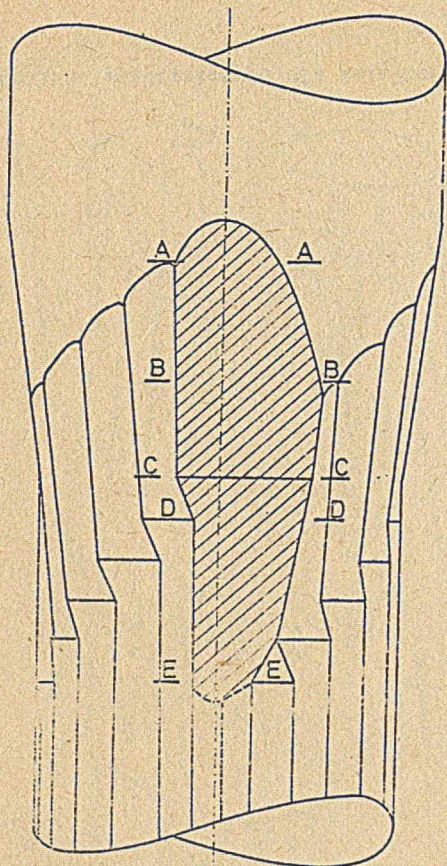


b. $d_n = 100 \text{ mm}$; $\Delta d = 20 \text{ mm}$
 $v_p = 50 \text{ mm/s}$



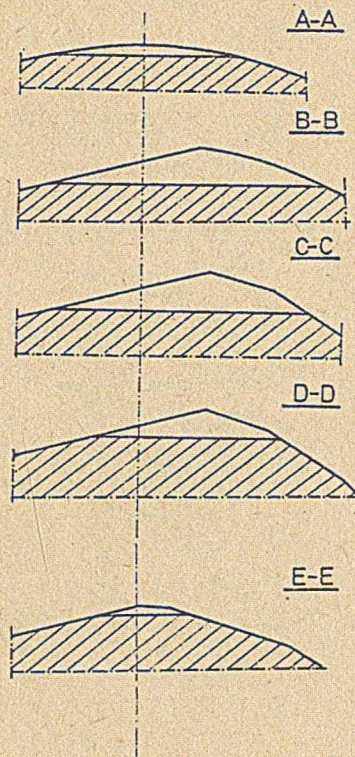
Rys. 4.6. Kotlina odkształcenia dla kalibrowania "koło - koło", małego gniotu ($\Delta d = 20 \text{ mm}$), małej prędkości podawania ($v_p = 50 \text{ mm/s}$)

a.

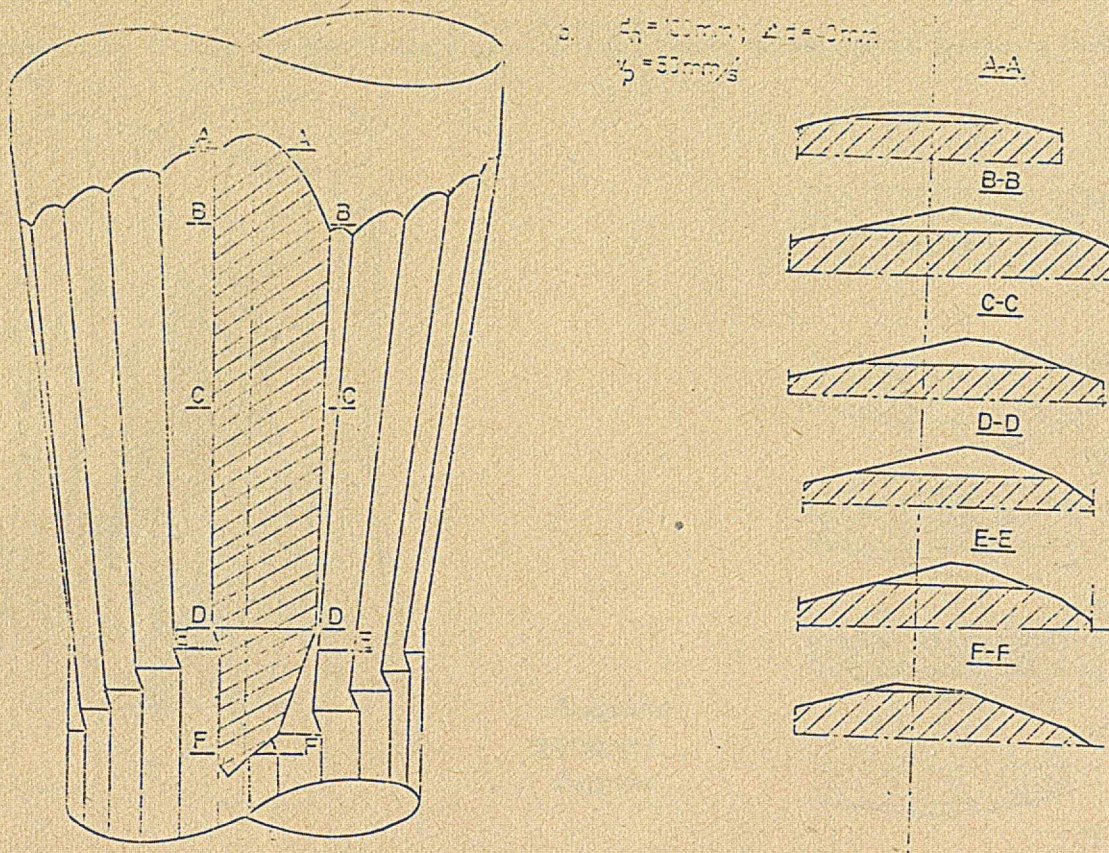


b.

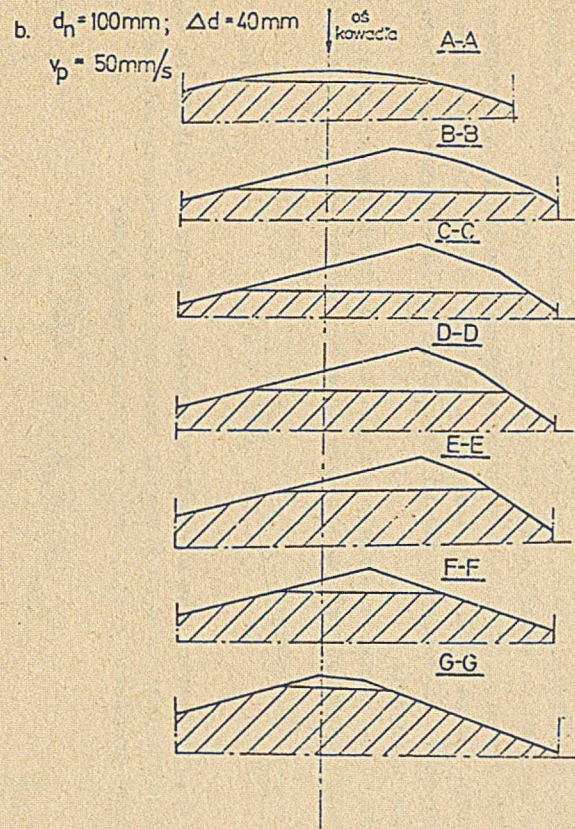
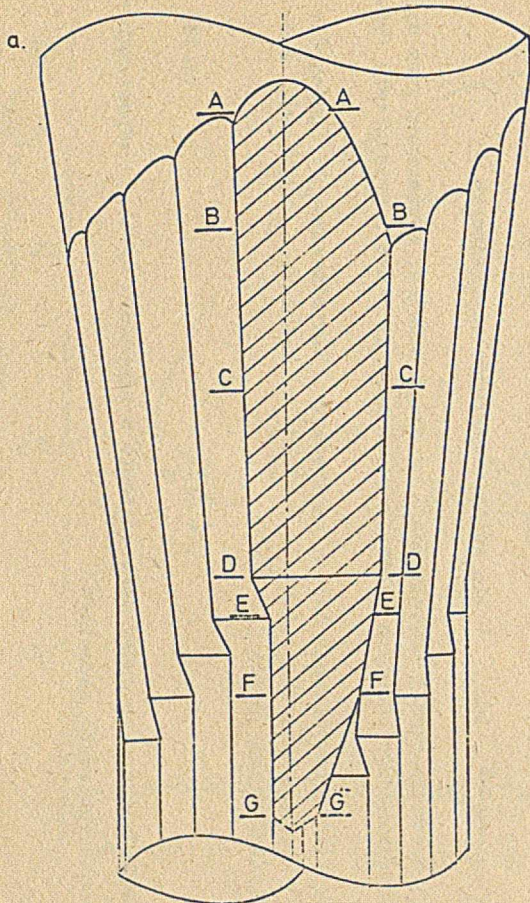
$d_r = 100 \text{ mm}$
 $\Delta d = 20 \text{ mm}$
 $v_p = 100 \text{ mm/s}$



Rys. 4.7. Kotlina odkształcenia dla kalibrowania "koło - koło" małego gniotu, dużej prędkości podawania ($v_p = 100 \text{ mm/s}$)



Rys. 4.8. Kotlina odkształcenia dla kalibrowania "koło - koło", dużego gniotu ($\Delta d = 40 \text{ mm}$), małej prędkości podawania



Rys. 4.9. Kotlina odkształcenia dla kalibrowania "koło - koło", dużego gniołu i dużej prędkości podawania

Prędkość kształtowania i odkształcenia

W procesie technologicznym kucia w kowarkach szczególnie istotna jest prędkość kształtowania, równa prędkości ruchu narzędzi - kowadeł w czasie wywierania nacisku na kształtowany plastycznie materiał.

Mechanizm przekazujący napęd na kowadła kowarki zapewnia synchronizację ich ruchu. Bezpośrednie przekazywanie nacisku odbywa się przez mechanizm korbowodowy. Zastosowany rodzaj mechanizmu określa parametry kinematyczne ruchu narzędzi.

Prędkość ruchu narzędzi, uwzględniając stałą prędkość obrotową wału i wielkość mimośrodowości "e", można wyrazić w funkcji drogi (x) zależnością:

$$v_x = 2\pi f_u \sqrt{x(2e - x)} \quad (4.17)$$

Prędkość kształtowania ma wartość maksymalną w momencie zetknięcia się z materiałem i maleje do zera w chwili zakończenia suwu roboczego. Maksymalną wartość prędkości kształtowania wyznacza zależność:

$$v_{k_{max}} = 2\pi f_u \sqrt{\Delta d' \left(-\frac{\Delta d'}{4} \right)} \quad (4.17a)$$

gdzie:

$$\Delta d' = \frac{v_p \cdot T_m}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_r \quad - \text{ dla kucia przekrojów kołowych}$$

$$\Delta d' = \frac{2 \cdot v_p}{f_u} \cdot \operatorname{tg} \alpha_r \quad - \text{ dla kucia przekrojów wielokątnych}$$

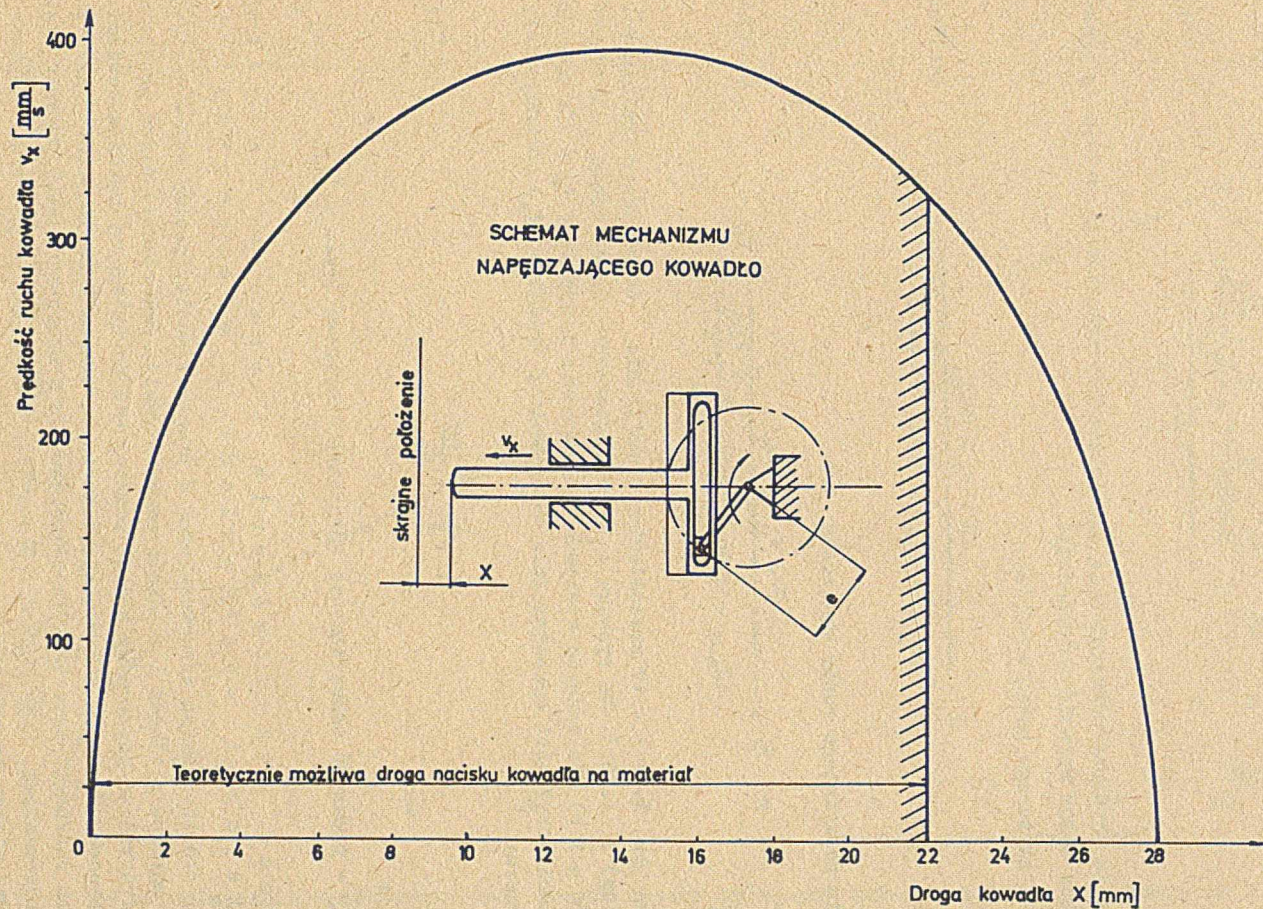
Zależność prędkości kształtowania od drogi kowadła, wyznaczoną przy wykorzystaniu wyprowadzonych zależności dla kowarki SXL-40, przedstawia rys. 4.10.

Prędkość odkształcenia zależy od prędkości kształtowania i przekroju kształtowanego materiału. Średnią prędkość odkształcenia w uderzeniu można obliczyć z zależności

$$\bar{\psi} = \frac{\varphi_{poj}}{t_u} \quad (4.18)$$

Uwzględniając, że czasy odkształcenia w uderzeniu wynoszą odpowiednio: dla złożonego ruchu materiału

$$t_u = \frac{\arccos\left(1 - \frac{v_p \cdot T_m \cdot \operatorname{tg} \alpha_r}{4 \cdot e}\right)}{2\pi \cdot f_u} \quad (4.19a)$$



Rys. 4.10. Prędkość kształtowania w zależności od drogi kowadła dla kowarki SXL-40

dla posuwistego ruchu materiału

$$t_u = \frac{\arccos \left(1 - \frac{v_p \cdot \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u \cdot e} \right)}{2\pi \cdot f_u} \quad (4.19b)$$

średnią prędkość odkształcenia dla całkowitej redukcji przekroju w przepięciu można wyrazić zależnością:

- dla złożonego ruchu materiału

$$\bar{\psi} = \frac{4\pi \cdot v_p \cdot \operatorname{tg} \alpha_r}{(d_{n-1} - d_n) \arccos \left(1 - \frac{v_p \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \alpha_r}{4 \cdot e} \right)} \quad (4.20a)$$

- dla posuwistego ruchu materiału

$$\bar{\psi} = \frac{4\pi \cdot v_p \cdot \operatorname{tg} \alpha_r}{(d_{n-1} - d_n) \arccos \left(1 - \frac{v_p \cdot \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u \cdot e} \right)} \cdot \varphi_p \quad (4.20b)$$

Na rys. 4.11 i 4.12 przedstawiono graficznie odpowiednio zależności (4.19a) i (4.19b). Na rysunku 4.13 przedstawiono graficznie zależność (4.20 a i b) dla różnych systemów kalibrowania i średnicy $d_n = 100$ mm. Obliczenia prędkości odkształcenia dla dowolnej średnicy (d_n) dokonuje się ze wzoru:

$$\bar{\psi} = \bar{\psi}_w \cdot \frac{100}{d_n} \quad (4.20c)$$

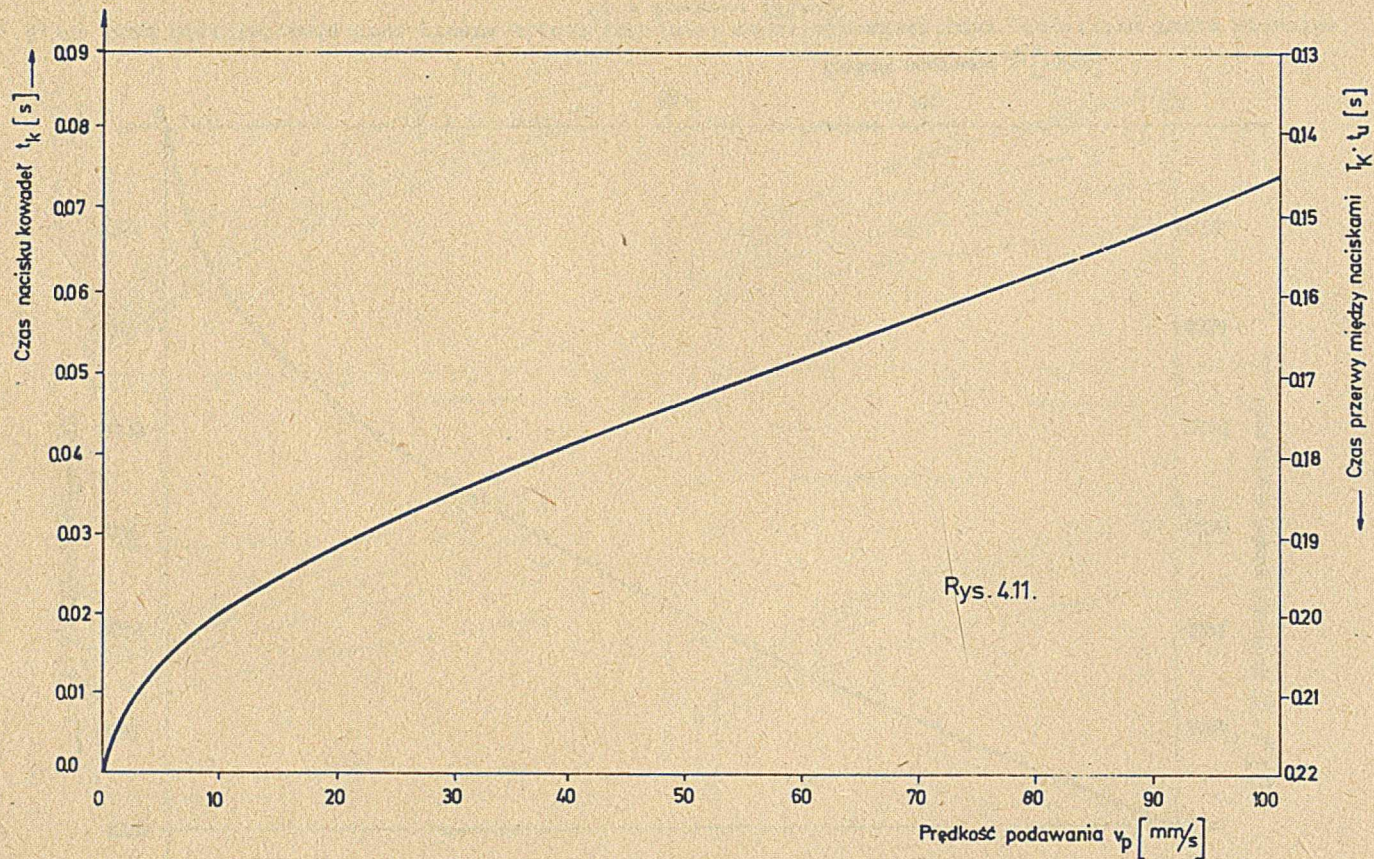
gdzie:

$\bar{\psi}_w$ - prędkość odkształcenia odczytana z wykresu (rys. 4.13).

Czas odkształcenia i przerw między kolejnymi uderzeniami i przepustami

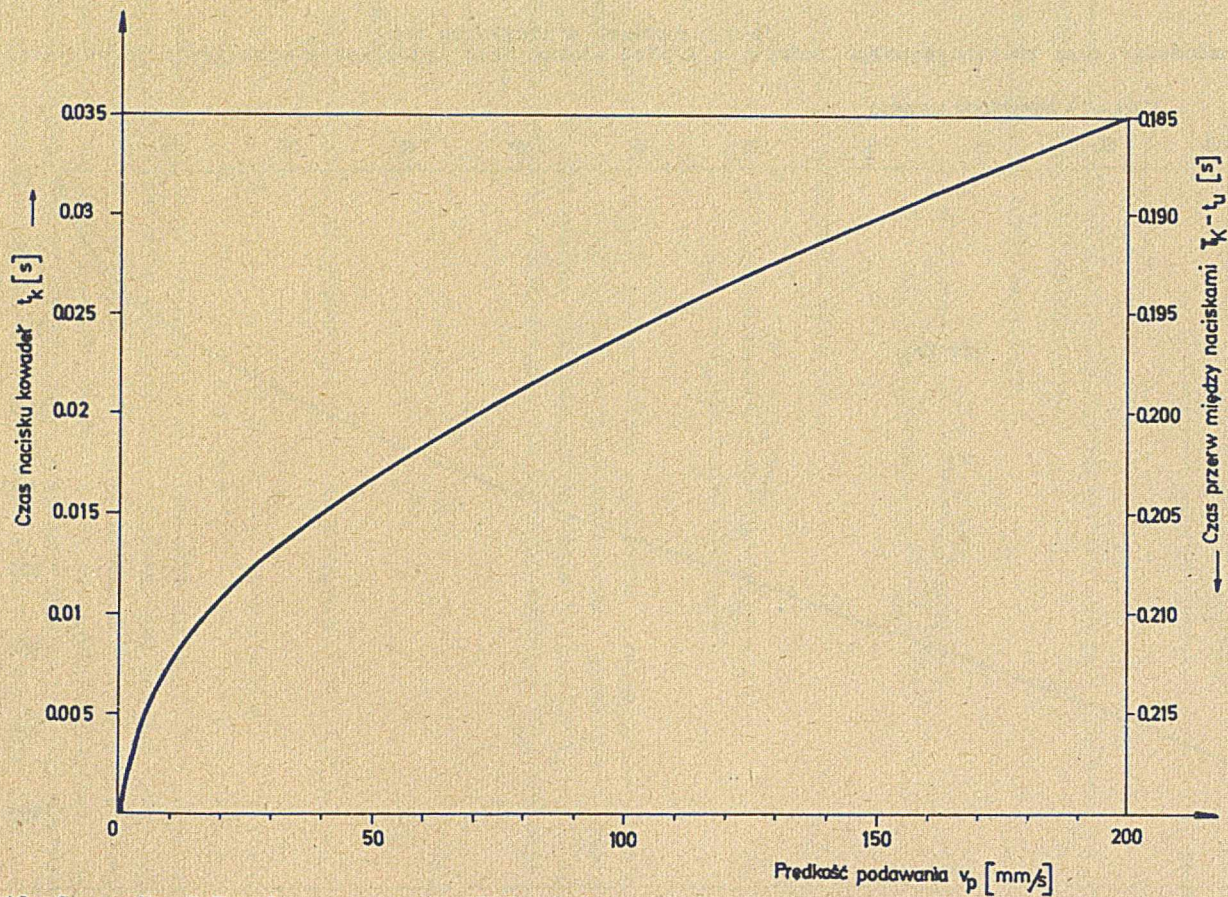
Na przebieg zmian strukturalnych w procesie kucia istotny wpływ wywierają zarówno wielkość i prędkość odkształcenia, jak również czasy przebiegu odkształceń pojedynczych oraz przerwy między kolejnymi odkształceniami. Dla procesu kucia na kowarce zjawiska te są szczególnie złożone. Należy bowiem rozróżnić czas trwania odkształcenia w uderzeniu, czas przerwy między uderzeniami, czas całkowitej redukcji przekroju w przejściu oraz czas przerwy między przepustami.

Czas odkształcenia w pojedynczym uderzeniu zależy między innymi od wielkości przesunięcia materiału między kolejnymi leżącymi wzdłuż tworzącej uderzeniami. W przypadku podawania materiału ruchem śrubowym uderzenia te

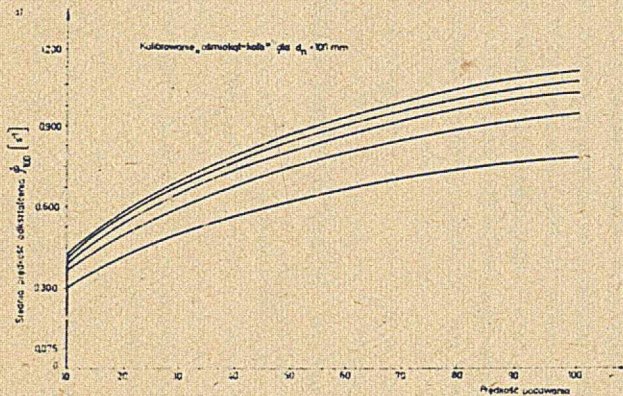
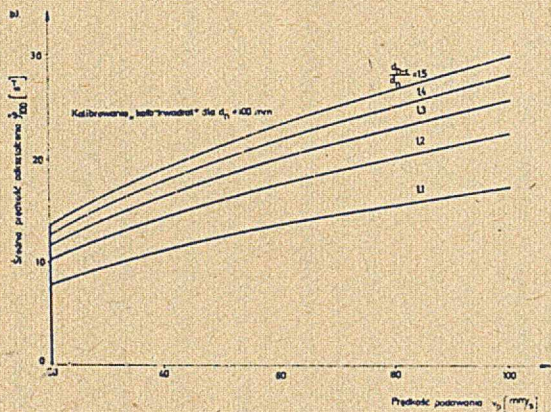
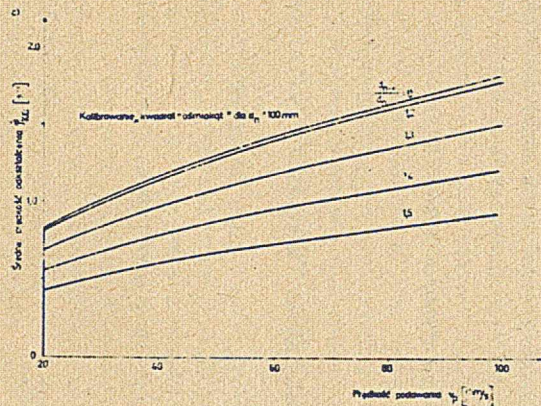
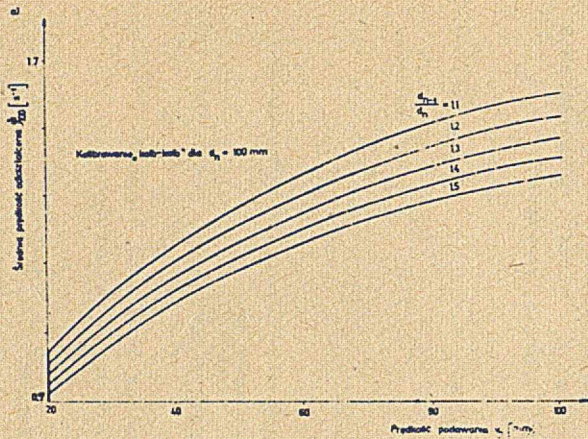


Rys. 4.11.

Rys. 4.11. Czas odkształcenia w uderzeniu oraz przerw między kolejnymi odkształceniami przy złożonym ruchu materiału w kowarce SXL-40



Rys. 4.12. Czas odkształcenia oraz przerw między kolejnymi odkształceniami przy posuwistym ruchu materiału w kowarce SXL-40



Rys. 4.13. Prędkość odkształcenia w zależności od parametrów kucia dla kalibrowania:
 a - "koło - koło", b - "koło - kwadrat", c - "kwadrat - ośmiokąt", d - "ośmiokąt - koło", e - "kwadrat -
 - koło"

wykonane są kowadłami przesuniętymi względem siebie o kąt 90° , a dla ruchu posuwistego tym samym kowadłem.

Dla obliczonych ze wzorów (4.1) i (4.7) wielkości przesunięć czasy trwania odkształcenia w uderzeniu wyrażają odpowiednio: dla złożonego ruchu materiału wzór (4.19a), natomiast dla posuwistego ruchu materiału wzór (4.19b) - obydwie zależności przedstawiono na wykresach (rys. 4.11 i 4.12) dla parametrów kowarki SXL-40.

Ponieważ czas trwania pełnego cyklu pracy kowadeł wynosi:

$$T_K = \frac{1}{F_u} \quad (4.21)$$

zatem dla przerwy między kolejnymi odkształceniami (rys. 4.11 i 4.12) spełniona jest zależność:

$$t_p = T_K - t_u \quad (4.22)$$

Czas całkowitego redukowania przekroju pręta w przepuście można obliczyć z zależności:

$$t = \frac{\Delta d}{v_p \cdot \sigma_{Br}} \quad (4.23)$$

We wzorze (4.23) nie uwzględniono strefy kalibrującej. Czas (t_{pc}), jaki upłynie między wyjściem a ponownym wejściem w strefę odkształcenia przekroju położonego w odległości "x" od końca pręta, wynosi:

$$t_{pc} = \frac{x}{v_{p_{n-1}}} + \frac{\lambda_{n-1} \cdot x}{v_{p_n}} + t_m \quad (4.24)$$

gdzie:

- λ_{n-1} - wydłużenie w przepuście "n-1",
- t_m - czas manipulacji pomocniczych niezbędnych do ponownego wprowadzenia kutego pręta między kowadła,
- $v_{p_{n-1}}, v_{p_n}$ - prędkość podawania odpowiednio w przepuście (n-1) oraz (n).

Przerwa między odkształceniami w przepuście jest więc znacznie zróżnicowana dla poszczególnych, położonych wzdłuż pręta przekrojów.

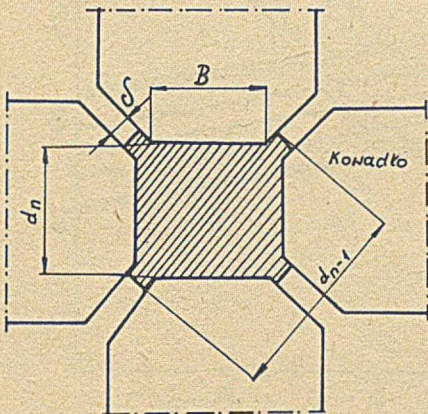
W a r u n k i o g r a n i c z a j ą c e p r o c e s k u c i a

Czynniki mogące ograniczyć maksymalne wartości parametrów procesu kucia można podzielić na: siłowo-energetyczne, technologiczne i geometryczne.

Parametry siłowo-energetyczne, tzn. maksymalny nacisk kowadeł, maksymalny moment napędowy oraz pobór długotrwały energii, stanowią odrębną grupę zagadnień nie będących przedmiotem rozważań niniejszej pracy. Należy jednak w tym miejscu stwierdzić, że wytwarzane kowarki do wstępnego przerobu są wyposażone w odpowiednie zabezpieczenia pozwalające uniknąć trwałych uszkodzeń kowarek w przypadku ewentualnego przekroczenia chociażby jednego z tych parametrów. Ponadto kowarki są wyposażone we wskaźniki mocy pozwalające operatorowi na bieżące śledzenie pobieranej mocy przez maszynę. Jeżeli chodzi o grupę ograniczeń technologicznych, to omówiono je w miarę szczegółowo w przeglądzie literaturowym. Wyprowadzone w niniejszej pracy zależności pomiędzy parametrami kucia, a przebiegiem odkształceń stwarzają dalsze możliwości w przewidywaniu zjawisk występujących w procesie kucia i doborze najważniejszych dla danych materiałów parametrów kucia.

Odrębną grupę ograniczeń stanowią ograniczenia geometryczne. Przez ograniczenia geometryczne rozumiane są graniczne wartości wymiarów odkuwek i gniotów w przepustach zdeterminowane cechami geometrycznymi narzędzi. Przekroczenie tych wartości prowadzi głównie do powstania wady wyrobu zwanej "zakuciem", będącej bardzo uciążliwą do usunięcia i prowadzącej do poważnych strat materiałowych. Dla wszystkich rodzajów kalibrowania ograniczeniem maksymalnego gniotu jest długość powierzchni roboczej kowadła (l_r), która przy kącie nachylenia (α_r) pozwala na zastosowanie gniotu

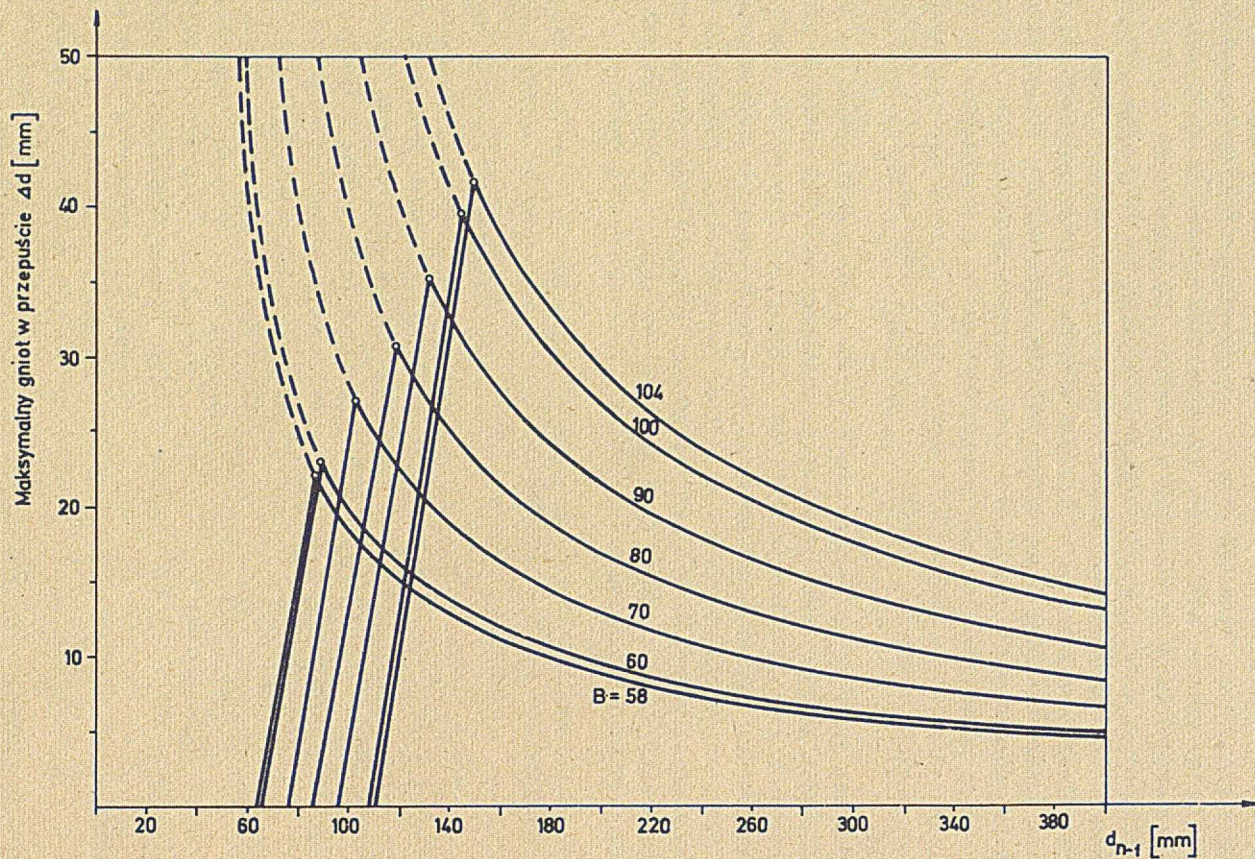
$$\Delta d_{\max} = 2l_r \cdot \operatorname{tg}\alpha_r \quad (4.25)$$



Rys. 4.14. Schemat powstania wad w przejściu "koło - kwadrat"

Kształt wzdłużny kowadeł (rys.4.1) jest najczęściej taki, że ewentualne przekroczenie tego gniotu w granicach tolerancji wymiaru wsadu nie prowadzi do powstania "zakuc". Kowadła mają bowiem powierzchnie wprowadzające o kącie nachylenia (α_w), które łagodzą przejście między odcinkiem pręta odkutym i wsadowym.

Dla kalibrowania "koło - koło" kolejnym ograniczeniem jest promień wytoczenia lub wyrobienia wykroju kalibrującego (r_w). Warunek ograniczający średnicę maksymalną gotowego wyrobu (d_g) od promienia wytoczenia dobrze ujmuje stopień przylegania (s), który nie może być większy od jedności



Rys. 4.15. Wykres dopuszczalnych gniotów przy kuciu w przepuście "koło - kwadrat" w kowarce SXL-40

$$s = \frac{d_g}{2r_w} \leq 1 \quad (4.26)$$

Szczególnie istotne jest dotrzymanie warunku ograniczenia gniotu w przepustach "koło - kwadrat". Przekroczenie dopuszczalnego gniotu prowadzi bowiem do powstawania wypływow (rys. 4.14), które są w następnych przepustach zakuwane. Warunek ten można ująć zależnością:

$$\Delta d_{\max} = d_{n-1} - \sqrt{d_{n-1}^2 - B^2} \quad (4.27)$$

gdzie B - rzeczywista szerokość powierzchni kalibrującej kowadła.

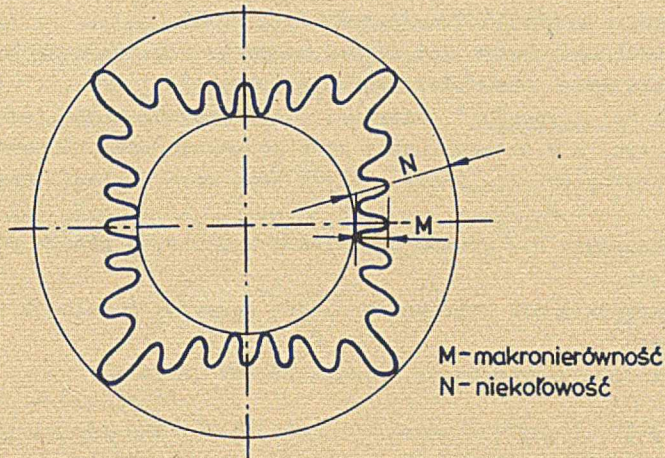
Maksymalny gniot jest w przepuście "koło - kwadrat" ograniczony ponadto granicznym zwarcie kowadeł

$$\Delta d_{\max} = d_{n-1} - B - \sqrt{2} \delta \quad (4.28)$$

gdzie:

δ - szerokość szczelin między przyległymi kowadłami.

Zależność pomiędzy maksymalnym gniotem w przepuście "koło - kwadrat" a średnicą przed przepustem i szerokością kowadła i szczeliną między kowadłem przedstawiono na rys. 4.15.



Rys. 4.16. Charakterystyczne cechy geometryczne pręta o przekroju kołowym odkutego w kowarce uwidocznione na wykresie odchyłeń zarysu rzeczywistego od idealnego koła

4.2. Teoretyczna analiza wpływu warunków kucia na cechy geometryczne wyrobów

Cechy geometryczne prętów kutych w kowarkach

Pełna ocena cech geometrycznych wyrobu wymaga podania kształtu i wymiarów bryły idealnej, którą ma wyrób stanowić oraz odstępstw od tego zarysu, tzn. błędów kształtu, odchyłek wymiarowych i charakterystyki rzeczywistej powierzchni wyrobu. Odstępstwa od bryły idealnej są funkcją technologii wykonania i można ją ująć w następujących parametrach:

- krzywizna pręta,
- błąd kształtu przekroju,
- odchyłki wymiarowe,
- makro- i mikronierówności powierzchni.

Ponieważ takie cechy, jak: krzywizna i makronierówności powierzchni oraz mechanizmy ich powstawania nie różnią się jakościowo w sposób istotny od występujących w konwencjonalnie odkutych prętach, w dalszych rozważaniach zostaną pominięte. Szczególnie charakterystycznymi cechami geometrycznymi prętów odkutych w kowarkach są błędy kształtu przekroju i makronierówności powierzchni.

Pręt o przekroju kołowym, uzyskany w wyniku specyficznego ruchu śrubowego podawanego materiału oraz kształtu powierzchni roboczej narzędzia, odznacza się charakterystyczną powierzchnią, na której można odróżnić bieżące po linii śrubowej ślady uderzeń.

Dokładna obserwacja zarysu kołowego przekroju pręta pozwala na wyodrębnienie dwóch charakterystycznych wielkości (rys. 4.16) "makronierówności" oraz "niekołowości" (patrz p. 3.4). Prowadząc analizę wpływu parametrów procesu, a w szczególności cech geometrycznych narzędzi, na cechy geometryczne przekroju pręta, celowe jest wyodrębnienie następujących przypadków:

- narzędzia nie wykazujące śladów zużycia, z płaską powierzchnią kalibrującą,
- narzędzia nie wykazujące śladów zużycia, z walcową powierzchnią kalibrującą,
- narzędzia wykazujące wyraźne objawy zużycia.

Matematyczny opis wpływu warunków kucia na cechy geometryczne prętów

Kucie narzędziami z płaską powierzchnią kalibrującą

Efektem takiego sposobu kucia jest uzyskanie przekroju wielokąta foremnego, w którym liczba boków jest wyznaczona zależnością (4.3). Zależność ta jest słuszna w przypadku, gdy przemieszczenie materiału w czasie wykonania pełnego obrotu jest równe długości części kalibrującej kowadła lub

jeżeli ślady uderzeń poszczególnych kowadeł pokrywają się (skok większy od długości kalibrującej kowadła jest niedopuszczalny). W tym przypadku wartość "makronierówności" przekroju, równą różnicy promieni kół opisanego i wpisanego w wielokąt, można wyrazić wzorem:

$$M = 0,0034 d_g \quad (4.29)$$

gdzie d_g - średnica wyrobu gotowego pomiędzy kowadłami.

Niekołowość jest równa makronierówności $N = M$.

Jeżeli materiał przechodzi wielokrotnie przez część kalibrującą kowadła, tzn.:

$$n_g = \frac{l_g}{l_T} = \frac{4 \cdot l_g}{v_n \cdot \pi \cdot d_m} > 1, \quad (4.30)$$

wówczas wartość makronierówności (niekołowość jest jej równa) jest znacznie mniejsza. Można ją wyrazić ogólną zależnością

$$N = M = \frac{d_g}{2} \left(\frac{1}{\pi \cdot v_n \cdot \cos \frac{4 \cdot f_u \cdot l_g}{d_m}} - 1 \right) \quad (4.31)$$

Kucie narzędziami o walcowej powierzchni kalibrującej

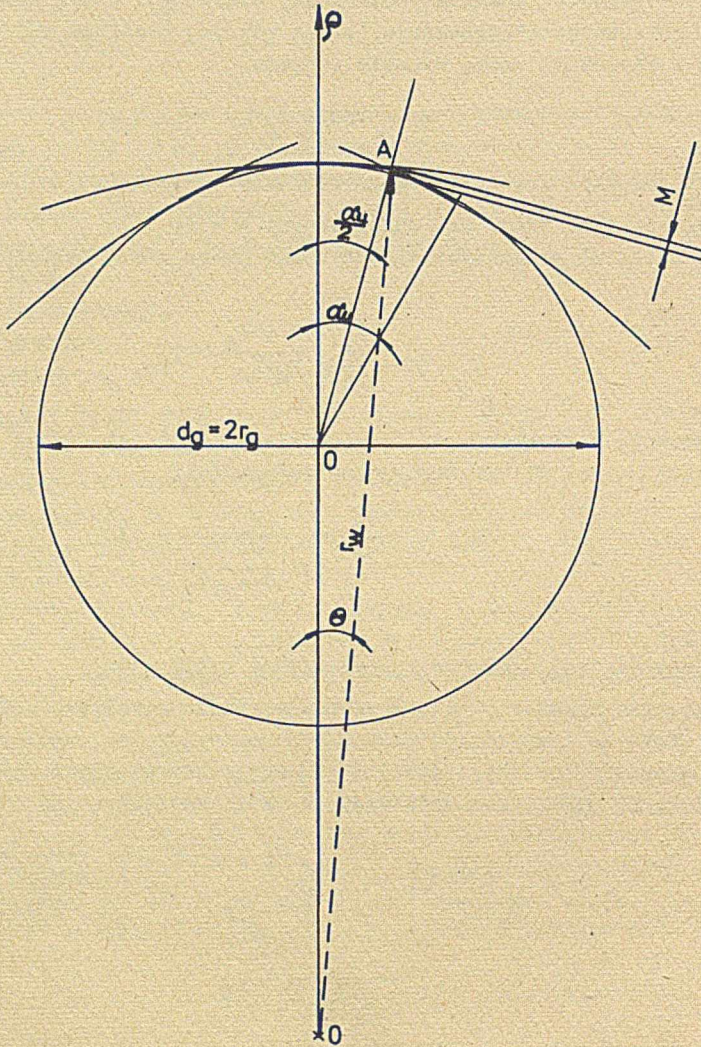
Zastosowanie kowadeł o walcowych powierzchniach kalibrujących pozwala w sposób efektywny zmniejszyć wartość makronierówności. Wykorzystując zależności geometryczne (rys. 4.17) i dokonując odpowiednich przekształceń matematycznych, makronierówność można wyrazić wzorem:

$$M = (r_w - r_g) \cdot \cos \left[- \frac{\pi(T_m \cdot f_u + 1)}{T_m \cdot f_u} \right] - r_g - \sqrt{(r_w - r_g)^2 \cdot \cos^2 \left[- \frac{\pi(T_m \cdot f_u + 1)}{T_m \cdot f_u} \right] + r_g(2r_w - r_g)} \quad (4.32a)$$

gdzie oznaczenia jak na rys. 4.17.

Wzór ten jest słuszny dla ukształtowania powierzchni przez jednokrotne uderzenie kowadła w strefie kalibrującej kowadła. Ogólny wzór do obliczania makronierówności dla dowolnej krotności uderzeń kształtujących powierzchnię materiału przechodzącego przez strefę kalibrującą ma postać:

$$M = (r_w - r_g) \cdot \cos \left[- \frac{\pi(4 \cdot f_u \cdot l_g + v_n)}{4 \cdot f_u \cdot l_g} \right] - r_g - \sqrt{(r_w - r_g)^2 \cdot \cos^2 \left[- \frac{\pi(4 \cdot f_u \cdot l_g + v_n)}{4 \cdot f_u \cdot l_g} \right] + r_g(2r_w - r_g)} \quad (4.32b)$$



Rys. 4.17. Schemat zależności cech geometrycznych kowadła o walcowej powierzchni kalibrującej i przekroju pręta kołowego kętego w kowarce

Należy jednakże pamiętać, że graniczny warunek wygładzenia powierzchni na całej długości pręta wymaga, by spełniona była zależność:

$$\frac{r_m}{4} \cdot v_p \leq l_g \quad (4.33a)$$

a stąd:

$$T_m \leq \frac{4 \cdot l_g}{v_p} \quad (4.33b)$$

Jeżeli spełniony jest powyższy warunek, to niekołowość przekroju odku- tego pręta jest równa makronierówności.

Jeżeli w wyrażeniu (4.32a) wyciągnię się przed wyrażenie promień goto- wego wyrobu, to otrzymamy następującą postać wzoru:

$$M = r_g \left\{ \left(\frac{r_w}{r_g} - 1 \right) \cos \left[- \frac{\mathfrak{K}(T_m \cdot f_u + 1)}{T_m \cdot f_u} \right] - 1 - \right. \\ \left. - \sqrt{\left[\left(\frac{r_w}{r_g} - 1 \right)^2 \cdot \cos^2 \left[- \frac{\mathfrak{K}(T_m \cdot f_u + 1)}{T_m \cdot f_u} \right] + \left(\frac{2r_w}{r_g} - 1 \right)^2} \right\} \quad (4.34)$$

Gdy uwzględnia się w wyrażeniu zależność na stopień przylegania:

$$s = \frac{d_g}{2r_w} = \frac{r_g}{r_w},$$

wzór ten przyjmie postać:

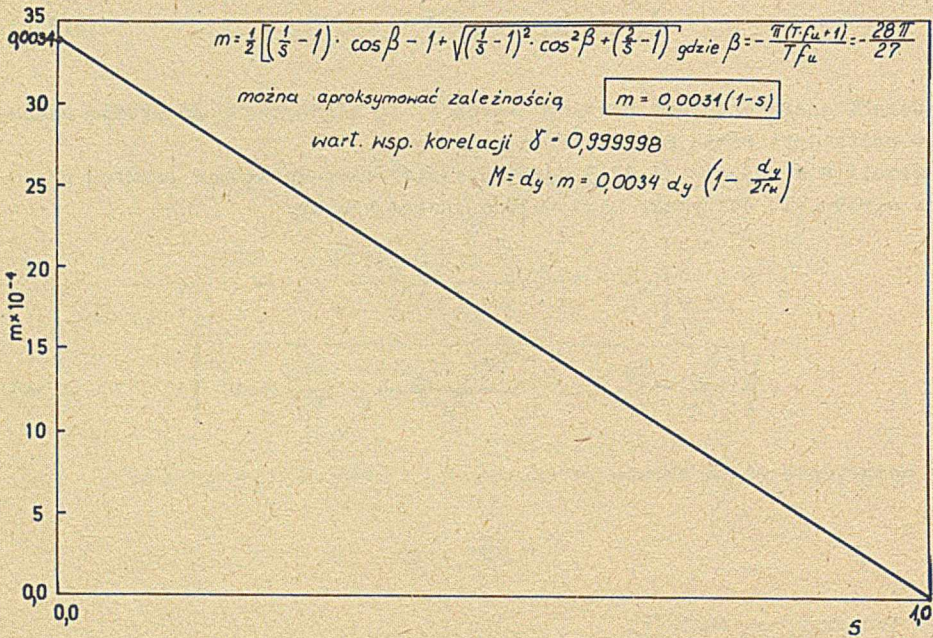
$$M = r_g \left\{ \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \cos \left[- \frac{\mathfrak{K}(T_m \cdot f_u + 1)}{T_m \cdot f_u} \right] - 1 - \right. \\ \left. - \sqrt{\left(\frac{1}{s} - 1 \right)^2 \cdot \cos^2 \left[- \frac{\mathfrak{K}(T_m \cdot f_u + 1)}{T_m \cdot f_u} \right] + \left(\frac{2}{s} - 1 \right)^2} \right\} \quad (4.35)$$

Ponieważ makronierówność, jak widać, zależy liniowo od promienia (śred- nicy) pręta, sporządzenie wykresów zależności (4.35) w postaci $m = f(s)$ dla $m = \frac{M}{d_g}$ i stałych parametrów T_m i f_u pozwoli na uproszczenie oblicze- nia makronierówności dla prętów o dowolnej średnicy. Wartość makronierów- ności dla pręta o średnicy d_g obliczyć można bowiem ze wzoru:

$$M_d = m d_g \quad (4.36)$$

Sporządzony wykres (rys. 4.18) wykazał, że dla zakresu zmienności $0 \leq s \leq 1$ wykres funkcji (4.35) jest zbliżony do prostej. Przeprowadzono próbę aproksymacji linią prostą wyrażoną równaniem:

$$m = 0,0034 (1 - s) \quad (4.37)$$



Rys. 4.18. Wykres względnej makronierowności "m" w funkcji stopnia przylegania "s" dla parametrów kowarki SXL-40

W wyniku sprawdzenia dopasowania funkcji (4.37) dla 20 równomiernie rozmieszczonych w przedziale wartości stopnia przylegania s wartości obl. z funkcji (4.35) uzyskano wartość współczynnika korelacji $r = 0,999998$. Zastosowanie do obliczeń makronierowności wzoru:

$$M = m \cdot d_g = 0,0034 d_g \left(1 - \frac{d_g}{2r_w}\right) \quad (4.38)$$

jest w pełni poprawne i daje pomijalnie mały błąd w stosunku do obliczeń wzoru (4.35) o bardzo złożonej strukturze matematycznej.

Kucie kowadłami o powierzchni wykazującej wyraźne ślady zużycia

Praktycznie po przekuciu pierwszej sztuki materiału powierzchni kowadeł wykazuje ślady zużycia. Prowadzone przez okres dwóch lat obserwacje i pomiary zużycia kowadeł pozwalają na sformułowanie następujących założeń, stanowiących podstawę do matematycznego opisu makronierowności i niekołowości odkutych prętów:

- dla strefy kowadła, na której odbywa się kalibrowanie pręta, tworzące powierzchni w kierunku obwodowym są łukami okręgów o stałym promieniu r_w ,

- w strefie kalibrującej tworzącej powierzchnię roboczą kowadeł w kierunku osi pręta można aproksymować funkcją w postaci:

$$y = a \cdot e^{b x} \quad (4.39)$$

gdzie:

- x - współrzędna w kierunku osi wzdłużnej kowadła,
- y - współrzędna w kierunku prostopadłym do powierzchni kowadła,

- powierzchnia pręta jest ukształtowana w jednym uderzeniu jednego z kowadeł,
- wielkość przesunięcia śladów kolejnych uderzeń jednego kowadła nie ma istotnego wpływu na wielkość "makronierówności" i "niekołowości".

Jeżeli uwzględnić powyższe założenia to wielkość makronierówności można wyrazić wzorem (4.37). Niekołowość przekroju pręta można natomiast opisać wzorem:

$$N = a \cdot e^{b \frac{T_m \cdot v_n}{8}} \quad (4.40)$$

gdzie a, b - parametry funkcji opisującej wzdłużny zarys powierzchni kalibrującej kowadeł.

Występujący we wzorze (4.34) współczynnik "a" fizycznie przedstawia wartości makronierówności:

$$a = M = 0,0034 d_g \left(1 - \frac{d_g}{2r_w}\right)$$

Współczynnik "b" można wyznaczyć jedynie doświadczalnie i jest on funkcją kształtu powierzchni kalibrującej kowadeł. Należy się spodziewać ponadto, że na ostateczny kształt pręta wpływają będą sztywność kowarki oraz odkształcenie zachodzące w otoczeniu powierzchni kontaktu pręta z narzędziem w czasie następnego uderzenia.

Przytoczone rozważania teoretyczne pozwalają określić ekstremalne możliwości w zakresie uzyskiwanych cech geometrycznych wyrobów kutyh w kowarkach. Warunkiem ich osiągnięcia jest oczywiście idealna nastawa kowadeł, symetria układu i sztywność układu. W rzeczywistych warunkach przemysłowych należy się więc spodziewać odchyłań od wartości wyznaczonych z podanych wzorów. Celem eksperymentalnych badań będzie ustalenie, jakiego rzędu są te odchylenia i jak można je ująć we wzorach.

4.3. Podsumowanie

Dokonana w pracy teoretyczna analiza kucia w kowarce pozwoliła ustalić następujące charakterystyczne cechy tego procesu:

- odkształcenie w pojedynczym uderzeniu w zależności od parametrów kucia waha się w przedziale $\varphi_{poj} : 0,002-0,012$. Odstęp czasowy między kolejnymi uderzeniami wynosi (dla kowarki SXL-40) 0,22 sek, a czas trwania nacisku nie przekracza $1/4$ tego odstępu,
- prędkość odkształcenia, whrew pozorom, jest stosunkowo mała i wynosi $\bar{\varphi} = 0,2 - 2,5 \text{ s}^{-1}$, jest więc zbliżona do osiąganey w procesie kucia na prasach hydraulicznych,
- kształt i parametry ogniska odkształcenia można regulować prędkością podawania v_p , sposobem podawania oraz wielkością gniotu w przepuście (wzory (4.5), (4.8) i (4.9)),
- charakterystycznymi błędami kształtu prętów odkutych w kowarce są makronierówność i niekołowość,
- w procesie kucia kalibrującego kowadełkami wykazującymi wyraźne ślady zużycia ostateczne kształtowanie powierzchni jest wynikiem jednokrotnego uderzenia każdego z kowadeł.
- uwzględniając wyniki przeprowadzonej analizy, zależność makronierówności od średnicy odkuwki i cech geometrycznych kowadeł można określić ze wzorów (4.38),
- w oparciu o przesłanki teoretyczne i wyniki dotychczasowych doświadczeń praktycznych niekołowość można wyrazić funkcją ujmującą wpływ cech geometrycznych narzędzi i parametrów kucia w postaci wzoru (4.40).

Opracowane i przedstawione w postaci analitycznej i graficznej zależności funkcyjne między parametrami pracy kowarki, a parametrami procesu odkształcenia pozwalają Jobrać warunki kucia z uwzględnieniem charakterystycznych własności technologicznych materiału.

Przeprowadzone stadium literatury pozwala uzupełnić charakterystykę procesu odkształcenia w kowarce o następujące dalsze jego cechy:

- Osiągana w przepuście wielkość odkształcenia jest około 2-krotnie większa od uzyskiwanej w procesie konwencjonalnym, dochodzi bowiem do $\varphi=0,6$. Tak duże odkształcenie jest możliwe dzięki korzystnym stanom naprężeń wywołanych promieniowym naciskiem i specyficie przebiegu procesu odkształcenia (całkowite odkształcenie w przepuście jest wynikiem nakładania się wielu małych odkształceń nadawanych w pojedynczych uderzeniach).
- Nachylenie powierzchni roboczej kowadła ($\alpha_r = 8^\circ$) pozwala uzyskać w miarę równomierne odkształcenie materiału wzdłuż kotliny odkształcenia, co korzystnie odróżnia ten proces od kucia konwencjonalnymi kowadłami, w prasach i młotach.

5. EKSPERYMENTALNE BADANIA PROCESU KUCIA W KOWARKACH

5.1. Program i metodyka badań

Uwzględniając wyniki studium literatury oraz wyniki teoretycznej analizy procesu kucia w kowarkach, weryfikacja postawionej w pracy tezy wymaga realizacji następujących badań:

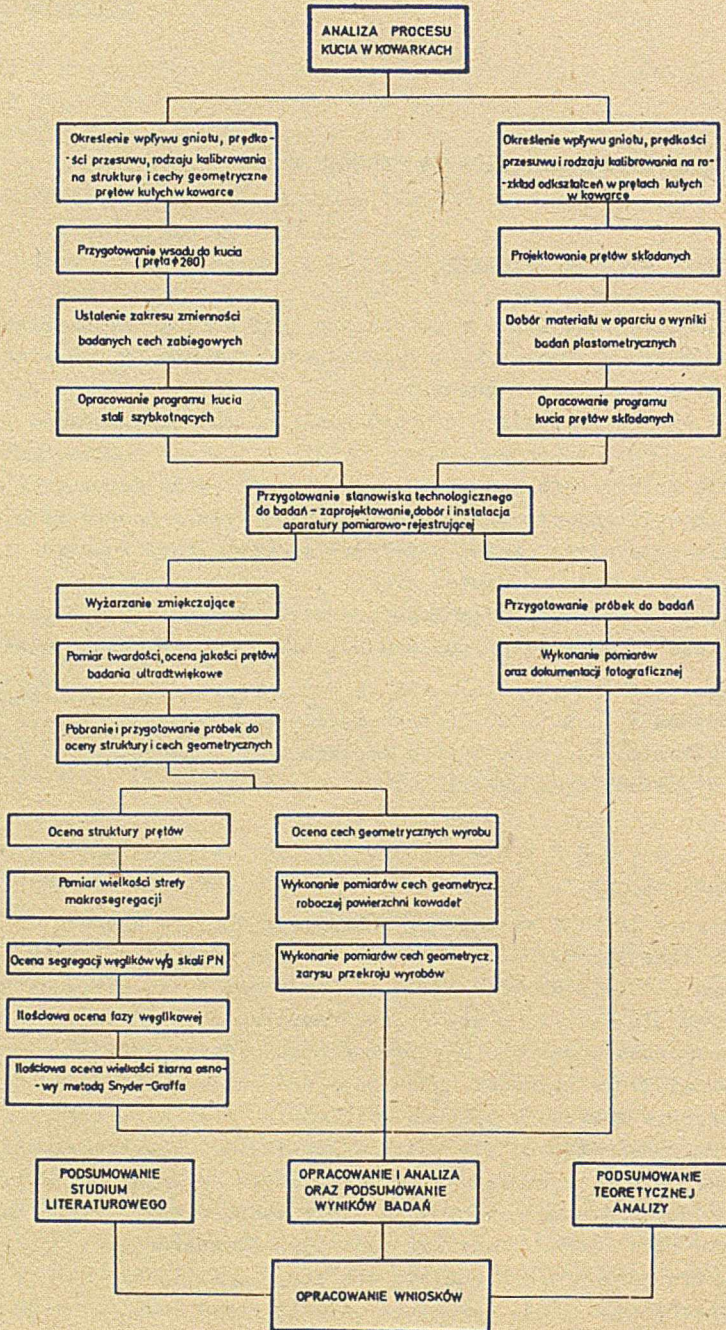
- 1) ustalenia wpływu parametrów procesu kucia na rozkład lokalnych odkształceń,
- 2) określenia wpływu cech geometrycznych narzędzi oraz parametrów kucia w przepuście kalibrującym na makronierówność i niekołowość prętu,
- 3) określenia przy użyciu metod metalografii ilościowej rozkładu lokalnej struktury we wsadzie i odkutym pręcie,
- 4) ustalenia korelacji pomiędzy lokalnym odkształceniem a odpowiadającą mu strukturą z uwzględnieniem lokalnej struktury materiału wsadowego.

Dla wyznaczenia wyszczególnionych zależności przyjęto program badań przedstawiony na rys. 5.1. Opracowano metodykę badań pozwalającą wyznaczyć odkształcenie lokalne w kutyh prętach oraz przeprowadzić ilościową ocenę cech strukturalnych materiału.

Metodyka wyznaczania odkształceń lokalnych w prętach odkutych w kowarce

Odkształcenia lokalne wyznaczono eksperymentalnie w oparciu o wyniki kucia prętów składanych. Materiałem osnowy była stal w gat. "35", a "sworznie" wykonano ze stali H25T. Dobór materiałów oparto na wynikach prób plastometrycznych (tabl. 5.1) - aby spełnić warunek zbliżonych wartości naprężeń uplastyczniających obu materiałów oraz wyraźne zróżnicowanie materiałów pod względem odporności na działanie środków trawiących.

Rozmieszczenie sworzni w prętach uwzględnia (rys. 5.2) symetrię odkształceń charakterystyczną dla kucia w kowarce 4-kowadełkowej. Obliczenia całkowitego lokalnego odkształcenia w przepuście dokonano, stosując metody sumowania numerycznego i przyjmując jako miarę odkształcenia zastępcze odkształcenie rzeczywiste. Ponieważ przebieg odkształcenia w kotlinie odkształcenia nie jest proporcjonalny, tym samym analityczne metody nie mogą zostać zastosowane [66]. Całkowite odkształcenie lokalne w przepuście obliczono jako sumę odkształceń lokalnych zachodzących w trakcie przejścia materiału pomiędzy wybranymi przekrojami leżącymi wzdłuż kotliny odkształcenia.



Rys. 5.1. Program badań eksperymentalnych

Tablica 5.1

Własności materiałów zastosowanych w składanych prętach

Lp.	Oznaczenie próbek	Temperatura (K)	Napężenie uplastyczniające przy gniocie		
			(MPa)		
			10%	20%	30%
1	1 - H25T	1173	52,1	55,2	56,6
2	1 - 35	1173	59,1	52,0	68,1
3	2 - H25T	1273	44,4	50,9	50,5
4	2 - 35	1273	49,0	61,2	66,4

$$\varphi_p^r = \sum_{i=1}^n \varphi_{pi}^r$$

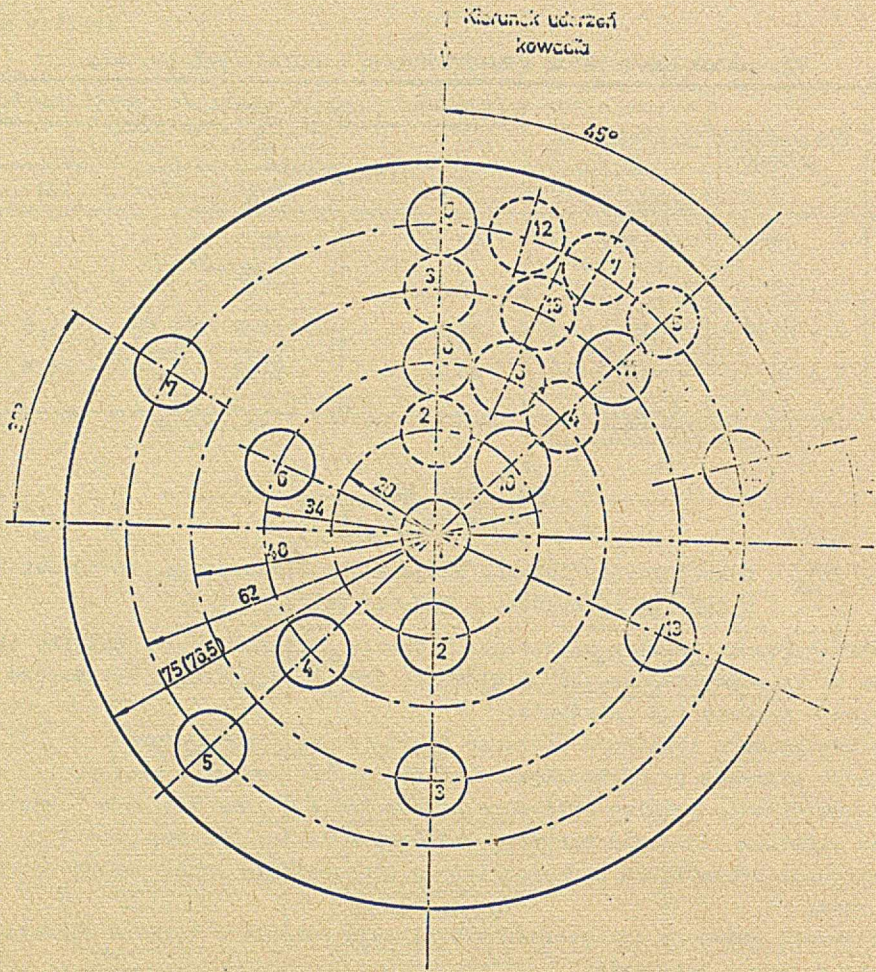
gdzie φ_{pi}^r - odkształcenie lokalne miejsca odpowiadającego sworzniowi "r" w "p"-tym przepuszczeniu i "i"-tej płaszczyźnie.

Odształcenie lokalne zachodzące w czasie przejścia przez kotlinę obliczono ze składowych odkształceń głównych (rys. 5.3), które wyznaczono w oparciu o następujące założenia:

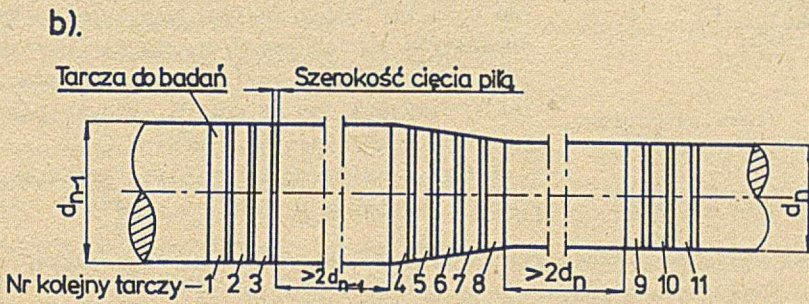
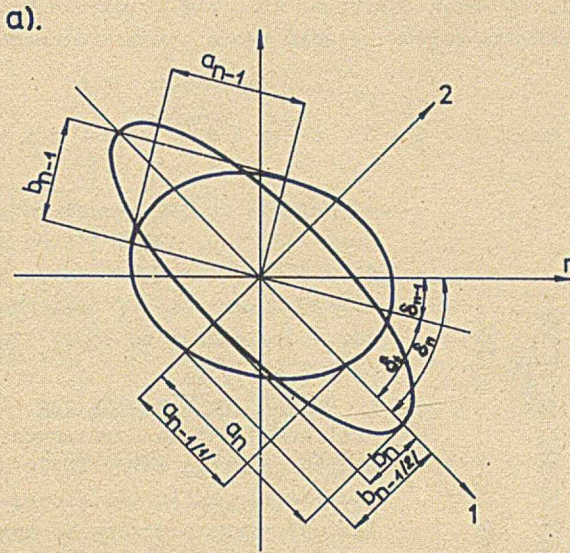
- 1) odkształcenie lokalne w obszarze sworznia jest jednorodne,
- 2) zarys sworznia po odkształceniu można opisać równaniem elipsy,
- 3) odkształcenie lokalne obliczone na podstawie zmiany wymiarów i kształtu sworznia odpowiada punktowi leżącemu w środku elipsy,
- 4) kierunki odkształceń głównych leżą w płaszczyźnie prostopadłej do osi pręta,
- 5) kierunki głównych odkształceń nie ulegają zmianie w trakcie odkształcenia w jednym uderzeniu.

Warunki 2 i 4 zostały eksperymentalnie sprawdzone. Wyniki badań sprawdzających pozwoliły stwierdzić, że odstępstwa od założeń nie przekraczały odpowiadających dokładnościom pomiarów (0,001 mm - wielkości liniowe, 10' - wartości kątowe). Kierunki główne odkształceń wyznaczono metodą numeryczną z warunku ekstremalnej wartości składowych odkształceń. Obliczeń dokonano z krokiem 10'. Dla tak wyznaczonych kierunków obliczono wartości średnie odpowiadające danemu kierunkowi i odpowiednie odkształcenia logarytmiczne.

W przypadku przepustów materiału odbywających się przy podawaniu ruchem posuwistym położenie płaszczyzn w kotlinie zdeterminowane było przemieszczaniem materiału pomiędzy kolejnymi uderzeniami w kotlinie odkształcenia (rys. 5.3).



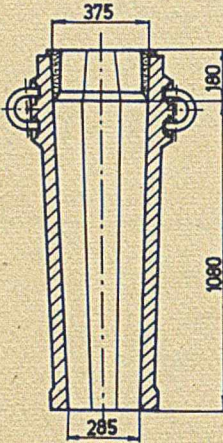
Rys. 5.2. Rozmieszczenie sworzni w prętach składanych



Rys. 5.3. Rozmieszczenie tarcz pobranych do oceny lokalnych odkształceń wzdłuż kotliny odkształcenia

W przypadku przepustów odbywających się przy podawaniu ruchem złożonym powierzchnie cięcia tarcz dobierano tak, aby położenie sworzni odpowiadało kolejnym przemieszczeniom będącym następstwem złożonego ruchu podawanego materiału.

Metodyka badań prętów ze stali SKC, SW18 i OH18N9T



Rys. 5.4. Wlewnica wlewna Q 900 z wkładką izolacyjną

Badania objęły strukturę prętów o średnicach 280, 160, 130 i 115 mm ze stali SKC, odkutych z wlewna Q 900 (rys. 5.4) na kowalce SXL-40, oraz pomiary cech geometrycznych prętów o średnicach od 35 do 120 mm ze stali SW18 i OH18N9T.

Badania metalograficzne objęły ocenę fazy węglkowej metodą porównawczą w oparciu o wzorce polskiej normy PN-74/H-93012 oraz metodą metalografii ilościowej. Ocenę fazy węglkowej przeprowadzono na materiale wyżarzonym zmiękczająco, zgodnie z przebiegiem przedstawionym na rys. 5.5. Ilościowa ocena fazy węglkowej objęła określenie wielkości węglików oraz wielkości skupisk węglików. Dobór wskaźników do jej oceny oparto na wynikach prac [28, 31, 67 - 69]. Do oceny skupisk węglików przyjęto dwa wskaźniki, które łącznie wyrażają segregację węglików:

- średnią powierzchnię skupiska węglików, \bar{S} ,
- współczynnik zmienności wielkości skupisk w próbce *) $v = \frac{s(\bar{S})}{\bar{S}}$.

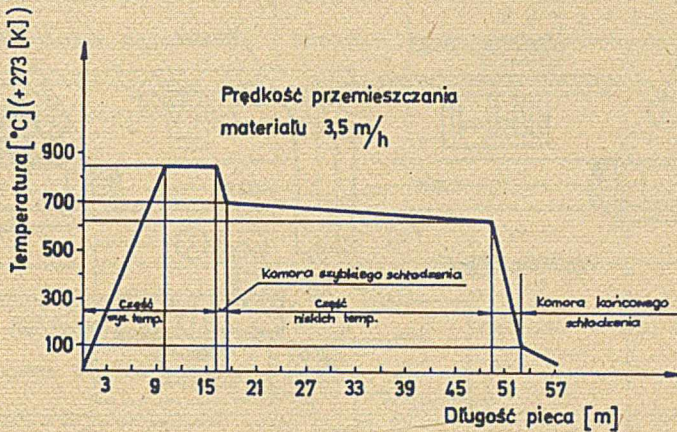
Również wielkość pojedynczych węglików oceniano dwoma wskaźnikami:

- średnia powierzchnia płaskiego przekroju węglików, \bar{S}_1
- współczynnik zmienności wielkości pojedynczych węglików w próbce *) , $v_1 = \frac{s(\bar{S}_1)}{\bar{S}_1}$.

Badania ilościowych fazy węglkowej dokonano za pomocą telewizyjnego analizatora obrazu "Quantimet" 720. Do oceny skupisk węglików zastosowano obiektyw EPI 12,5 x 0,85, a do oceny wielkości pojedynczych węglików obiektyw EPI 32 x 0,55. Dla każdego obszaru analizy badano strukturę w 10 po-

*) Współczynnik zmienności w próbce (v) jest obliczony ze stosunku odchylenia standardowego w próbce (s) do wartości średniej w próbce (\bar{x}),

$$v = \frac{s}{\bar{x}}$$



Rys. 5.5. Przebieg temperatury w piecu przelotowym dla zabiegu wyżarzania zmiękczającego

lach. Pole analizy dla każdego obszaru wynosiło - dla oceny wielkości węglików $25\ 598\ \mu\text{m}^2$, a dla oceny wielkości skupisk węglików $985\ 68000\ \mu\text{m}^2$. Liczba punktów obrazowych na monitorze wynosi 500 000.

Oceny "niekołowości" oraz "makronierówności" dokonano specjalnym profilografem biegunowym typu "Tayrand" model S1. Wielkość powiększenia dobierano w zależności od próbki, starając się każdorazowo wykorzystać cały zakres wychylenia pisaka. Wartości dobranych powiększeń zaznaczono na wykresach obrysu przekroju.

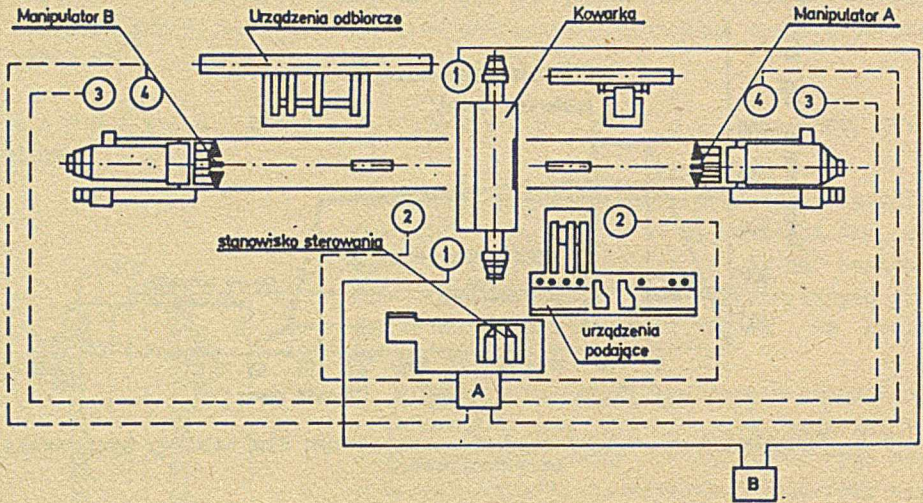
Zamieszczone w pracy wyniki obliczeń i wykresy wykonano na elektronicznym kalkulatorze HEWLETT - PACKARD - HP-9810 A wyposażonym w plotter - HP-9862. Do opracowania wyników badań i testów statystycznych wykorzystano programy standardowe kalkulatora. Wszystkie oceny statystyczne prowadzono, przyjmując poziom istotności 0,05.

Dalsze niezbędne informacje w zakresie metodyki badań przedstawiono w opisie poszczególnych badań, a także w opisie tablic i rysunków.

5.2. Charakterystyka stanowiska technologicznego i materiałów użytych w badaniach

C h a r a k t e r y s t y k a s t a n o w i s k a t e c h n o l o g i c z n e g o

Proces kucia prowadzono w kowarkach SXL-16 oraz SXL-40 (rys.5.6), których standardowe wyposażenie pomiarowe stanowią wskaźniki nastawy rozwarzcia kowadeł oraz mocy silników głównych. Dla zrealizowania przyjętego programu badań zainstalowano dodatkowo przyrządy kontrolno-pomiarowe i re-



Rys. 5.6. Rozmieszczenie elementów kowarki SXL-40 oraz aparatury pomiarowo-rejestrującej:

A - rejestrator 6- kanałowy, B - rejestrator 2 kanałowy, 1 - miernik mocy silników głównych, 2 - miernik temperatury, 3, 4 - odpowiednio mierniki drogi i prędkości

jestrujące, wyposażając kowarkę w impulsowe mierniki drogi i prędkości posuwu obydwu manipulatorów oraz pirometry całkowitego promieniowania, umieszczone w bezpośredniej bliskości strefy kucia po obydwu jej stronach (rys. 5.6). Rejestrację wymienionych wielkości prowadzono na rejestratorze sześciokanałowym. Rejestrację mocy pobieranej przez silnik napędu głównego prowadzono na odrębnym rejestratorze, w którym posuw taśmy był zsynchronizowany z prędkością posuwu taśmy rejestratora sześciokanałowego. Zakres zmienności parametrów kucia był ograniczony parametrami technicznymi kowarek (tabl. 5.2) i warunkami geometrycznymi stosowanych kowadeł (rys. 4.2).

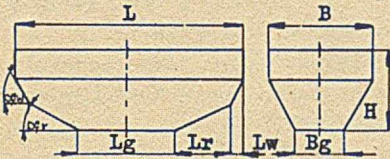
C h a r a k t e r y s t y k a u ż y t y c h m a t e r i a ł ó w

Do badań wpływu parametrów procesu kucia w kowarkach na strukturę przyjęto stal SKC. Czynnikiem, które zadecydowały o tym wyborze, były mała odkształcalność tych stali, duży średni nacisk jednostkowy oraz sprawdzona możliwość opisanie struktury przy użyciu metod metalografii ilościowej. Ponieważ stal SKC uważana jest powszechnie za "trudno odkształcalną", dodatkowym efektem praktycznym było stwierdzenie technologicznych możliwości procesu "kowarkowego" w zakresie przeróbki plastycznej stali i stopów trudno odkształcalnych.

Tablica 5.2

Parametry techniczne kowarki SXL-40 i SXL-16

Wyszczególnienie parametrów	Oznaczn.	K o w a r k a				
		SXL-40		SXL-16		
Zakres wymiarów poprzecznych wsadu i prętów: (mm)	max wsad	d_{max}	400	160		
	min pręt	d_{min}	80	30		
Szybkość posuwu manipulatorów - robocza (mm/sek)	v_{pr}		10-100	10-100		
	- transportowa (mm/sek)	v_{pt}	340	370		
Częstość uderzeń jednego bijaka min^{-1}	f_u		270	580		
Czas obrotu głowicy manipulatora (sek) - (wielkość ta nie jest określona przez producenta kowarek)	T_m		6	2.7		
Parametry stosowanych kowadeł	Wielk. charakt.	Wartość liczbowa				
	Typ kowadeł	110	65	50	35	20
	α_r [grad]	8	8	8	8	8
	α_w [grad]	12	12	12	12	12
	Bg [mm]	104	58	46	31	21
	H [mm]	175,5	198	105	112,5	117,5
	Lg [mm]	140	140	76	76	76
	Lr [mm]	135	135	122,6	122,5	122,5
	Lw [mm]	70	70	40	40	40
	L [mm]	550	550	325	325	325



Tablica 5.3

Skład chemiczny zastosowanej w badaniach stali SKC

Gatunek materiału	Zawartość składnika, %													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	W	Mo	Co	O ₂	N ₂	V	Fe
SKC	1,12	0,29	0,32	0,02	0,007	4,13	0,22	11,26	0,53	4,86	0,033	0,031	2,51	reszta

Materiał wsadowy do kucia stanowiły wlewki Q 900 (rys. 5.4) pochodzące z dwóch różnych wytopów. Skład chemiczny materiałów został przedstawiony w tabl. 5.3. Wlewki do kucia nagrzewano dwustopniowo w piecach obrotowych, stanowiących wyposażenie kowarki SXL-40, zgodnie z technologią stosowaną w Hucie "Batory". Przed przekazaniem do kucia wlewk podlegał dokładnym oględzinom powierzchni oraz badaniom ultradźwiękowym. Wszystkie przeznaczone do prób wlewki odpowiadały wymaganiom stawianym wsadom do kucia w kowarkach.

Badania wpływu parametrów kucia oraz cech geometrycznych kowadeł na cechy geometryczne wyrobów przeprowadzono na prętach ze stali OH18N9T oraz SW18. Materiały te są typowymi przedstawicielami stali przerabianych plastycznie w kowarkach.

5.3. Wyniki badań

5.3.1. Rozkład odkształceń w prętach odkutych w kowarce

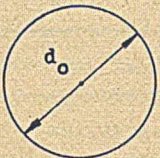
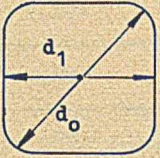
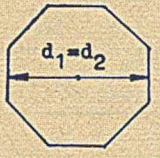
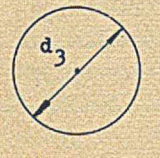
Ustalając szczegółowy program badań rozkładu odkształceń w prętach odkutych w kowarce, uwzględniono niektóre wyniki i wnioski pracy [28]. W szczególności przyjęto dokonane w niej ustalenie, że odkształcenia będące wynikiem ewentualnego skręcania prętów w procesie kucia są pomijalnie małe ($\varphi_0 \leq 0,07\%$) oraz że zachowana jest równoległość przekroju pręta w procesie kucia. Zastosowano jednak inną metodykę (p. 5.2) wyznaczania odkształceń, gdyż dokonane w pracy [28] założenie, że odkształcenie lokalne w czasie przejścia (elementarnej wyodrębnionej objętości) przez kotlinę odkształcenia ma charakter monotoniczny, jest nie do przyjęcia.

Ustalając program kucia prętów modelowych starano się w jak najszerszym stopniu objąć, możliwe do zastosowania w procesie kucia produkcyjnego, sposoby i zakresy zmienności parametrów kucia. Jednocześnie, uwzględniając dużą pracochłonność i koszty wykonania składanych prętów, starano się tak zaprojektować przebieg procesu kucia (tabl. 5.4), aby uzyskać z jednego pręta możliwie największą liczbę danych o wpływie parametrów kucia na rozkład odkształcenia. W badaniach przyjęto trzy poziomy wartości gniotu (mały - 10 mm, średni - 20 mm, duży - 40 mm) oraz dwie prędkości podawania (małą - 50/25 i dużą - 100/50). Przyjęte wartości prędkości podawania i gniotu obejmują cały zakres zmienności stosowany w procesie wstępnego przerobu w kowarce SXL-40. Miejsca pobrania tarcz prętów ze sworzniami ustalono, uwzględniając oddziaływanie swobodnych końców (rys. 5.3). Przygotowanie próbek do badań polegało na przeszlifowaniu czołowej powierzchni tarcz, a następnie jej wytrawianiu w celu wyraźnego ujawnienia zarysu sworzni. Trawienie prowadzono w 50% wodnym roztworze kwasu solnego o temperaturze 60°C.

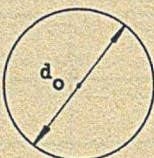
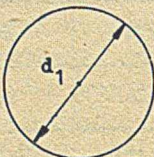
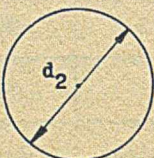
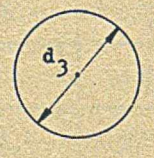
Pomiary wymiarów sworzni prowadzono na mikroskopie warsztatowym MWD zapewniającym dokładność pomiarów liniowych 0,001 mm oraz kątowych 10'.

Tablica 5.4a

Przebieg procesu kucia prętów składanych

Schemat przebiegu kucia	Parametry kucia prętów			
	pręt parametr	"A"	"B"	"C"
	d_0 , mm	152,7	153,4	153,4
	Δd , mm	-	-	-
	v_p , mm/s	-	-	-
	φ_p	-	-	-
	d_1	143,5	130,2	113,2
	Δd	9,2	23,2	30,2
	v_p	50	50	50
	φ_p	0,036	0,148	0,369
	d_2	143,5	130,2	113,2
	Δd	9,2	23,2	30,2
	v_p	50	51	50
	φ_p	0,036	0,125	0,180
	d_3	108,6	112,7	107,8
	Δd	34,9	17,5	5,4
	v_p	51	49	50
	φ_p	0,610	0,336	0,151

Przebieg procesu kucia prętów składanych

Schemat przebiegu kucia	Parametry kucia prętów		
	pręt parametr	"D"	"E"
1	2	3	4
	d_0 , mm	207	202
	Δd , mm	-	-
	v_p , mm/s		
	φ_p	-	-
	d_1	187,3	178,3
	Δd	13,7	23,7
	v_p	50	25
	φ_p	0,141	0,250
	d_2	156,2	144,9
	Δd	31,1	33,4
	v_p	50	25
	φ_p	0,363	0,415
	d_3	117,1	112,2
	Δd	39,1	32,7
	v_p	50	25
	φ_p	0,576	0,511

Wyniki wstępnych badań [30] wykazały, że zmiana prędkości podawania w przejściu "koło - kwadrat" nie wywiera istotnego wpływu na rozkład odkształcenia w przekroju pręta. W zasadniczych badaniach dla tego sposobu kalibrowania stosowano więc tylko jedną prędkość podawania, tzn. 50 mm/s. Dla kalibrowania "koło - koło" stosowano prędkości 25 i 50 mm/s. Wyniki badań zasadniczych zestawiono w tabelicy 5.5. Stosując do aproksymacji użytych wyników funkcję:

$$\varphi_1 = a_0 + a_1 r + a_2 \theta + a_3 r^2 + a_4 \theta^2 + a_5 r^3 + a_6 \theta^3 + a_7 r \theta \quad (5.1)$$

wyznaczano wartości współczynników a_0 do a_7 . Aproksymacji dokonano, posługując się metodą macierzy informacji Fischera [72].

W tabelicy 5.6 zestawiono uzyskane wartości współczynników oraz oceny korelacji wyników badań funkcji (5.1). W zależności (5.1) r - wyrażono względną wartością promienia

$$r = \frac{R}{R_z} \quad (5.2)$$

gdzie:

R - promień środka sworznia,

R_z - odległość punktu przecięcia zewnętrznego zarysu pręta z linią przechodzącą przez środek sworznia.

Na rys. 5.7 do 5.11 przedstawiono rozkład odkształceń w przekroju kutech prętów po poszczególnych przepustach.

Rozkład odkształceń w prętach odkutych z zastosowaniem kalibrowania "koło-koło" przedstawiono w układzie współrzędnych φ_1 , r (rys. 5.10 i 5.11), ponieważ wpływ kąta θ jest pomijalnie mały.

5.3.2. Cechy geometryczne odkutych w kowarce prętów

W badaniach wpływu parametrów procesu kucia i cech geometrycznych narzędzi na cechy geometryczne wyrobów uwzględniono następujące czynniki: gniot w przepuście, prędkość wyjścia i stopień przylegania. Ustalono program badań (tabl. 5.7) pozwalający uchwycić ponadto wpływ procesu zużywania się narzędzi, a tym samym naturalnej zmiany cech geometrycznych fragmentu kowadeł kształtujących ostateczną powierzchnię odkuwki w przepuście kalibrującym. Zużywanie się narzędzi ma bezpośredni wpływ na wielkość stopnia przylegania oraz zarys wzdłużnej tworzącej części kalibrującej kowadła. Zarys tworzącej decyduje o wielkości niekołowości przekroju pręta. Jest to więc dodatkowy czynnik mający wpływ na cechy geometryczne wyrobu.

Wyniki badania wpływu gniotu i prędkości na niekołowość i makronierówność przekroju prętów o średnicy 120 mm przedstawiono na rys. 5.12. Dla prętów o średnicy 40 mm i 80 mm dokonano ponadto porównania wpływu stopnia przylegania na te cechy geometryczne (rys. 5.12 i 5.14). Na rysunkach

Odkształcenia lokalne w przekroju prętów po różnych wariantach kucia

Lp.	Parametry kucia	Numer wzorzenia (rys-5.2)	Współrzędne punktu oceny		Odkształcenie lokalne			Odkszta. max współrzędne $\frac{r_{max}}{r} \frac{\theta_{max}}{\theta}$	Współczynnik niejedn. odkształc. $n = \frac{v_{max}}{v_p}$
			r	θ [grad]	obl. dla wzorzenia	obl. ze wzoru (5.1) dla r, θ	obl. ze wzoru (5.1) dla r_0, θ_0		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Kalibrowanie "koło-kwadrat" $\sigma_p = 0,036$ $\bar{v}_p = 50 \text{ mm/s}$	1	1	0,00	0,0	0,034	0,034	0,034	dla kol. 7	dla kol. 7
	2	2	0,28	8,0	0,036	0,041	0,035	$\frac{0,108}{0,73; 5,5^\circ}$	n = 3,00
	3	3	0,60	4,0	0,111	0,096	0,096		
	4	4	0,44	40,0	0,045	0,044	0,044		
	5	5	0,80	39,0	0,043	0,037	0,039	dla kol. 8 $\frac{0,104}{0,77; 0^\circ}$	n = 2,89
	6	6	0,24	18,0	0,050	0,042	0,050		
	7	7	0,80	30,0	0,049	0,057	0,053		
	8	8	0,42	2,0	0,059	0,057	0,065		
	9	9	0,78	4,0	0,104	0,107	0,102		
	10	10	0,22	43,0	0,039	0,040	0,038		
	11	11	0,62	41,0	0,049	0,053	0,055		
	12	12	0,84	22,0	0,071	0,070	0,079		
	13	13	0,62	18,0	0,095	0,097	0,080		
2. Kalibrowanie: "koło-kwadrat" $\sigma_p = 0,148$ $\bar{v}_p = 50 \text{ mm/s}$	1	1	0,00	0,0	0,153	0,151	0,152	dla kol. 6 $\frac{0,273}{0,69; 34^\circ}$	n = 1,84
	2	2	0,24	0,0	0,151	0,159	0,153		
	3	3	0,54	0,0	0,250	0,220	0,243		
	4	4	0,44	45,0	0,211	0,201	0,196		
	5	5	0,84	45,0	0,232	0,221	0,227	dla kol. 7 $\frac{0,268}{0,72; 31,5^\circ}$	n = 1,81
	6	6	0,42	24,0	0,208	0,212	0,213		
	7	7	0,80	31,0	0,257	0,259	0,254		
	8	8	0,40	0,0	0,202	0,198	0,200		
	9	9	0,68	0,0	0,230	0,243	0,237		
	10	10	0,24	45,0	0,150	0,150	0,152		
	11	11	0,62	45,0	0,219	0,238	0,236		
	12	12	0,72	20,0	0,240	0,246	0,238		
	13	13	0,56	23,0	0,259	0,242	0,255		
3. Kalibrowanie: "koło-kwadrat" $\sigma_p = 0,369$ $\bar{v}_p = 50 \text{ mm/s}$	1	1	0,00	0,0	0,367	0,364	0,368	dla kol. 6 $\frac{0,970}{1,0; 45^\circ}$	n = 2,63
	2	2	0,22	0,0	0,372	0,388	0,383		
	3	3	0,48	0,0	0,440	0,418	0,419		
	4	4	0,40	45,0	0,402	0,415	0,428		
	5	5	0,80	45,0	0,704	0,677	0,655	dla kol. 6 $\frac{0,743}{1,0; 45^\circ}$	n = 2,01
	6	6	0,38	19,0	0,399	0,399	0,391		
	7	7	0,74	33,0	0,566	0,566	0,584		
	8	8	0,35	0,0	0,403	0,398	0,396		
	9	9	0,60	0,0	0,448	0,456	0,460		
	10	10	0,22	45,0	0,370	0,356	0,353		
	11	11	0,58	45,0	0,491	0,494	0,518		
	12	12	0,64	24,0	0,453	0,489	0,465		
	13	13	0,50	24,0	0,459	0,422	0,448		
4. Kalibrowanie "kwadrat-odmiokąt" $\sigma_p = 0,036$ $\bar{v}_p = 50 \text{ mm/s}$	1	1	0,00	0,0	0,036	0,037	0,037	dla kol. 6 $\frac{0,096}{0,72; 43,5^\circ}$	n = 2,67
	2	2	0,22	2,0	0,040	0,038	0,037		
	3	3	0,62	4,0	0,050	0,051	0,054		
	4	4	0,42	43,0	0,059	0,063	0,067	dla kol. 7 $\frac{0,103}{0,79; 45^\circ}$	n = 2,86
	5	5	0,78	41,0	0,105	0,094	0,102		
	6	6	0,24	25,0	0,050	0,042	0,052		
	7	7	0,84	31,0	0,072	0,076	0,079		
	8	8	0,44	6,0	0,046	0,053	0,048		
	9	9	0,80	8,0	0,044	0,036	0,041		
	10	10	0,28	40,0	0,037	0,039	0,036		
	11	11	0,60	43,0	0,113	0,090	0,094		
	12	12	0,80	20,0	0,050	0,062	0,053		
	13	13	0,62	25,0	0,098	0,082	0,078		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5.	Kalibrowanie "kwadrat-oś- miokąt" $\rho_p = 0,125$ $v_p = 51 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,125	0,125	0,126			
		2	0,24	0,0	0,130	0,128	0,131			
		3	0,62	0,0	0,196	0,211	0,198		dla kol. 6	dla kol. 6
		4	0,40	45,0	0,166	0,176	0,177	$\frac{0,226}{0,62; 35^\circ}$	$n = 1,81$	
		5	0,68	45,0	0,208	0,212	0,211			
		6	0,42	22,5	0,176	0,185	0,190			
		7	0,70	29,0	0,218	0,215	0,214			
		8	0,40	0,0	0,182	0,173	0,170		dla kol. 7	dla kol. 7
		9	0,68	0,0	0,206	0,205	0,204			
		10	0,24	45,0	0,130	0,129	0,124			
		11	0,54	45,0	0,220	0,210	0,220	$\frac{0,231}{0,70; 32,5^\circ}$	$n = 1,85$	
		12	0,70	16,0	0,204	0,203	0,200			
		13	0,58	22,5	0,242	0,217	0,226			
6.	Kalibrowanie "kwadrat-oś- miokąt" $\rho_p = 0,180$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,180	0,178	0,180			
		2	0,22	0,0	0,179	0,188	0,178		dla kol. 6	dla kol. 6
		3	0,48	0,0	0,408	0,373	0,432			
		4	0,35	45,0	0,562	0,512	0,532	$\frac{0,894}{0,62; 41^\circ}$	$n = 4,97$	
		5	0,60	45,0	0,773	0,764	0,781			
		6	0,47	22,5	0,512	0,550	0,492			
		7	0,61	27,0	0,673	0,706	0,700			
		8	0,35	0,0	0,325	0,296	0,330		dla kol. 7	dla kol. 7
		9	0,60	0,0	0,319	0,344	0,303			
		10	0,22	45,0	0,243	0,247	0,249	$\frac{0,822}{0,74; 42^\circ}$	$n = 4,57$	
		11	0,48	45,0	0,792	0,748	0,772			
		12	0,61	18,0	0,479	0,495	0,492			
		13	0,68	22,5	0,677	0,545	0,663			
7.	Kalibrowanie: "ośmiokąt-koło" $\rho_p = 0,151$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,151	0,150			dla kol. 6 i 7	dla kol. 6 i 7
		2	0,27	0,0	0,158	0,161				
		3	0,64	0,0	0,192	0,189				
		4	0,45	45,0	0,178	0,174			dla kol. 6	$n = 1,42$
		5	0,83	45,0	0,197	0,203				
		6	0,45	22,5	0,180	0,177				
		7	0,83	30,0	0,214	0,206				
		8	0,45	0,0	0,178	0,174				
		9	0,83	0,0	0,197	0,202				
		10	0,27	45,0	0,158	0,160				
		11	0,64	45,0	0,192	0,189				
		12	0,83	15,0	0,214	0,206				
		13	0,64	22,5	0,180	0,193				
8.	Kalibrowanie "ośmiokąt-koło" $\rho_p = 0,336$ $v_p = 49 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,333	0,331				
		2	0,27	0,0	0,348	0,355			dla kol. 6	dla kol. 6
		3	0,64	0,0	0,382	0,383				
		4	0,45	45,0	0,366	0,351			dla kol. 6	$n = 2,10$
		5	0,83	45,0	0,485	0,491				
		6	0,45	22,5	0,375	0,369				
		7	0,83	30,0	0,518	0,508				
		8	0,45	0,0	0,360	0,353				
		9	0,83	0,0	0,485	0,489			dla kol. 7	dla kol. 7
		10	0,27	45,0	0,347	0,352				
		11	0,64	45,0	0,382	0,383				
		12	0,83	15,0	0,512	0,503				
		13	0,64	22,5	0,385	0,400				

od. tablicy 5.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
9.	Kalibrowanie "odmiokąt-koło" $\rho_p = 0,610$ $v_p = 51 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,611	0,618	jak w kol. 6	dla kol. 6	dla kol. 6		
		2	0,27	0,0	0,624	0,597		$\frac{0,921}{1,0; 17,5^0}$	$n = 1,51$		
		3	0,64	0,0	0,773	0,764					
		4	0,45	45,0	0,642	0,666					
		5	0,83	45,0	0,849	0,853		dla kol. 7	dla kol. 7		
		6	0,45	22,5	0,639	0,677					
		7	0,83	30,0	0,862	0,867					
		8	0,45	0,0	0,642	0,663					
		9	0,83	0,0	0,849	0,860				jw.	jw.
		10	0,27	45,0	0,624	0,605					
		11	0,64	45,0	0,773	0,762					
		12	0,83	15,0	0,860	0,868					
		13	0,64	22,5	0,810	0,775					
10.	Kalibrowanie "koło-koło" $\rho_p = 0,141$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,121	0,121	jak w kol. 6			dla kol. 6	dla kol. 6
		2	0,27	0,0	0,139	0,138		$\frac{0,152}{1,0; 0,0^0}$	$n = 1,08$		
		3	0,64	0,0	0,141	0,141					
		4	0,45	45,0	0,140	0,141					
		5	0,83	45,0	0,142	0,144		dla kol. 7	dla kol. 7		
		6	0,45	22,5	0,140	0,141					
		7	0,83	30,0	0,144	0,143					
		8	0,45	0,0	0,141	0,141					
		9	0,83	0,0	0,144	0,144				jw.	jw.
		10	0,27	45,0	0,138	0,138					
		11	0,64	45,0	0,141	0,141					
		12	0,33	15,0	0,144	0,144					
		13	0,64	22,5	0,141	0,141					
11.	Kalibrowanie "koło-koło" $\rho_p = 0,363$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,349	0,349	jak w kol. 6			dla kol. 6	dla kol. 6
		2	0,27	0,0	0,355	0,356		$\frac{0,416}{1,0; 0^0}$	$n = 1,15$		
		3	0,64	0,0	0,411	0,410					
		4	0,45	45,0	0,382	0,382					
		5	0,83	45,0	0,425	0,426		dla kol. 7	dla kol. 7		
		6	0,45	22,5	0,382	0,382					
		7	0,83	30,0	0,430	0,426					
		8	0,45	0,0	0,380	0,382					
		9	0,83	0,0	0,425	0,426				jw.	jw.
		10	0,27	45,0	0,360	0,356					
		11	0,64	45,0	0,411	0,410					
		12	0,83	15,0	0,426	0,426					
		13	0,64	22,5	0,411	0,410					
12.	Kalibrowanie: "koło-koło" $\rho_p = 0,576$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,571	0,570	jak w kol. 6			dla kol. 6	dla kol. 6
		2	0,27	0,0	0,580	0,584		$\frac{0,773}{1,0; 22,5^0}$	$n = 1,34$		
		3	0,64	0,0	0,682	0,684					
		4	0,45	45,0	0,631	0,626					
		5	0,83	45,0	0,740	0,739		dla kol. 7	dla kol. 7		
		6	0,45	22,5	0,632	0,628					
		7	0,83	30,0	0,740	0,740					
		8	0,45	0,0	0,632	0,627					
		9	0,83	0,0	0,740	0,739				jw.	jw.
		10	0,27	45,0	0,580	0,583					
		11	0,64	45,0	0,680	0,684					
		12	0,83	15,0	0,740	0,740					
		13	0,64	22,5	0,680	0,685					

cd. tablicy 5.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	Kalibrowanie: "koło-koło" $\rho_p = 0,250$ $v_p = 25 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,233	0,239	jak w kol. 6	dla kol. 6 i 7 $\frac{0,421}{0,80; 0^0}$	dla kol. 6 i 7 $n = 1,68$
		2	0,27	0,0	0,240	0,241			
		3	0,64	0,0	0,396	0,394			
		4	0,45	45,0	0,318	0,316			
		5	0,83	45,0	0,420	0,418			
		6	0,45	22,5	0,320	0,318			
		7	0,83	30,0	0,422	0,422			
		8	0,45	0,0	0,316	0,315			
		9	0,83	0,0	0,418	0,419			
		10	0,27	45,0	0,242	0,243			
		11	0,64	45,0	0,391	0,394			
		12	0,83	15,0	0,420	0,420			
		13	0,64	22,5	0,393	0,397			
14	Kalibrowanie: "koło-koło" $\rho_p = 0,415$ $v_p = 25 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,412	0,412	jak w kol. 6	dla kol. 6 i 7 $\frac{0,606}{0,81; 0^0}$	dla kol. 6 i 7 $n = 1,46$
		2	0,27	0,0	0,411	0,412			
		3	0,64	0,0	0,571	0,570			
		4	0,45	45,0	0,488	0,486			
		5	0,83	45,0	0,600	0,601			
		6	0,45	22,5	0,486	0,486			
		7	0,83	30,0	0,603	0,602			
		8	0,45	0,0	0,487	0,486			
		9	0,83	0,0	0,604	0,605			
		10	0,27	45,0	0,412	0,413			
		11	0,64	45,0	0,566	0,568			
		12	0,83	15,0	0,606	0,605			
		13	0,64	22,5	0,568	0,569			
15	Kalibrowanie: "koło - koło" $\rho_p = 0,511$ $v_p = 25 \text{ mm/s}$	1	0,00	0,0	0,498	0,498	jak w kol. 6	dla kol. 6 i 7 $\frac{0,798}{0,82; 0^0}$	dla kol. 6 i 7 $n = 1,54$
		2	0,27	0,0	0,496	0,496			
		3	0,64	0,0	0,742	0,743			
		4	0,45	45,0	0,611	0,613			
		5	0,83	45,0	0,797	0,796			
		6	0,45	22,5	0,612	0,610			
		7	0,83	30,0	0,796	0,798			
		8	0,45	0,0	0,612	0,612			
		9	0,83	0,0	0,800	0,798			
		10	0,27	45,0	0,498	0,498			
		11	0,64	45,0	0,744	0,742			
		12	0,83	15,0	0,790	0,792			
		13	0,64	22,5	0,740	0,740			

x) Uwaga: Współrzędne odpowiadające położeniu punktów w przecie wsadowym (jak na rys. 5.2)

Tablica 5.6

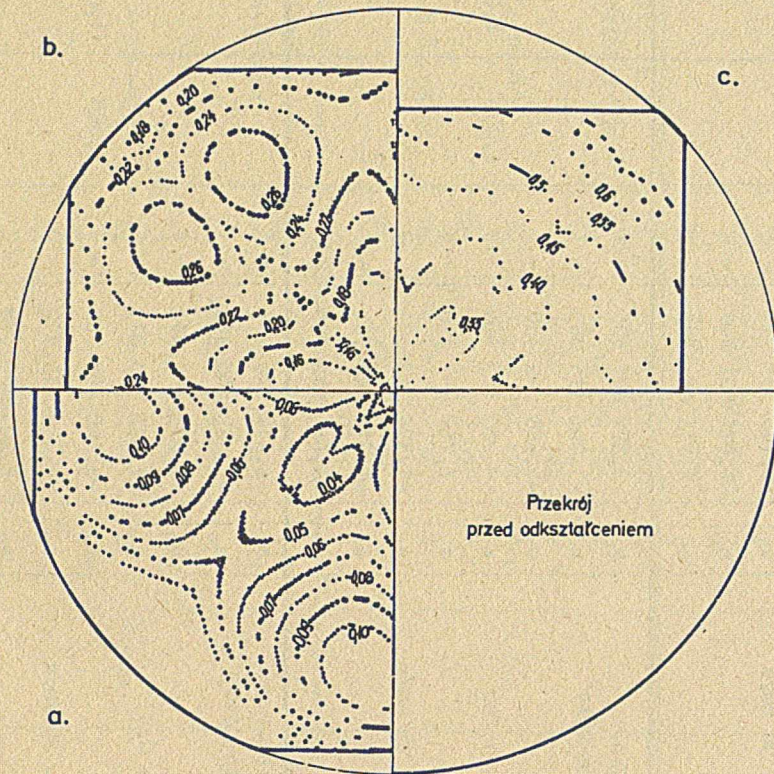
Wartości współczynników i statystyk do wzoru (5.1)

Lp.	Parametry kucia	Wartość współczynników we wzorze (5.1)			Oszacowanie statyst.	
		Współczynnik	Wartość $A \times 10^n$		Współcz. korelacji	Kątowy współczynnik do pasf
			A	n		
1	2	3	4	5	6	7
1	Kalibr.: "koło-kwadr." $\varphi_p = 0,036$ $v_p = 50\text{mm/s}$	a_0	3,404 889 937	- 1	0,980	0,994
		a_1	-3,000 933 254	- 1		
		a_2	4,186 611 033	- 3		
		a_3	1,185 091 958	- 1		
		a_4	-1,375 624 260	- 4		
		a_5	-8,783 956 325	- 1		
		a_6	1,692 883 413	- 6		
		a_7	-3,864 744 817	- 3		
2	Kalibr.: "koło-kwadr." $\varphi_p = 0,148$ $v_p = 50\text{mm/s}$	a_0	1,512 425 752	- 1	0,954	0,993
		a_1	-1,838 163 562	- 1		
		a_2	-4,415 401 486	- 3		
		a_3	1,125 640 003	0		
		a_4	3,170 612 473	- 4		
		a_5	-9,668 767 659	- 1		
		a_6	-5,012 141 191	- 6		
		a_7	4,445 120 140	- 4		
3	Kalibr.: "koło-kwadr." $\varphi_p = 0,369$ $v_p = 50\text{mm/s}$	a_0	4,640 098 123	- 2	0,975	0,968
		a_1	2,062 438 384	- 1		
		a_2	1,748 015 679	- 3		
		a_3	-6,253 745 596	0		
		a_4	-2,677 567 643	- 4		
		a_5	8,988 335 732	- 1		
		a_6	4,361 900 381	- 6		
		a_7	4,273 604 618	- 9		

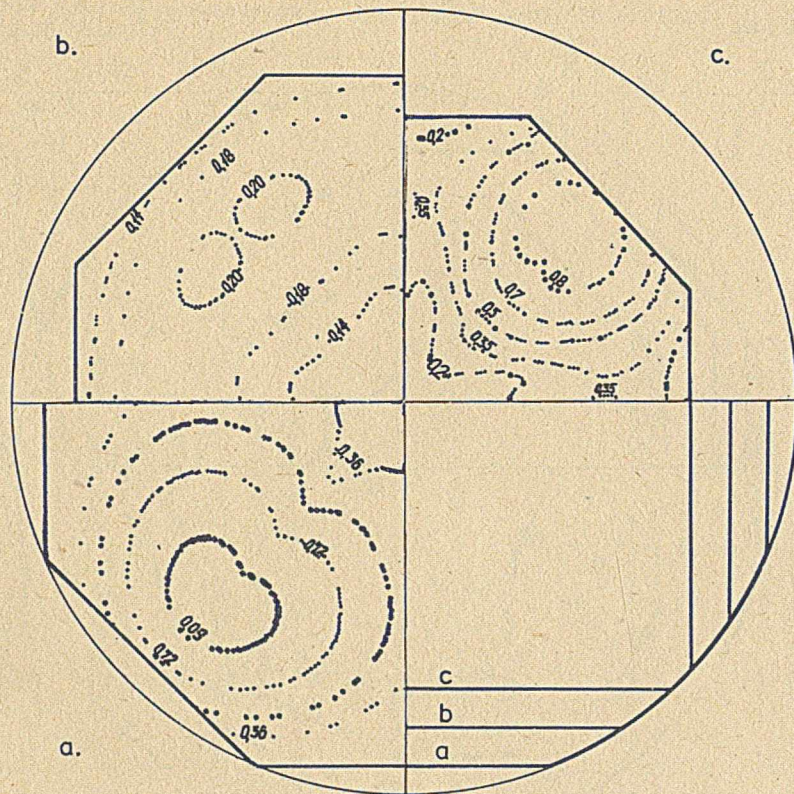
1	2	3	4	5	6	7
4	Kalibr.: "kwadr.-ośmio- kąt" $\varphi_p = 0,036$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7	3,689 298 697 -5,477 700 883 -7,917 522 200 3,497 780 819 1,857 570 443 -3,861 150 418 -5,925 239 240 3,499 145 045	- 2 - 2 - 4 - 1 - 5 - 1 - 7 - 3	0,945	0,921
5	Kalibr.: "kwadr.-ośmio- kąt" $\varphi_p = 0,125$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7	1,251 406 222 -2,894 978 890 -1,313 904 979 1,626 876 317 1,017 021 652 -1,512 081 126 -1,646 826 403 3,479 650 269	- 1 - 1 - 3 0 - 4 0 - 6 - 4	0,965	0,991
6	Kalibr.: "kwadr.-ośmio- kąt" $\varphi_p = 0,180$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7	1,780 409 588 -9,435 894 858 -2,905 561 923 5,927 585 164 1,625 315 292 -6,486 828 468 -2,404 875 252 2,693 674 577	- 1 - 1 - 2 0 - 3 0 - 5 - 2	0,969	0,987
7	Kalibr.: "ośmiokąt-ko- ło" $\varphi_p = 0,151$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7	1,502 804 103 1,051 318 246 3,188 851 580 1,300 306 095 -9,458 366 450 -8,088 476 050 3,346 723 500 6,509 688 100	- 1 - 2 - 4 - 1 - 6 - 2 - 8 - 5	0,954	0,997

1	2	3	4	5	6	7
8	Kalibr.: "ośmiokąt-koło" $\varphi_p = 0,336$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0	3,312 374 575	- 1	0,994	0,999
		a_1	2,759 550 759	- 1		
		a_2	6,761 783 020	- 4		
		a_3	-9,880 048 669	- 1		
		a_4	1, 619 497 790	- 5		
		a_5	1,065 410 113	0		
		a_6	-7,531 784 020	- 7		
		a_7	2,007 816 220	- 4		
9	Kalibr.: "ośmiokąt-koło" $\varphi_p = 0,610$ $v_p = 51 \text{ mm/s}$	a_0	6,178 651 586	- 1	0,980	1,001
		a_1	-4,518 256 181	- 1		
		a_2	1,220 791 142	- 3		
		a_3	1,618 064 469	0		
		a_4	-1,016 717 090	- 5		
		a_5	-8,693 951 982	- 1		
		a_6	-1,985 221 650	- 7		
		a_7	-6,241 388 210	- 4		
10	Kalibr.: "koło-koło" $\varphi_p = 0,141$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0	1,210 000 001	- 1	0,994	1,001
		a_1	1,007 777 949	- 1		
		a_2	-5,020 000 000	- 11		
		a_3	-1,944 445 039	- 1		
		a_4	2,320 000 000	- 12		
		a_5	1,172 839 946	- 1		
		a_6	-2,140 000 000	- 14		
		a_7	3,400 000 000	- 12		
11	Kalibr.: "koło-koło" $\varphi_p = 0,363$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0	3,489 999 997	- 1	0,998	0,999
		a_1	-8,555 554 069	- 2		
		a_2	-2,431 000 000	- 10		
		a_3	5,166 666 243	- 1		
		a_4	1,483 000 000	- 11		
		a_5	-3,641 974 956	- 1		
		a_6	-3,260 000 000	- 13		
		a_7	-9,000 000 000	- 12		

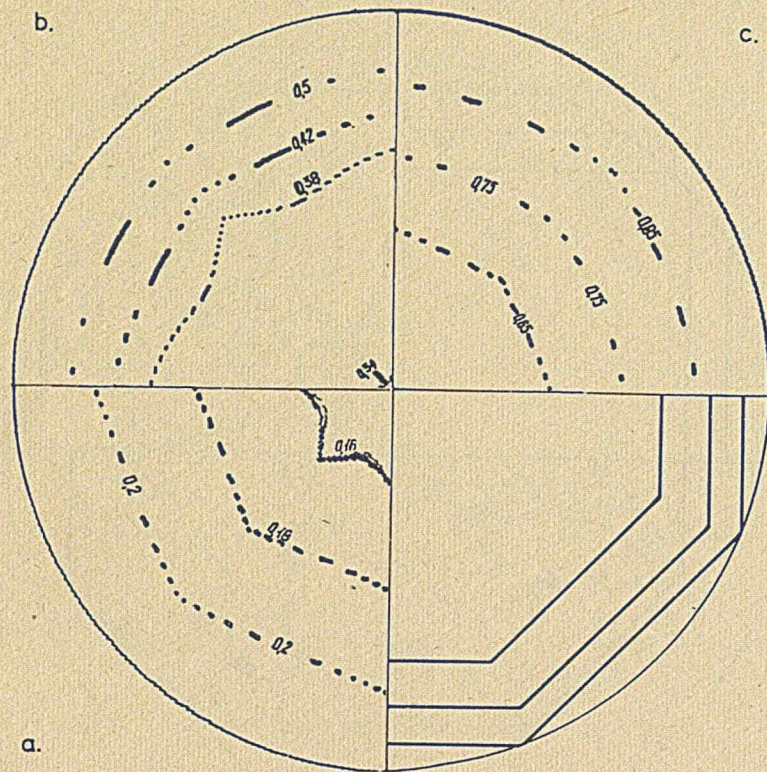
1	2	3	4	5	6	7
12	Kalibr.: "koło-koło" $\varphi_p = 0,576$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7	5,699 542 738 -1,028 497 842 5,151 433 200 6,794 675 004 -2,221 204 900 -3,743 381 331 -4,611 004 000 6,711 057 500	- 1 - 1 - 5 - 1 - 6 - 1 - 9 - 5	0,999	1,000
13	Kalibr.: "koło-koło" $\varphi_p = 0,250$ $v_p = 25 \text{ mm/s}$	a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7	2,387 401 696 -3,996 115 063 -6,688 319 430 -1,883 689 605 1,762 097 770 -1,374 343 384 -3,310 449 760 -8,619 089 200	- 1 - 1 - 5 0 - 5 0 - 7 - 5	1,000	1,000
14	Kalibr.: "koło-koło" $\varphi_p = 0,415$ $v_p = 25 \text{ mm/s}$	a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7	4,118 315 977 -4,147 200 969 3,382 461 040 1,892 593 939 -1,500 468 730 -1,339 971 810 2,103 490 460 -2,331 452 410	- 1 - 1 - 4 0 - 5 0 - 7 - 4	1,000	1,000
15	Kalibr.: "koło-koło" $\varphi_p = 0,511$ $v_p = 25 \text{ mm/s}$	a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6 a_7	4,980 155 585 -6,522 549 431 -1,141 830 846 2,952 667 211 7,135 969 770 -2,086 342 271 -9,841 475 900 -1,417 607 270	- 1 - 1 - 3 0 - 5 0 - 7 - 4	1,000	1,000



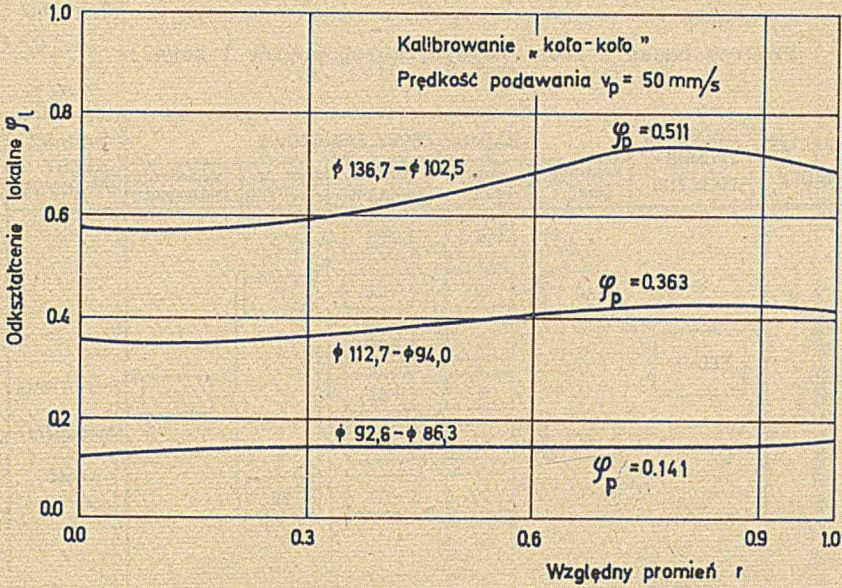
Rys. 5.7. Rozkład odkształceń w przekroju pręta w przepustach dla kalibrowania "koło-kwadrat":
 a - mały gniot, b - średni gniot, c - duży gniot



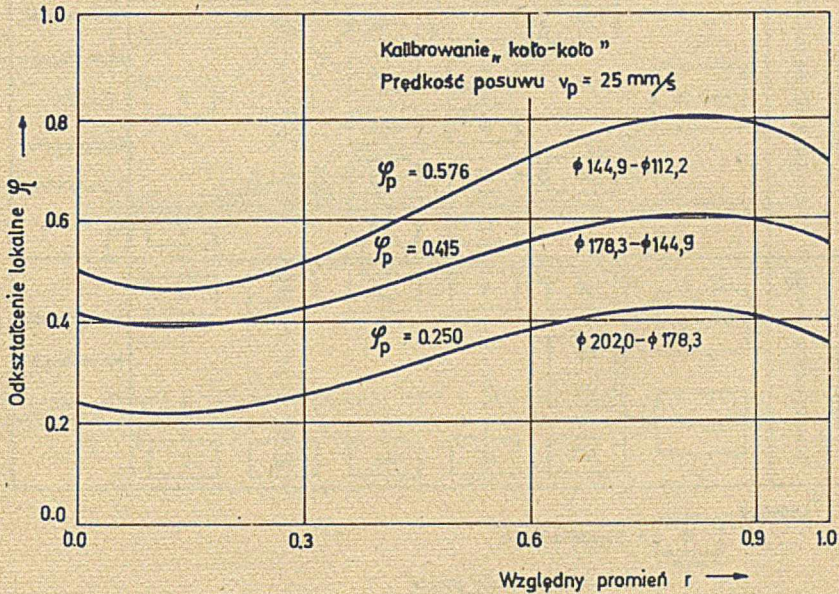
Rys. 5.8. Rozkład odkształceń w przepustach "kwadrat-ośmiokąt":
 a - mały gniot, b - średni gniot, c - duży gniot



Rys. 5.9. Rozkład odkształceń w przepustach "ośmiokąt-koło":
 a - mały gniot, b - średni gniot, c - duży gniot



Rys. 5.10. Rozkład odkształceń w przekroju prętów dla przepustu "koło-koło" i prędkości posuwu 50 mm/s:
a - mały gniot, b - średni gniot, c - duży gniot



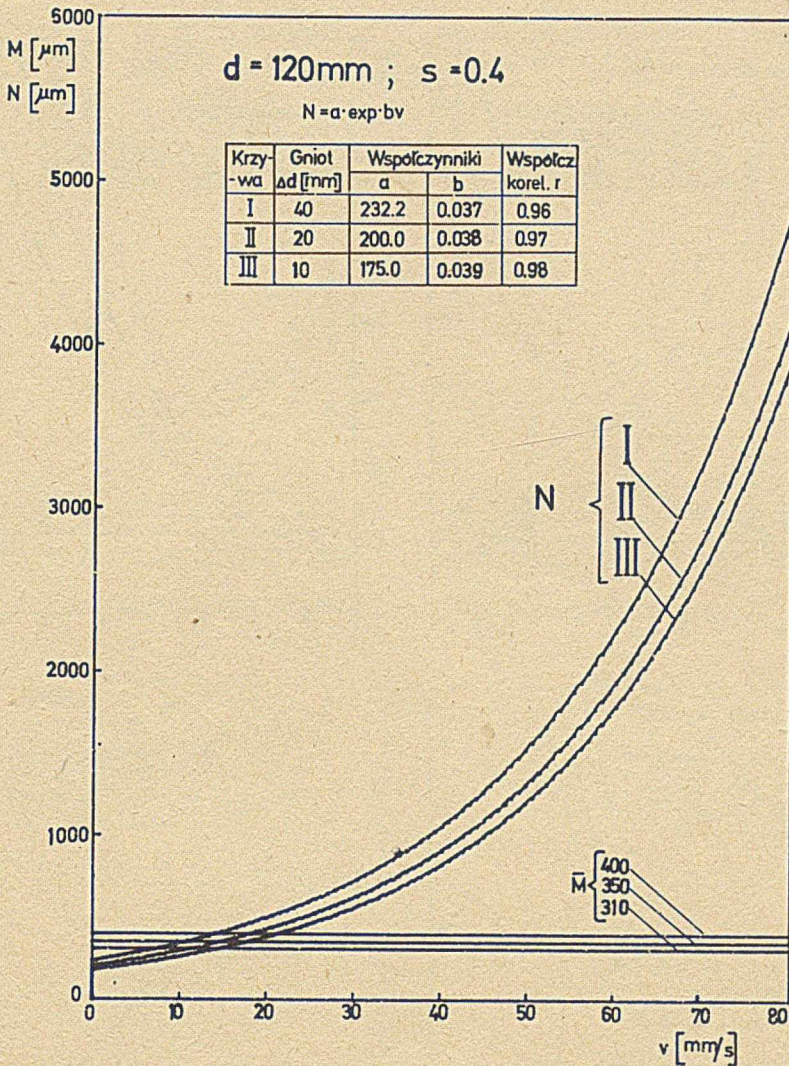
Rys. 5.11. Rozkład odkształceń w przekroju prętów dla przepustu "koło-koło" i prędkości posuwu 25 mm/s:
a - mały gniot, h - średni gniot, c - duży gniot

Program badań i tech geometrycznych prętów i kowadeł

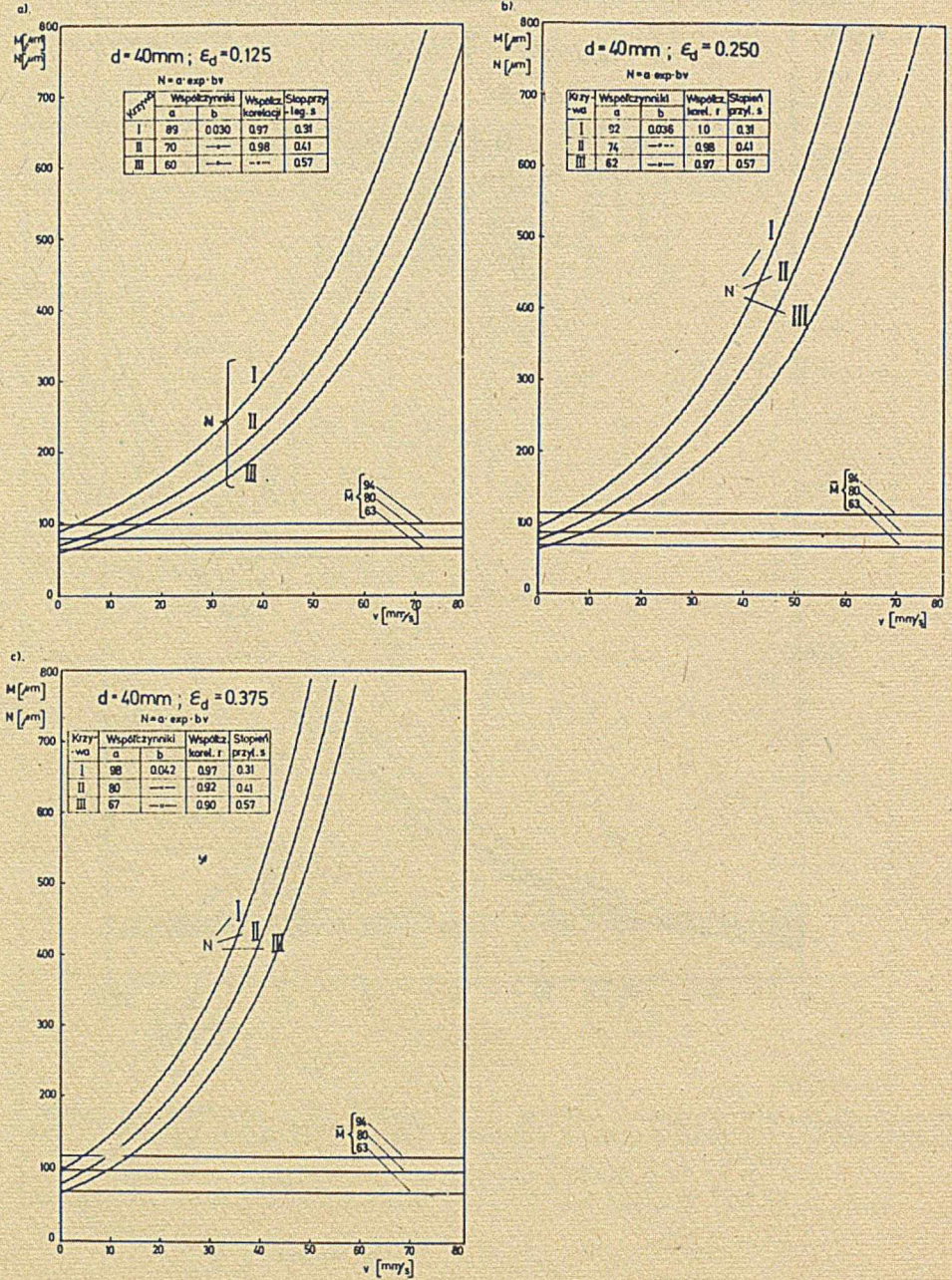
CHARAKTER KOWADEŁ	URZĄDZENIE TECHNOLOGICZNE	BADANE CECHY ZABIEGOWE					BADANE CECHY WYNIKOWE
		średnica [mm]	gniot [mm]	stopień przylegania	prędk. posuwu [mm/s]	stopień zużycia kowadeł	
Ustalane cechy geometryczne kowadeł	SXL-16	40	5 10 15	~0.3 ~0.4 ~0.6	15 ⋮ 80	N	Niekolowość Makronierówność
		80	5 10 20	~0.4 ~0.5 ~0.7			
	SXL-40	120	10 20 40	~0.4			
Kontrolowane cechy geometryczne kowadeł	SXL-16	40	3 5 10	~0.4 ~0.6 0.0	15 ⋮ 80	N	Niekolowość Makronierówność
		80	10 20 30	~0.5 ~0.6 0.0		P	Cechy geometryczne kowadeł
Niekontrolowany przebieg zużycia kowadeł	SXL-16	35 ⋮ 100 110	3 ⋮	~0.35 ⋮	15 ⋮	N	Niekolowość Makronierówność
	SXL-40	120	40	~0.5	~50	C	

X Legenda :

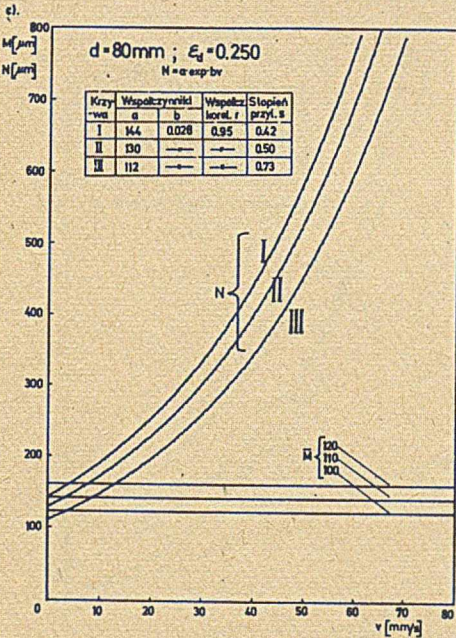
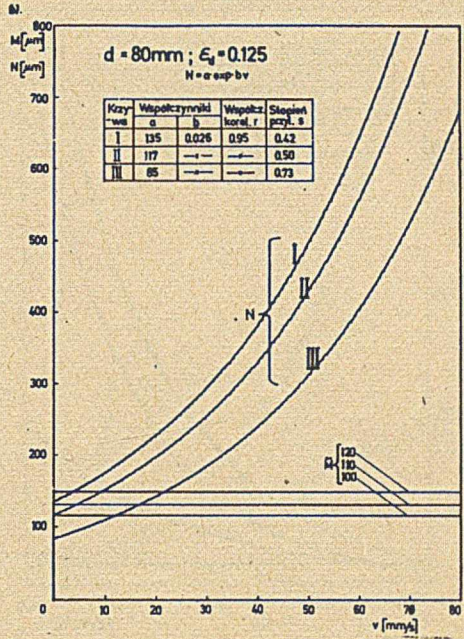
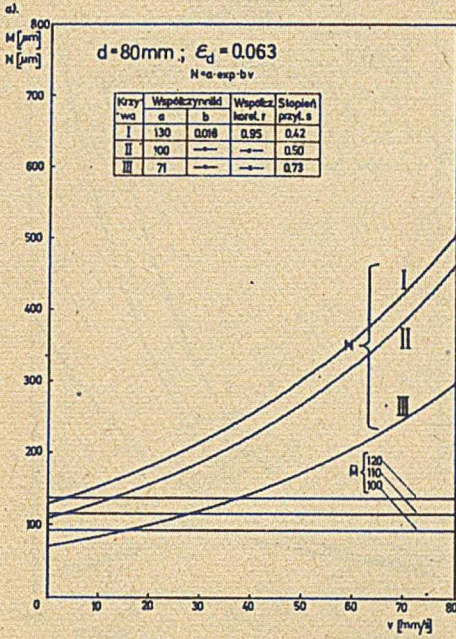
- N — kowadła nowe
- P — kowadła w połowie zużyte
- C — kowadła całkowicie zużyte



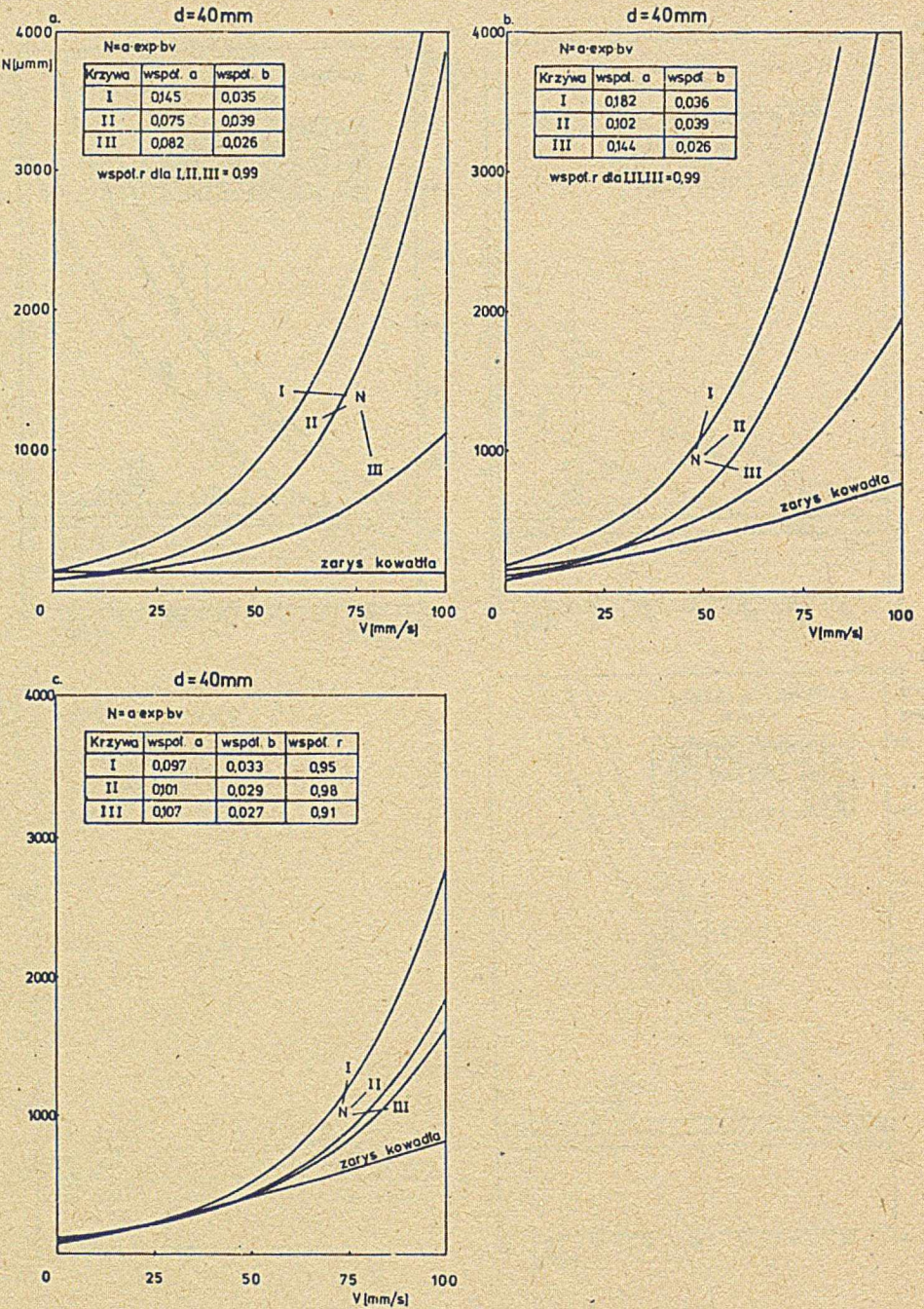
Rys. 5.12. Wpływ prędkości posuwu (v) i gniotu (Δd) na makronierówność i niekołowość przekroju prętów o średnicy 120 mm kątach w kowalce 5XL-40



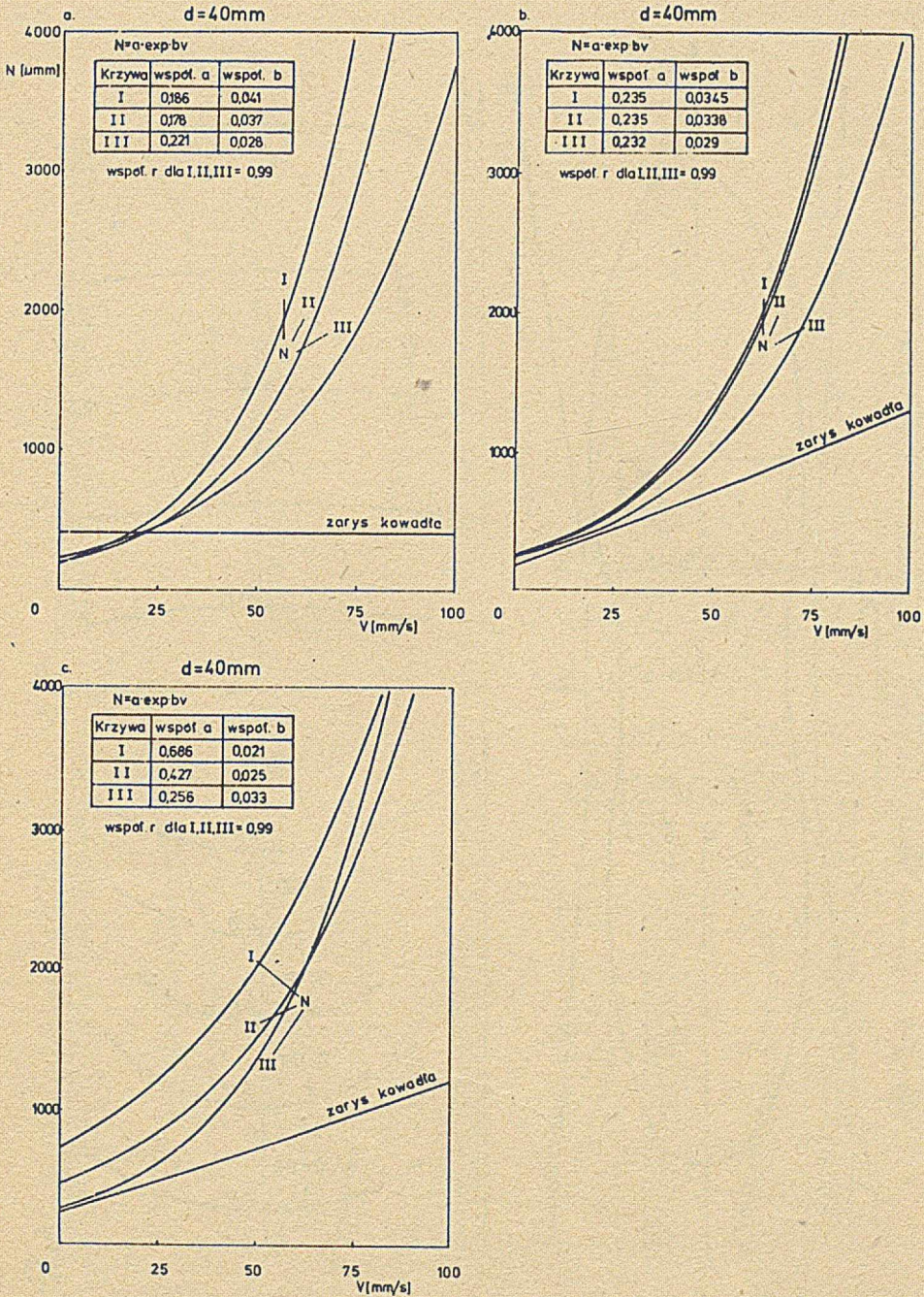
Rys. 5.13. Wpływ prędkości (v), gniotu (Δd) i stopnia przylegania (s) na makronierówność i niekołowość prętów o średnicy 40 mm kutech w kowalce SXL-16



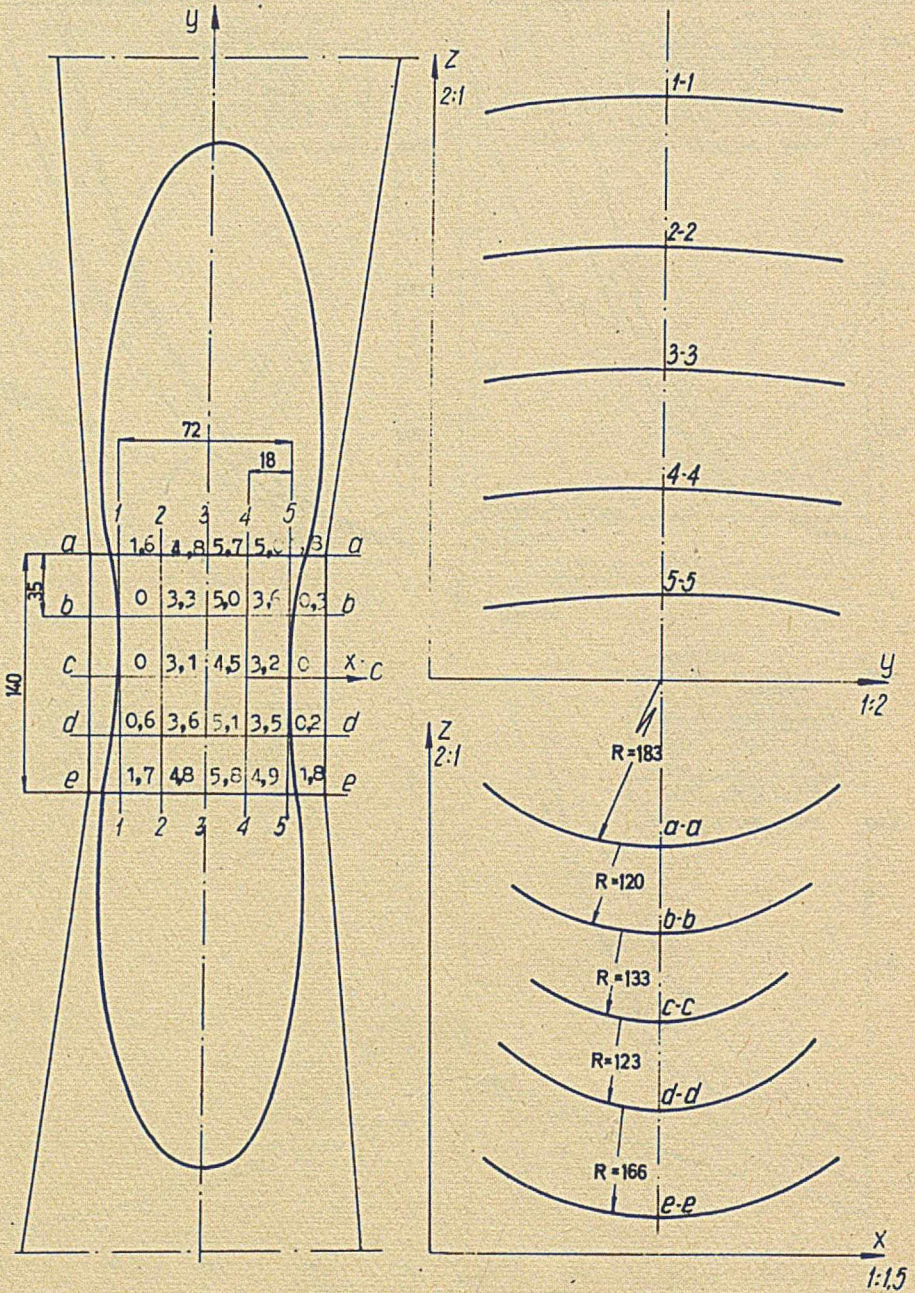
Rys. 5.14. Wpływ prędkości (v), gniotu (Δd) i stopnia przylegania (s) na makronierówność i niekołowość prętów o średnicy 80 mm kutech w kowalce SXL-16



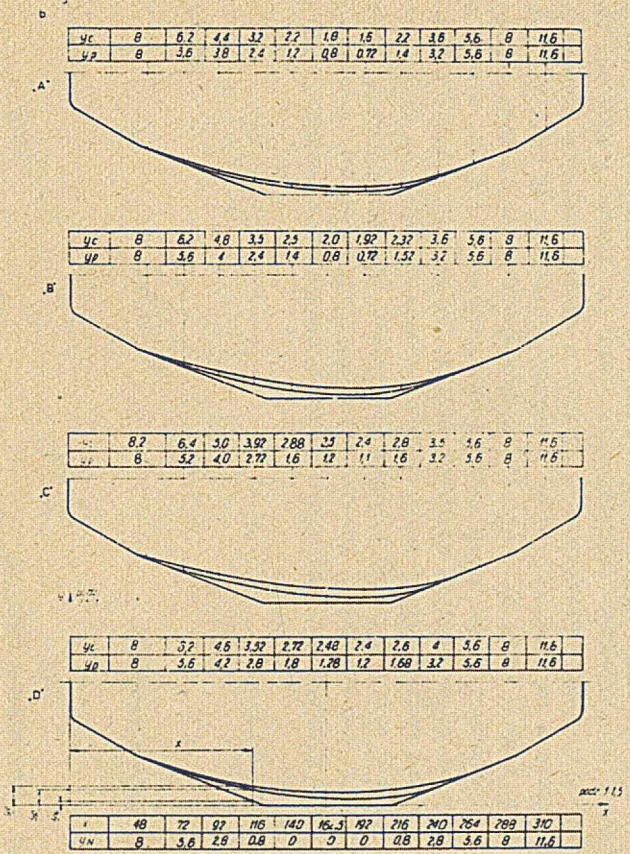
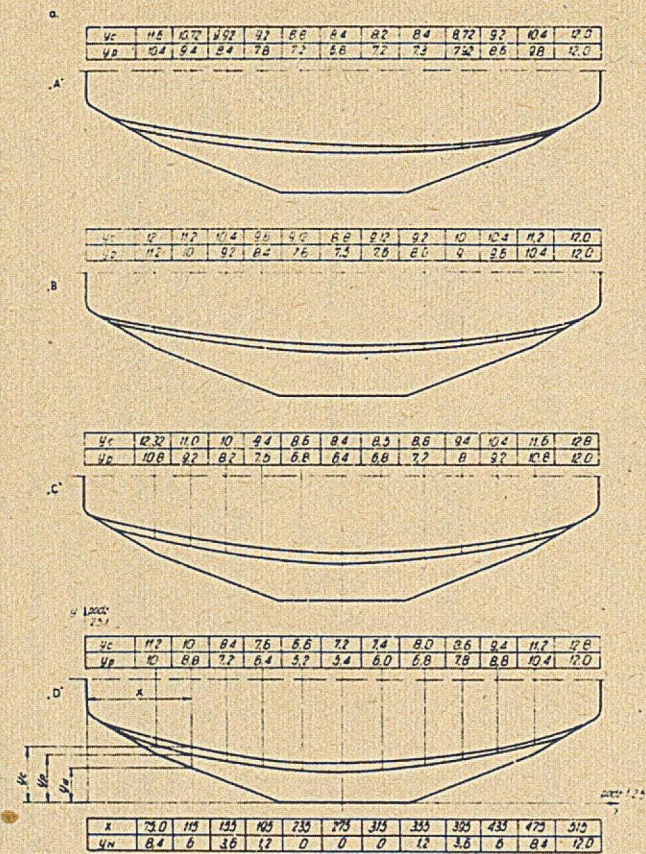
Rys. 5.15. Wpływ stopnia zużycia kowadła i parametrów procesu kucia na cechy geometryczne prętów o średnicy 40 mm



Rys. 5.16. Wpływ stopnia zużycia kowadeł i parametrów procesu kucia na cechy geometryczne prętów o średnicy 120 mm



Rys. 5.17. Schemat pomiaru powierzchni kalibrującej kowadła do kucia prętów o średnicy 120 mm



Rys. 5.18. Schemat pomiaru tworzącej wzdłużnego przekroju dla kompletów kowadeł do kucia prętów o średnicy a - 120 mm, b - 40 mm

5.15 do 5.16 przedstawiono wyniki badania cech geometrycznych prętów odkutych kowadłami o kontrolowanym procesie zużycia. Dla uchwycenia stopnia wpływu rzeczywistych cech geometrycznych kowadeł naniesiono na te rysunki wykresy będące bezpośrednim odbiciem powierzchni kalibrującej kowadeł. Cechy geometryczne kowadeł wyznaczono w oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych w punktach rozmieszczonych wg schematu pokazanego na rys. 5.17 i 5.18. Na rysunkach 5.12 do 5.16 wykresy niekołowości przedstawiają aproksymację uzyskanych wyników badań funkcją wykładniczą ($N = a \exp b v$), a makronierówność przedstawiają wartości średnie uzyskanych wyników badań.

Dla dokonania statystycznej oceny wpływu parametrów kucia na cechy geometryczne prętów przeprowadzono pomiary 390 losowo wybranych prętów o różnych średnicach i wielkościach gniotu. Chcąc uzyskać możliwość sprowadzenia uzyskanych wyników do jednego układu współrzędnych wprowadzono wielkości:

- względna niekołowość

$$N' = \frac{N}{d} \quad (5.3)$$

- względna makronierówność

$$M' = \frac{M}{d} \quad (5.4)$$

- względne przesunięcie materiału

$$x' = \frac{v_n \cdot T_m}{d} \quad (5.5)$$

Dla przyjętych wielkości sporządzono wykres aproksymujący wyniki badań funkcją:

$$N' = a \cdot \exp b \cdot x' \quad \text{dla} \quad \varepsilon_d = \text{const} \quad (5.6)$$

oraz

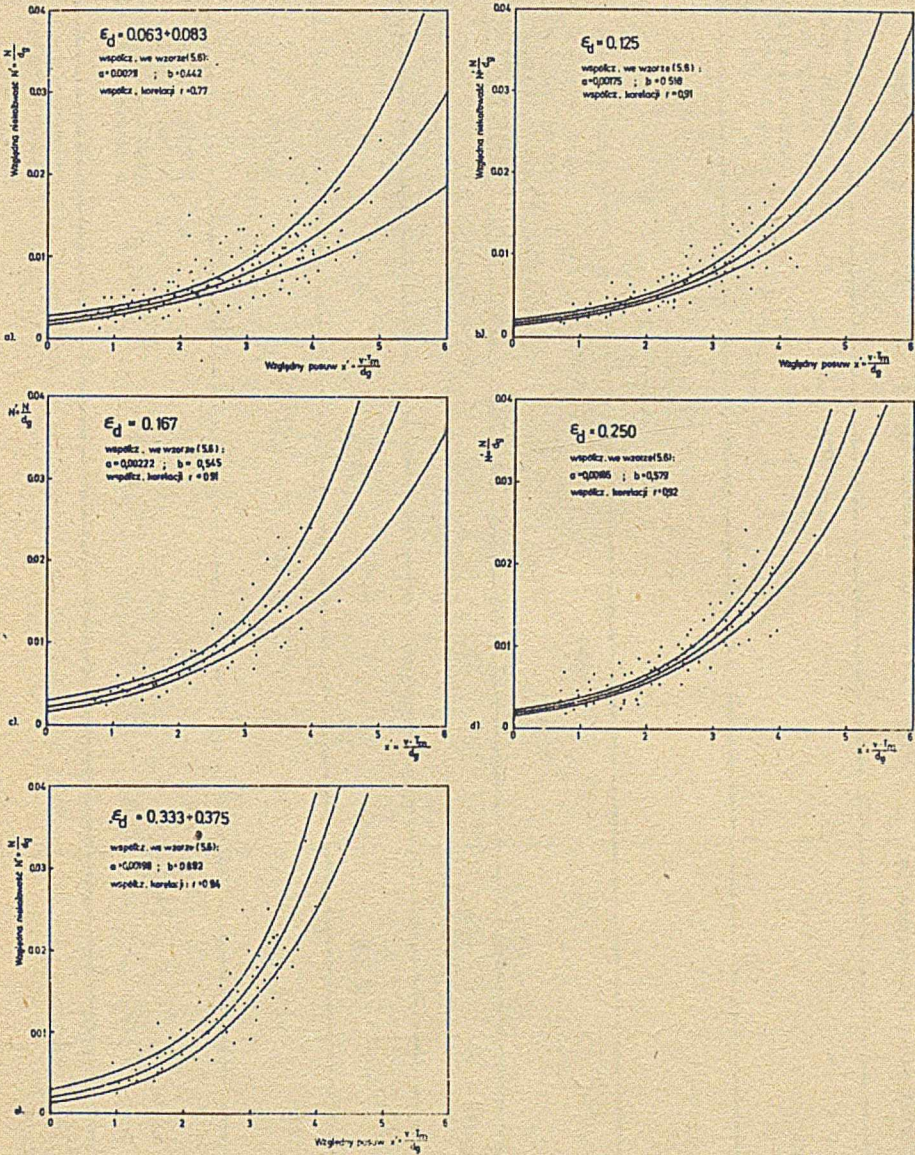
$$\bar{M}' = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n M \quad \text{dla} \quad \varepsilon_d = \text{const} \quad (5.7)$$

Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 5.19.

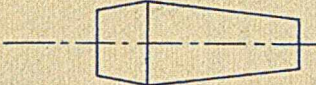
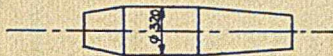

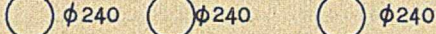
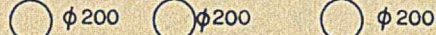
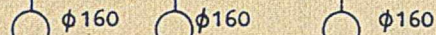

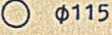
Charakterystyczne przykłady ilustrujące wykresy zarysów przekroju prętów uzyskane na profilografie biegunowym "Talyrond 51" oraz obraz odpowiadających im powierzchni przedstawiono na rysunkach 5.20 i 5.21.

5.3.3. Struktura prętów odkutych w kowarce

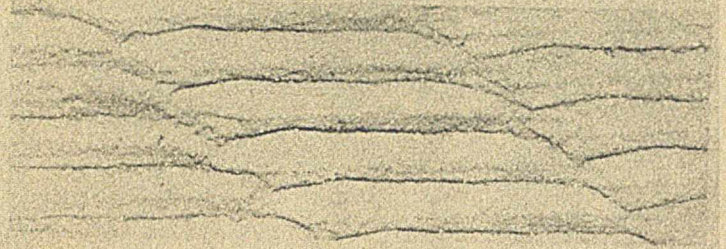
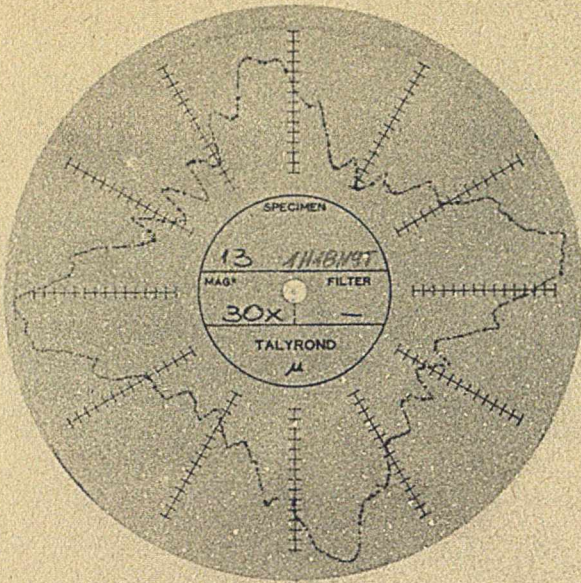
Badania struktury przeprowadzono na prętach o średnicach 280, 160, 130 i 115 mm, odkutych z wlewków Q 900 w kowarce SXL-40. W programie kucia (tabl. 5.8) uwzględniono dla wszystkich średnic końcowych przejście, w



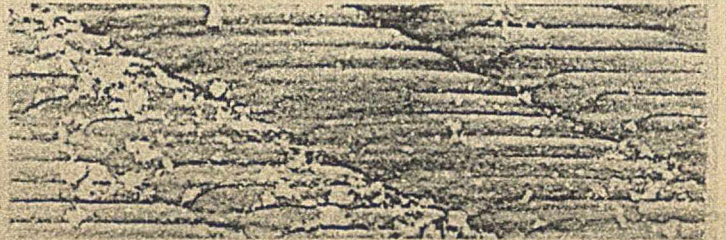
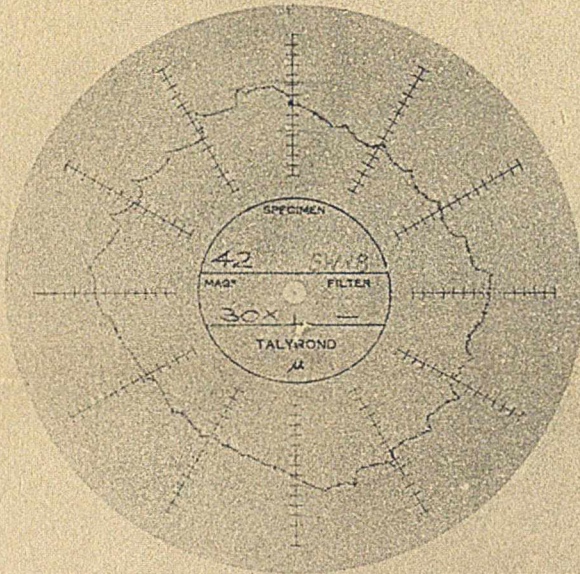
Rys. 5.19. Wpływ parametrów kucia na względną makronierówność i względną niekołowość prętów odkutych w kowarkach SXL-16 i SXL-40

Kolejny przebieg	Operacja lub czynność, prędkość posuwu	Odształcenie w przepuszczeniu	Szkic przebiegu procesu kucia	Uwagi
0	Nagrzewanie i podanie do kowarki	-		Przekuto cztery wlewki oznaczone cyframi "1", "2", "3", "4"
1, 2	Skuwanie zbieżności	-		
3	Kucie na stały przekrój $v_p = 50 \text{ mm/s}$	-	<p>"1" "2" "3" "4"</p> 	Pobranie do badań metalograf. tarcz z pręta "1"
4	Jak w przepuszczeniu 3	0,308		-
5	Jak w przepuszczeniu 3	0,345		-
6	Jak w przepuszczeniu 3	0,446		Pobranie do badań metalograf. tarcz z pręta "2"
7	Kucie na stały przekrój "3"- $v_p = 25 \text{ mm/s}$ "4"- $v_p = 50 \text{ mm/s}$	"3" - 0,415 "4" - 0,494		Pobranie do badań metalograf. tarcz z pręta "3"
8	Kucie na stały przekrój $v_p = 25 \text{ mm/s}$			Pobranie do badań metalograf. tarcz z pręta "4"

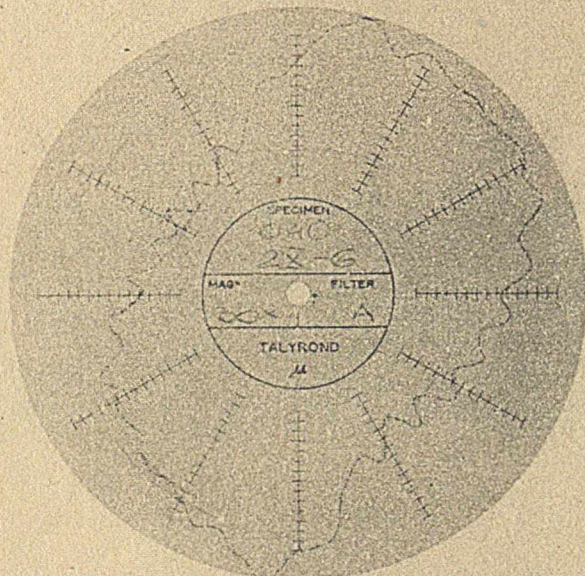
a.



b.



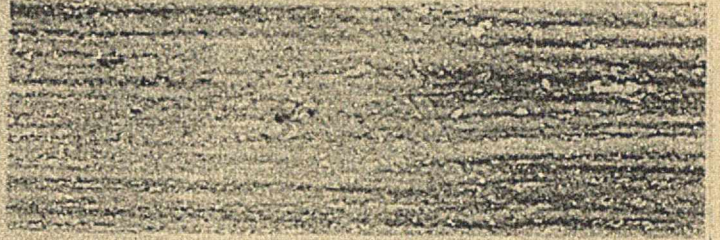
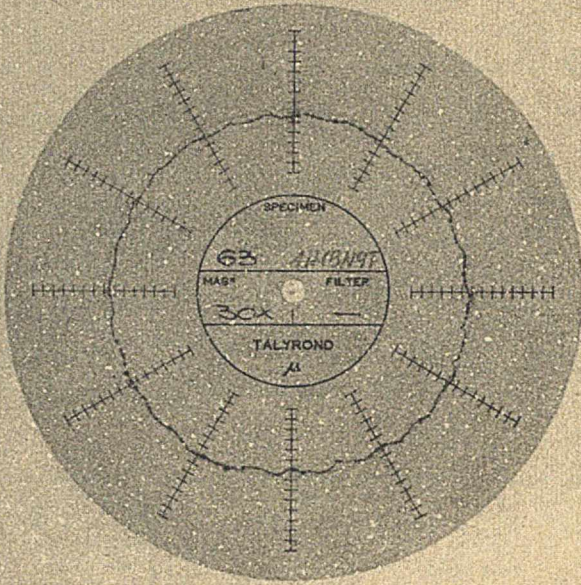
c.



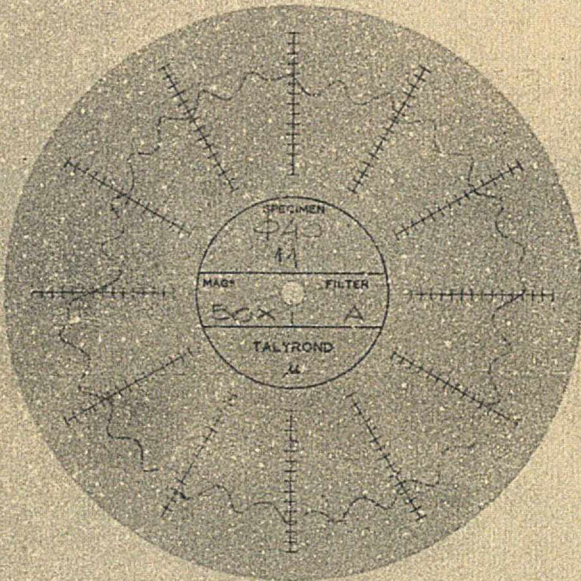
Rys. 5.20. Obraz powierzchni pręta i odpowiadający mu wykres zarysu przekroju o niekołowości równej makronierówności:

a - mała makronierówność, b - duża makronierówność, c - zróżnicowana makronierówność

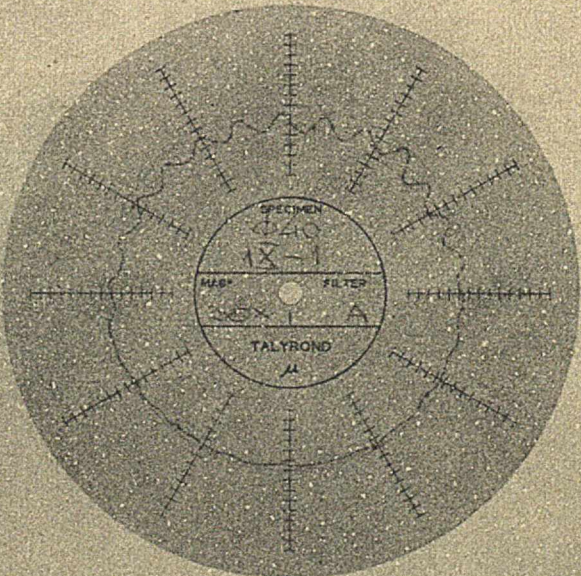
a.



b.



c.

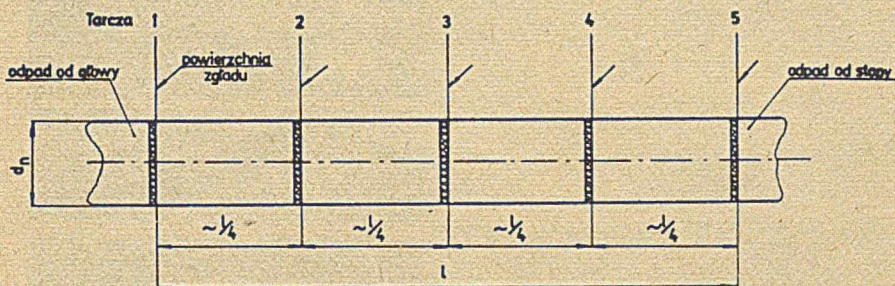


Rys. 5.21. Obraz powierzchni pręta i odpowiadający mu wykres zarysu przekroju o znacznej niekołowości: a - właściwe nastawienie kowadeł, b - niewłaściwe nastawienie kowadeł, c - zróżnicowane zużycie narzędzi

Tablica 5.9

Wyniki oceny struktury prętów

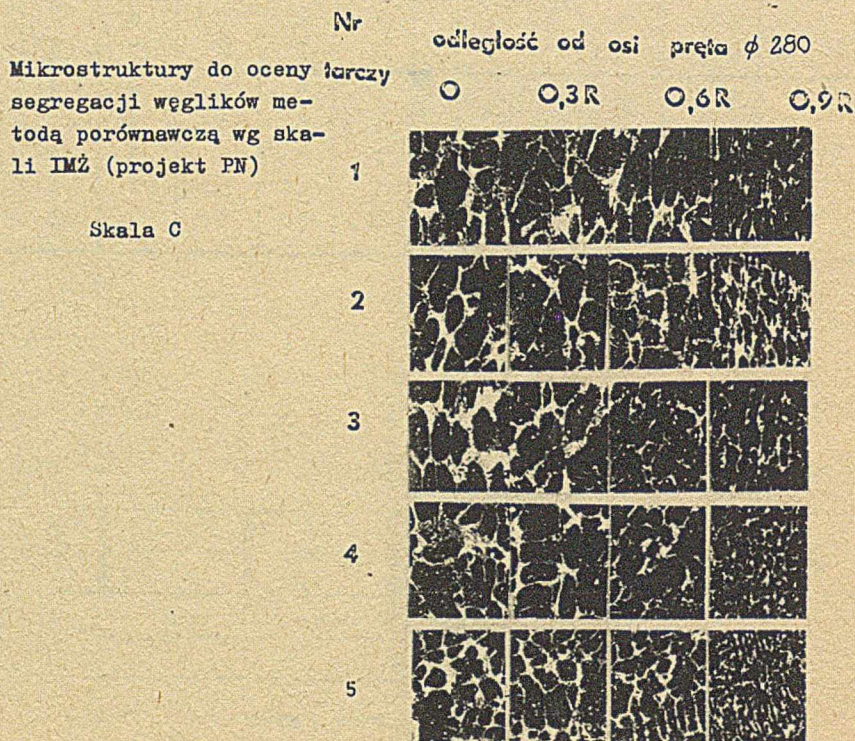
Wymiar pręta	Numer tarczy w przecie	Ocena segregacji wg skali "B"				Ocena segregacji wg skali "C"				Promień strefy makrosegregacji
		oś	0,3r	0,6r	0,9r	oś	0,3r	0,6r	0,9r	
280	1									80
	2									78
	3									74
	4									40
	5									0
160	1	5	5	6	2	6	5	5	3	60
	2	5	5	6	2	6	6	5	3	40
	3	6	5	5	2	6	6	4	3	30
	4	6	6	5	2	7	6	5	4	23
	5	6	5	5	2	6	6	5	3	0
130	1	5	5	3	1	6	5	5	3	35
	2	4	4	3	1	5	5	4	3	26
	3	4	4	3	2	5	5	4	3	18
	4	4	4	3	1	7	5	4	2	16
	5	3	3	3	2	7	6	5	4	0
115	1	4	3	2	1	5	6	4	3	37
	2	4	3	2	1	5	5	4	2	32
	3	4	3	2	1	7	5	4	3	25
	4	4	4	3	1	6	5	4	2	18
	5	4	3	2	2	5	5	4	2	0



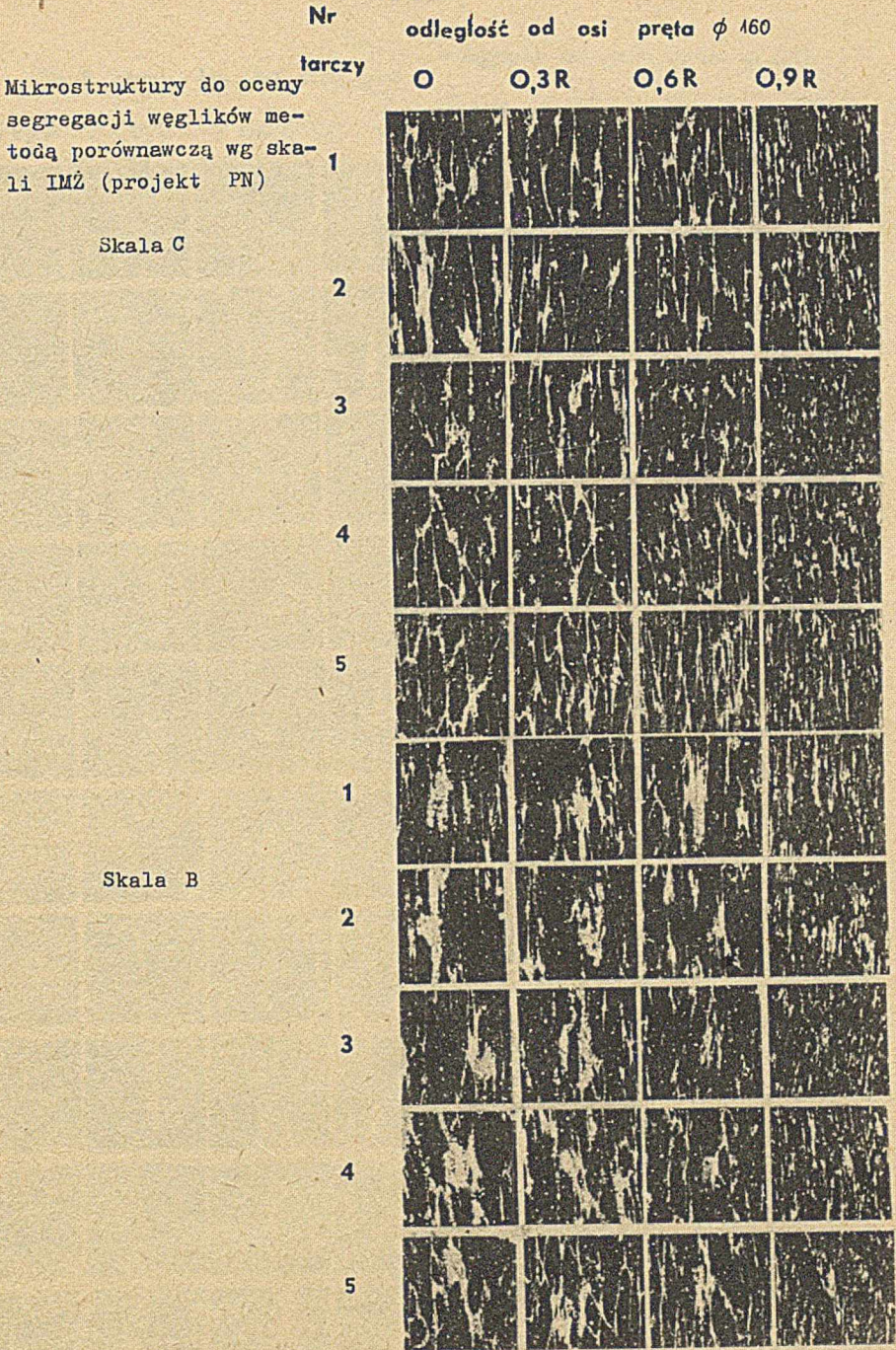
$d_n = 280 \text{ mm} ; 160 \text{ mm} ; 130 \text{ mm} ; 115 \text{ mm}$

Rys. 5.22. Schemat pobierania próbek do badań struktury

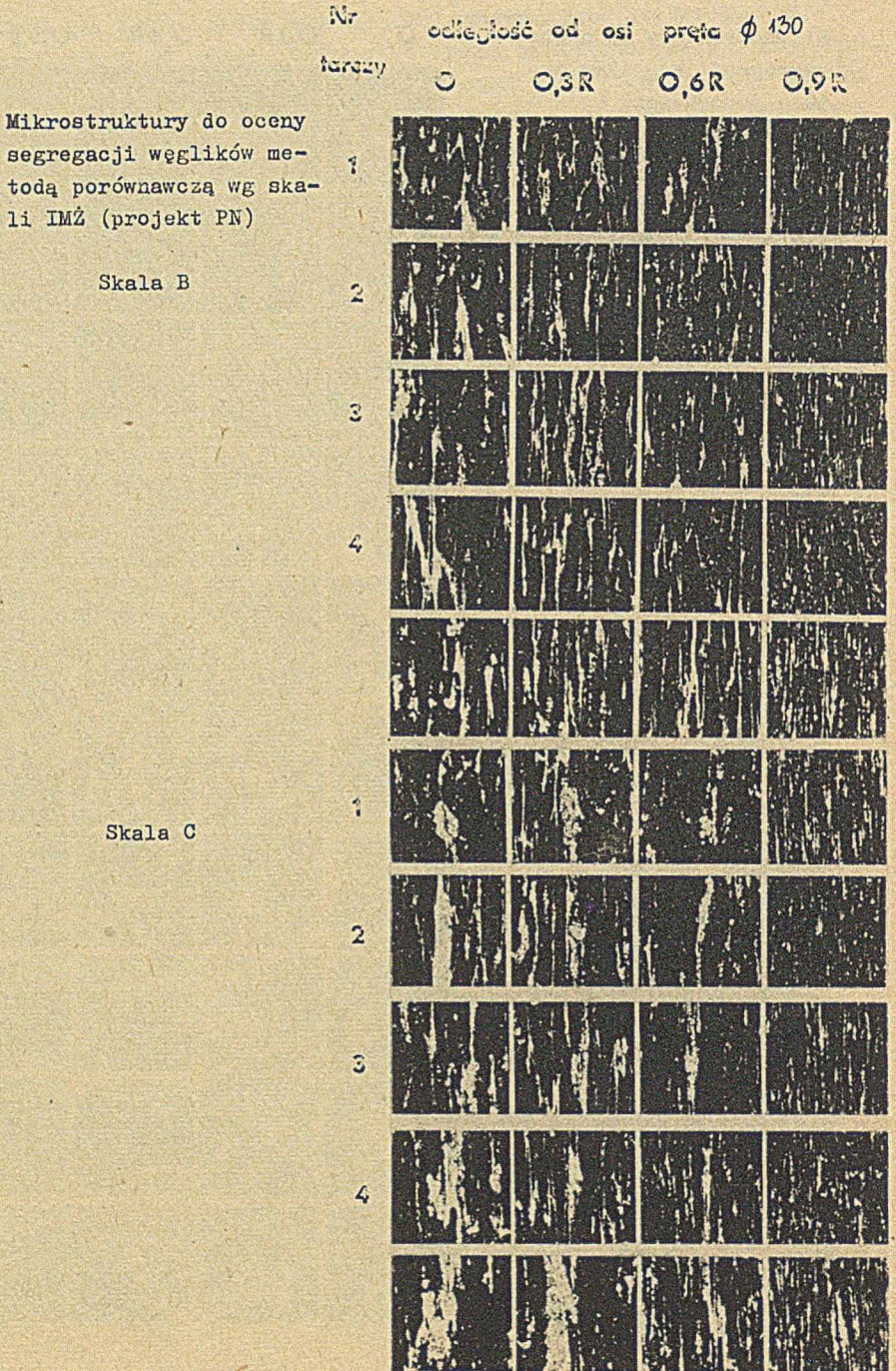
którym średnica kutego pręta wynosiła 280 mm. Uzyskane dzięki temu możliwości dokonania oceny zmian struktury i wyniku przekucia pręta o średnicy 280 mm na średnice 160, 130 i 115 mm. Struktury prętów o średnicy 280 mm oraz średnicach 160, 130 i 115 mm można oceniać przy użyciu tych samych wskaźników ilościowej oceny fazy węglkowej. Spełniono tym samym warunek niezbędny do określenia funkcji korelacji pomiędzy lokalnym odkształceniem a odpowiadającą mu strukturą. Wyniki badań metalograficznych obejmujących ocenę segregacji węglków w oparciu o polską normę PN-74/H-93012 oraz wielkości strefy makrosegregacji zestawiono w tablicy 5.9. Próbkę do badań pobrano z tarcz rozłożonych wzdłuż pręta w sposób pokazany na rys. 5.22. Takie rozmieszczenie miejsc oceny struktury z wszystkich prętów daje przy założeniu powtarzalności struktury wyjściowej możliwości określenia zmian lokalnej struktury w funkcji odkształcenia. Jednocześnie można ocenić niejednorodność struktury odkutych prętów jako sumaryczny efekt oddziaływania niejednorodności struktury wyjściowej wlewka oraz zmienności warunków kucia. Mikrografie przedstawiające segregację węglków w badanych prętach zestawiono na rysunkach 5.23 do 5.26, a wyniki ilościowej oceny w tabl. 5.15.



Rys. 5.23. Segregacja węglków w pręcie o średnicy 280 mm



Rys. 5.24. Segregacja węglików w pręcie o średnicy 160 mm



Rys. 5.25. Segregacja węglików w pręcie o średnicy 130 mm

Nr odległość od osi pręta ϕ 120
tarczy O 0,3R 0,6R 0,9R

Mikrostruktury do oceny segregacji węglików metodą porównawczą wg skali IMŻ (projekt PN)

Skala B

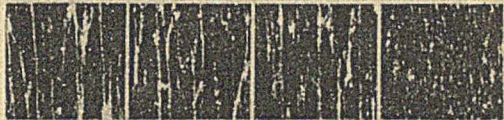
2



3



4

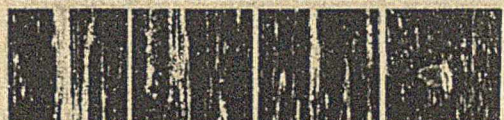


1



Skala C

2



3



4



Rys. 5.26. Segregacja węglików w przecie o średnicy 115 mm

5.4. Analiza wyników badań eksperymentalnych

5.4.1. Rozkład lokalnych odkształceń

Rozkład lokalnych odkształceń w przekroju pręta po jednym przepuszczeniu

Dla wszystkich sposobów kucia, niezależnie od zastosowanego kalibrowania, wielkości gniotu i prędkości przesuwu, odkształcenie w osi pręta jest najmniejsze. Jest ono nieznacznie różne od odkształcenia obliczonego ze zmiany zewnętrznych wymiarów pręta.

W zależności od sposobu kalibrowania, pomijając strefy "swobodnych końców", lokalne odkształcenie jest zmienne tylko w kierunku promieniowym (kalibrowanie "koło - koło") lub w kierunku promieniowym i obwodowym (dla kalibrowania "koło - kwadrat", "kwadrat - ośmiokąt" i "ośmiokąt - koło"),

W przepuszczeniu "koło - kwadrat" przy zastosowaniu małego gniotu największe lokalne odkształcenie występuje w obszarze przyległym do strefy nacisku kowadeł w odległości ok. 0,8 promienia zewnętrznego do osi pręta (rys. 5.7a). W miarę wzrostu gniotu strefa maksymalnych odkształceń ulega rozdzielaniu i przemieszcza się w kierunku swobodnych od nacisku, zaokrąglonych naroży (rys. 5.7b). Zastosowanie dużego gniotu prowadzi do połączenia stref największych odkształceń i zlokalizowania ich w obszarze naroży pręta (rys. 5.7c).

W przepuszczeniu "kwadrat - ośmiokąt" odkształcenie w kierunku obwodowym jest podobnie jak dla kalibrowania "koło-kwadrat" zdecydowanie zmienne. Obszar maksymalnych odkształceń dla wszystkich gniotów leży w obszarze przyległym do strefy nacisku kowadeł (rys. 5.8) w odległości 0,7 do 0,8 promienia od osi pręta.

W przepuszczeniu "ośmiokąt-koło" zróżnicowanie odkształcenia w kierunku obwodowym jest nieznaczne, a w kierunku promieniowym odkształcenie jest stale rosnące od osi pręta do obrzeża (rys. 5.9).

Zastosowanie kalibrowania "koło-koło" daje w efekcie odkształcenie lokalne zmieniające się w zależności od odległości punktu od środka przekroju. Gradient przyrostu rośnie wraz ze wzrostem gniotu (Δd) oraz spadkiem prędkości posuwu (v_p). Efekt ten można wyjaśnić wielokrotnością zmiany położenia poszczególnych punktów przekroju względem kierunku nacisku kowadeł w kolejnych uderzeniach w czasie ich przechodzenia przez kotlinę odkształcenia. Zwiększona krotność uderzeń zwiększa lokalne odkształcenie jako efekt nieproporcjonalności i niemonotoniczności tych odkształceń.

Liczbę uderzeń niezbędnych przy zastosowaniu kalibrowania "koło - koło" do całkowitej redukcji przekroju w przepuszczeniu wyrazić można wzorem

$$n_p = \frac{\Delta d \cdot f_u \cdot \text{ctg} \alpha_r}{2v_p} \quad (5.8)$$

Gdy wprowadzi się względną liczbę uderzeń n'_p

$$n'_p = \frac{n_p}{d_{n-1}} \quad (5.9)$$

oraz uwzględni zależność

$$\frac{\Delta d}{d_{n-1}} = 1 - e^{-\frac{\varphi_p}{2}} \quad (5.10)$$

wówczas wzór (5.3) przybierze postać:

$$n_p = n'_p \cdot d_{n-1} = \frac{f_u \cdot \text{ctg } \alpha_r}{2} \cdot \frac{1-e^{-\frac{\varphi_p}{2}}}{v_p} \cdot d_{n-1} \quad (5.11)$$

Wyrażenie

$$\frac{f_u \cdot \text{ctg } \alpha_r}{2} = A \quad (5.12)$$

ma wartość stałą dla danego rodzaju kowadła i kowarki. Podstawiając je do wzoru (5.6), wyrażenie na obliczenie liczby uderzeń niezbędnych do redukcji przekroju w przepuście przyjmie postać

$$n_p = A \cdot \frac{1-e^{-\frac{\varphi_p}{2}}}{v_p} \cdot d_{n-1} \quad (5.13a)$$

a wyrażenie na względną liczbę uderzeń (n'_p)

$$n'_p = A \cdot \frac{1-e^{-\frac{\varphi_p}{2}}}{v_p} \quad (5.13b)$$

Jeżeli odkształcenie lokalne zależy od krotności uderzeń, to można je wyrazić wzorem, w którym będzie zachowana proporcja pomiędzy lokalnym odkształceniem a względną liczbą uderzeń (n'_p). Założono więc następującą formalną postać wzoru, który posłużył do aproksymacji wyników badań eksperymentalnych

$$\varphi_r = \text{const} = \varphi_p + C \cdot \frac{1-e^{-\frac{\varphi_p}{2}}}{v_p} \quad (5.14)$$

gdzie C - współczynnik będący funkcją cech geometrycznych kowadła i częstości uderzeń kowarki "A" (wzór 5.7) oraz odległości punktu od osi pręta " r " - $C = f(A, r)$.

Uzyskane wyniki aproksymacji przedstawia tablica 5.10.

W przekroju pręta można wyodrębnić zasadniczo trzy strefy:

- strefa I - leżąca w bezpośredniej bliskości osi pręta ($r < 0,3 R_z$), w której odkształcenie jest głównie następstwem działania naprężeń dopełniających, przekazywanych przez mające tendencję do większego wydłużania strefy zewnętrzne,
- strefa II - zajmująca pierścieniowy obszar zawarty w zakresie promieni $0,3 R_z \leq r \leq 0,9 R_z$, w której odkształcenie jest głównie następstwem bezpośredniego oddziaływania nacisku kowadeł w kolejnych uderzeniach, nie utrudniane siłami tarcia materiału o narzędzie,
- strefa III - zajmująca pierścieniowy obszar ograniczony od wewnątrz promieniem $r < 0,9 R_z$, w którym odkształcenie jest utrudnione oddziaływaniem sił tarcia materiału o narzędzie.

Potwierdzeniem dla dokonanych założeń jest nieznacznie mniejsze odkształcenie środkowego sworznia ($r = 0$) od odkształcenia obliczonego ze zmiany wymiarów zewnętrznych odkuwki oraz intensywne narastanie odkształcenia w strefie $0,3 R_z < r < 0,7 R_z$ i ustalenie się, a nawet nieznaczny spadek, odkształceń w strefie $0,7 R_z < r < 0,9 R_z$.

Uzyskany po aproksymacji wyników badań funkcją (5.1) spadek odkształceń w strefie $0 \leq r < 0,3 R_z$ można interpretować jedynie efektem wywołanym typem przyjętej do aproksymacji funkcji (posiadanie dwóch ekstremów). Dla tego obszaru brak jest danych eksperymentalnych, jednakże fizykalna interpretacja zachodzących w nim odkształceń skłania do złożenia w przybliżeniu liniowego narastania odkształceń w funkcji promienia

$$\varphi_{rI} = \varphi_0 + C_1 \cdot r \quad (5.15)$$

gdzie:

φ_0 - odkształcenie w osi pręta,

C_1 - współczynnik.

Odkształcenie φ_0 można wyznaczyć ze wzoru (5.14), przyjmując z tabl. 5.10 wartości C dla $r = 0$. Współczynnik C_1 można natomiast wyznaczyć ze wzoru

$$C_1 = \frac{\varphi_{0,3} - \varphi_0}{0,3} \quad (5.16)$$

gdzie $\varphi_0, \varphi_{0,3}$ - odpowiednie odkształcenia lokalne wyznaczone ze wzoru (5.14) odpowiadające odległości od osi $0 \cdot R_z$ i $0,3 \cdot R_z$.

Wyniki obliczeń współczynnika "c"

Tablica 5.10

Lp.	r	Odkształcenie lokalne						Współcz. C	Wartości statystyczne		Strefa odksz.	Wartość statyst.	
		25 mm/s			50 mm/s				r	a		wzór do oblicz. odksz.	r
		v_p	ϕ_p	ψ_p	v_p	ϕ_p	ψ_p						
1	0,0	0,239	0,412	0,498	0,121	0,349	0,570	- 1,67	0,999	1,000	I		
2	0,1	0,216	0,388	0,460	0,130	0,345	0,566	- 1,45	0,999	0,999	5.15		
3	0,2	0,223	0,394	0,469	0,136	0,350	0,574	- 3,28	0,998	1,000			
4	0,3	0,251	0,422	0,512	0,139	0,360	0,590	0,79	0,999	1,000			
5	0,4	0,292	0,463	0,576	0,141	0,374	0,614	6,70	0,999	1,000	II		
6	0,5	0,338	0,510	0,649	0,141	0,390	0,642	13,75	0,996	1,001	5.19	0,999	1,000
7	0,6	0,380	0,555	0,719	0,141	0,405	0,677	20,55	0,993	1,000			
8	0,7	0,410	0,589	0,723	0,141	0,417	0,703	24,00	0,992	1,000			
9	0,8	0,421	0,605	0,798	0,143	0,425	0,731	28,80	0,993	1,000			
10	0,9	0,403	0,595	0,782	0,146	0,425	0,755	28,70	0,994	1,001			
11	1,0	0,348	0,550	0,712	0,152	0,416	0,772	23,90	0,986	1,001			

Po odpowiednich przekształceniach wzór (5.12) można sprowadzić do postaci:

$$C_1 = (C_0 - C_{0,3}) \cdot \frac{1 - \exp(-\frac{v_p}{2})}{0,3 v_p} \quad (5.17)$$

gdzie $C_0, C_{0,3}$ - wartości współczynnika C z tabl. 5.10 odpowiednio dla promieni $r = 0$ i $r = 0,3$.

Stosunkowo duża liczba punktów, dla których wyznaczono lokalne odkształcenie eksperymentalnie, leży w obszarze II. W oparciu o uzyskane wyniki wartości C dla różnych r (tabl. 5.10) wyznaczono dla tego obszaru funkcję $C = f(r)$. Wyznaczenia funkcji dokonano w oparciu o wartości C odpowiadające względnym promieniom leżącym w przedziale $0,3 \leq r \leq 0,9$. Najwyższą korelację uzyskano dla funkcji logarytmicznej

$$C = a + b \cdot \ln r \quad (5.18)$$

Wartości współczynników tej funkcji oraz ocenę statystyczną zawarto w tabl. 5.10.

Obliczenia odkształceń lokalnych w tej strefie pręta ($0,3 \leq r \leq 0,9$) można więc dokonać przy użyciu wzoru

$$\varphi_{rII} = \varphi_p + (33,44 + 27,64 \cdot \ln r) \quad (5.19)$$

Niewątpliwie najtrudniejsze jest ustalenie lokalnych odkształceń w strefie III ($r > 0,9$).

W najbardziej przybliżonych obliczeniach można założyć, że są one równe odkształceni dla $r = 0,9$. Z praktycznego punktu widzenia jest to strefa, która z reguły nie stanowi problemu technologicznego. Składają się na to bardzo korzystna struktura wejściowa wlewka w tym obszarze oraz i tak stosunkowo duże odkształcenie lokalne. Podsumowując analizę dotyczącą rozkładu lokalnych odkształceń jako efektu pojedynczego przepustu, można stwierdzić, że wyznaczenie lokalnego odkształcenia w przekroju pręta jest możliwe dla każdego kalibrowania i zakresu zmienności parametrów kucia odpowiadających zakresowi zmienności przyjętemu w badaniach.

Wyznaczenie lokalnego odkształcenia dla kalibrowania "koło - koło" można przeprowadzić w oparciu o wzory (5.15) i (5.19). Wyznaczenie odkształceń dla kalibrowań "koło - kwadrat", "kwadrat - ośmiokąt" i "ośmiokąt - koło" można przeprowadzić w oparciu o wyniki opisu rozkładu lokalnych odkształceń podanych w niniejszym opracowaniu (wzór (5.1), tabl. 5.6). Jeżeli odkształcenie w przepuszczeniu φ_p , dla którego szuka się $(\varphi_j(r, \theta))$ lokalnego odkształcenia, jest zawarte pomiędzy φ_p występującym w eksperymencie, to obliczenie możliwe jest przez zastosowanie metod interpolacji.

Rozkład lokalnych odkształceń w przecie po kilku przepustach

Ustalenie sumarycznego odkształcenia lokalnego jako efektu kilku kolejnych, zróżnicowanych przepustów wymaga znalezienia metody obliczeń pozwalającej na sumowanie dla tych samych punktów materialnych odkształceń wywołanych w pojedynczym przepuszczeniu. Związanie odkształceń z punktami materialnymi, odpowiadającymi położeniu środków sworzni, było naturalną konsekwencją zastosowanej do wyznaczenia odkształceń metody składanych próbek. Możliwość prostego sumowania lokalnych odkształceń poprzez dodawanie uzyskano dzięki przyjęciu do ich określania zastępczego odkształcenia rzeczywistego, które jest addytywną miarą odkształcenia. Aby uzyskać możliwość sumowania lokalnych odkształceń dla dowolnego punktu przekroju, wprowadzono układ odniesienia wiążący każdorazowo punkty przekroju po poszczególnych przepustach z ich położeniem w przekroju wejściowym (kołowym). Opis rozkładu lokalnego odkształcenia w tym układzie sprowadza obliczanie odkształcenia w punkcie o współrzędnych (r_1, θ_1) do sumowania lokalnych odkształceń w przepustach

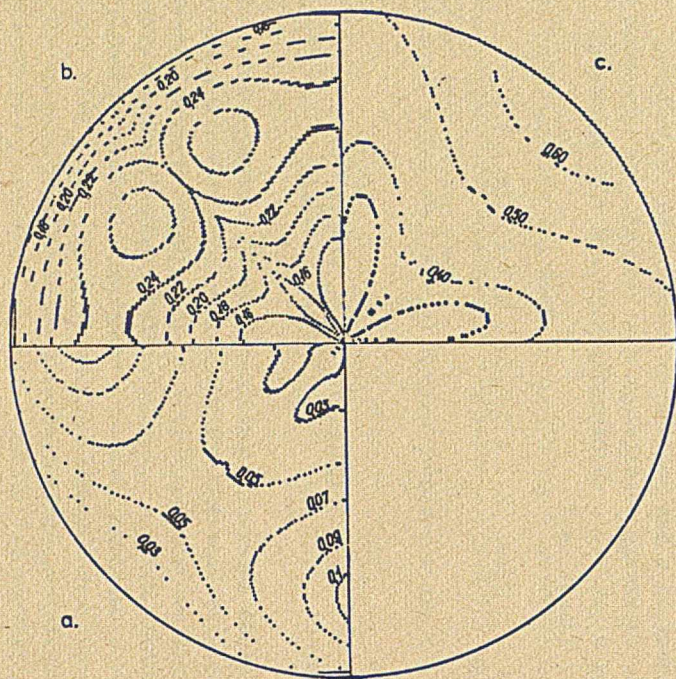
$$\varphi_s(r_1, \theta_1) = \varphi_{n-1}(r_1, \theta_1) + \varphi_n(r_1, \theta_1) \quad (5.20)$$

lub ogólnie w punkcie o współrzędnych (r_j, θ_j) po n-tym przepuszczeniu

$$\varphi_s(r_j, \theta_j) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(r_j, \theta_j) \quad (5.21)$$

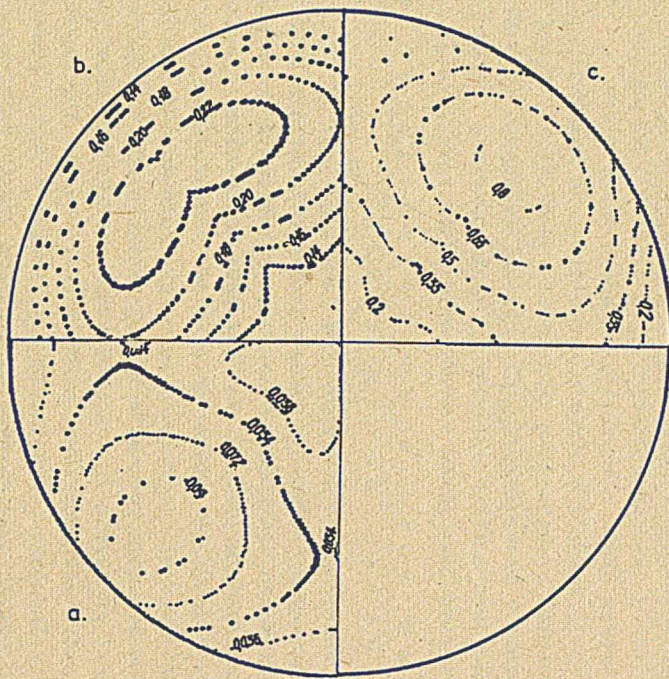
Opisu rozkładu odkształcenia funkcją (5.1) w nowym układzie współrzędnych dokonano, aproksymując wyniki pomiaru odkształceń w punktach odpowiadających sworzniom po przepuszczeniu i przypisując im położenia sworzni w przekroju wejściowym. Rozkład lokalnych odkształceń w układzie sprowadzonym do przekroju wejściowego przedstawiono graficznie na rysunkach 5.27 i 5.29, a wartości współczynników funkcji (5.1) w tabl. 5.11.

Rozkład lokalnych odkształceń po kolejnych przepustach przedstawiono na rysunkach 5.29 do 5.31.



Rys. 5.27. Rozkład odkształceń lokalnych sprowadzonych do przekroju wejściowego dla kalibrowania "koło-kwadrat":

a - mały gniot, b - średni gniot, c - duży gniot



Rys. 5.28. Rozkład odkształceń lokalnych sprowadzonych do przekroju wejściowego dla kalibrowania "kwadrat - ośmiokąt"

a - mały gniot, b - średni gniot, c - duży gniot

Tablica 5.11

Wartości współczynników i ocena statystyczna aproksymacji funkcji (5.1) lokalnych odkształceń sprowadzonych do wejściowego układu współrzędnych

Lp.	Parametry kucia	Wart. współcz. we wzorze (5.1)			Oszacowanie statystyczne	
		Współcz.	Wartość $A \times 10^n$		Współ. korel.	Kątowy wsp. dop.
			A	n		
1	2	3	4	5	6	7
1	Kalibr. "koło-kwadr." $\varphi_p = 0,036$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0	3,426 206 632	- 2	0,926 $\varphi_{\max} = 0,103$ $\theta = 45^\circ$ $r = 0,79$	0,931
		a_1	- 1,640 945 172	- 2		
		a_2	1,023 947 793	- 3		
		a_3	7,767 626 776	- 1		
		a_4	- 3,831 890 331	- 5		
		a_5	- 5,794 492 982	- 1		
		a_6	7,222 279 498	- 7		
		a_7	- 2,610 414 817	- 3		
2	Kalibr. "koło-kwadr." $\varphi_p = 0,148$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0	1,524 380 302	- 1	0,981 $\varphi_{\max} = 0,268$ $\theta = 31,5^\circ$ $r = 0,72$	0,997
		a_1	- 2,809 969 140	- 1		
		a_2	- 1,494 343 141	- 3		
		a_3	1,328 099 232	0		
		a_4	1,661 977 115	- 4		
		a_5	- 1,045 135 974	0		
		a_6	- 2,924 927 400	- 6		
		a_7	- 3,223 682 250	- 4		
3	Kalibr. "koło-kwadr." $\varphi_p = 0,369$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0	3,678 796 144	- 1	0,959 $\varphi_{\max} = 0,743$ $\theta = 45^\circ$ $r = 1,0$	0,988
		a_1	7,310 817 990	- 2		
		a_2	- 1,424 226 859	- 2		
		a_3	- 1,073 574 254	- 1		
		a_4	6,826 551 723	- 4		
		a_5	1,838 018 172	- 1		
		a_6	- 9,509 436 784	- 6		
		a_7	7,789 664 122	- 3		
4	Kalibr. "kwadrat- ośmiokąt" $\varphi_p = 0,036$ $v_p = 50 \text{ mm/s}$	a_0	3,649 306 724	- 2	0,944 $\varphi_{\max} = 0,104$ $\theta = 0,0$ $r = 0,77$	0,943
		a_1	- 7,122 253 136	- 1		
		a_2	- 2,003 426 809	- 3		
		a_3	3,653 868 164	- 1		
		a_4	6,219 029 003	- 5		
		a_5	- 3,295 448 246	- 1		
		a_6	- 7,444 109 884	- 3		
		a_7	2,511 535 150	- 3		

1	2	3	4	5	6	7
5	Kalibr. "kwadrat-ośmio- kąt" $\varphi_p = 0,125$ $v_p = 50$ mm/s	a_0	1,256 953 433	- 1	0,975	0,995 $\varphi_{\max} = 0,231$ $\theta = 32,5$ $r = 0,7$
		a_1	- 2,171 531 270	- 1		
		a_2	6,485 137 438	- 4		
		a_3	1,136 743 965	0		
		a_4	- 1,964 073 698	- 5		
		a_5	- 9,722 277 051	- 1		
		a_6	- 1,862 857 334	- 7		
		a_7	1,716 889 235	- 3		
6	Kalibr. "kwadrat-ośmio- kąt" $\varphi_p = 0,180$ $v_p = 50$ mm/s	a_0	1,796 352 765	- 1	0,997	0,996 $\varphi_{\max} = 0,822$ $\theta = 42^\circ$ $r = 0,74$
		a_1	- 1,033 785 333	0		
		a_2	- 4,760 054 567	- 3		
		a_3	4,952 737 937	0		
		a_4	3,728 725 664	- 4		
		a_5	- 4,250 485 286	0		
		a_6	- 7,302 422 137	- 6		
		a_7	1,612 679 194	- 2		
	Kalibr. "ośmiokąt- koło"		dla odpowiednich gniotów wartości wsp. zawiera tabl. 5.6 poz. 7, 8, 9			
	Kalibr. "ośmiokąt- koło"		patrz tabl. 5.6 poz. 10, 11, 12 (dla $v_p = 50$ mm/s) poz. 13, 14, 15 (dla $v_p = 25$ mm/s)			

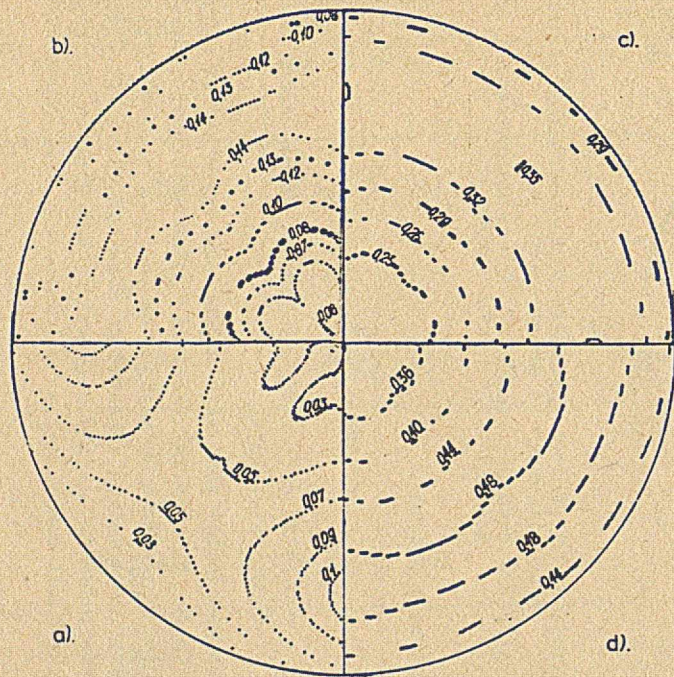
Analityczny opis rozkładu sumarycznych odkształceń jest możliwy przez dodanie poszczególnych współczynników funkcji (5.1). Do analizy rozkładu odkształcenia wprowadzono ponadto dwa wskaźniki:

- wskaźnik niejednorodności odkształcenia^{x)}

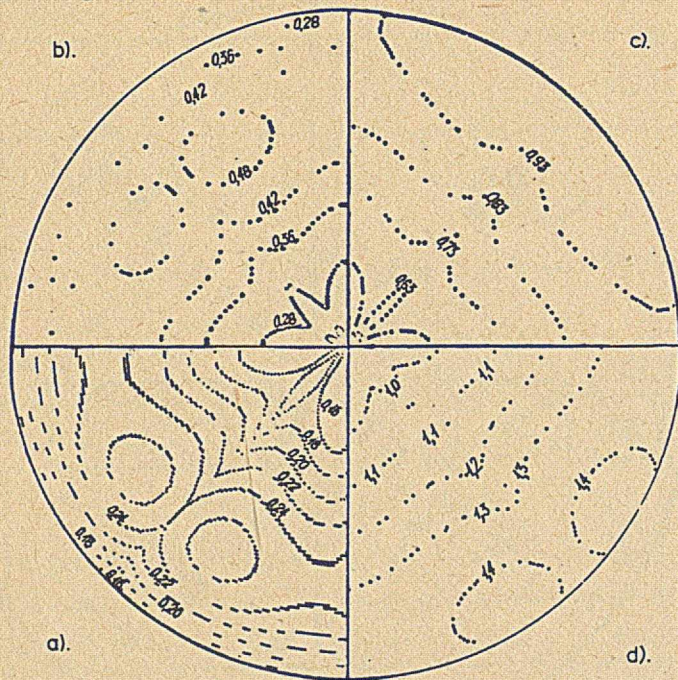
$$n_1 = \frac{\varphi_{\max}}{\varphi_p} \quad (5.22)$$

gdzie φ_{\max} - maksymalne odkształcenie lokalne,

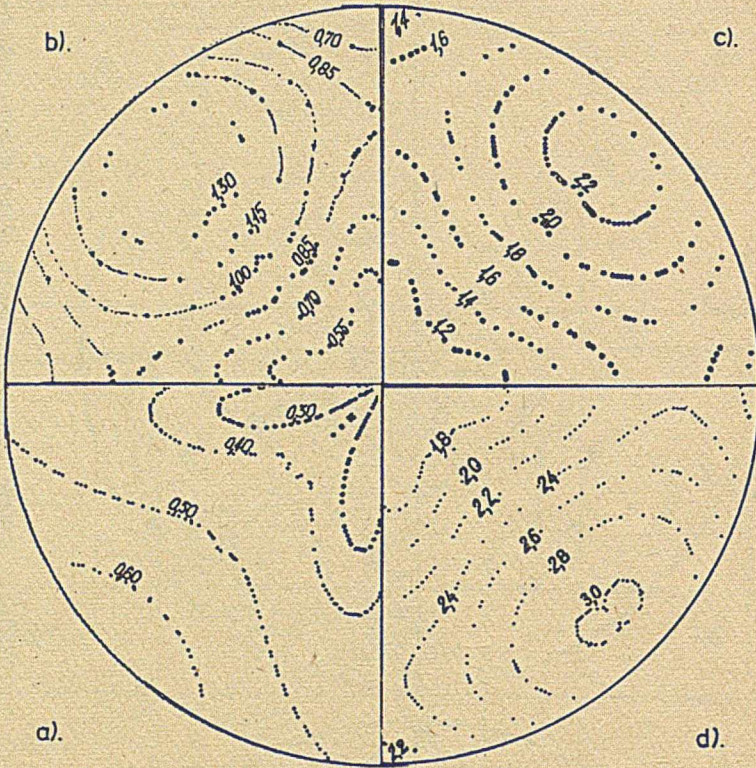
^{x)} Pod pojęciem niejednorodności odkształceń rozumiane jest zróżnicowanie odkształceń rozpatrywane w makroobszarze pomiędzy strefami lub warstwami materiału, tzn. niejednorodność odkształceń pierwszego rodzaju.



Rys. 5.29. Rozkład sumy lokalnych odkształceń sprowadzonych do przekroju początkowego po przepustach:
 a - "koło-kwadrat", b - "kwadrat-ośmiokąt", c - ośmiokąt-koło", d - "koło-koło" dla małego gniotu



Rys. 5.30. Rozkład sumy lokalnych odkształceń sprowadzonych do przekroju początkowego po przepustach:
 a - "koło-kwadrat", b - "kwadrat-śmiokąt", c - "ośmiokąt-koło", d - "koło-koło" dla średniego gniotu



Rys. 5.31. Rozkład sumy lokalnych odkształceń sprowadzonych do przekroju początkowego po przepustach:

a - "koło-kwadrat", b - "kwadrat-ośmiokąt", c - "ośmiokąt-koło", d - "koło-koło" dla dużego gniotu

- wskaźnik penetracji gniotu

$$n_2 = \frac{\varphi_{\min}}{\varphi_p} \quad (5.23)$$

gdzie $\varphi_{\min} = \varphi_0$ - minimalne odkształcenie lokalne równe odkształceniu w środku przekroju.

Wartości tych wskaźników oraz współrzędne punktu, w którym występuje φ_{\max} , podano w tabl. 5.5. Na ich podstawie można stwierdzić, że szczególnie korzystne jest stosowanie ze względu na penetrację gniotu - kalibrowania "koło-kwadrat" oraz dużych odkształceń w przepuście, a ze względu na jednorodność odkształcenia - stosowanie małych odkształceń w przepuście (φ_p) i dużych prędkości posuwu (v_p).

Tablica 5.12

Odształcenia lokalne w pręcie kutym wg technologii przyjętej dla kucia stali SKC

Lp.	Przebieg kucia: średnica przed- po przepuście prędkość posuwu $\frac{[mm]}{[mm/s]}$	Od- kształ- cenie w prze- puście	Od- kształ- cenie całko- wite	Odształcenie lokalne w odl. od osi							
				w przepuście				sumaryczne			
				0	0,3	0,6	0,9	0	0,3	0,6	0,9
1	$\frac{280 - 240}{50}$	0,308	0,308	0,298	0,311	0,350	0,381	0,298	0,311	0,350	0,381
2	$\frac{240 - 200}{50}$	0,345	0,653	0,335	0,349	0,393	0,430	0,633	0,660	0,743	0,811
3	$\frac{200 - 160}{50}$	0,446	1,099	0,436	0,452	0,512	0,562	1,069	1,112	1,255	1,373
1	jak wyżej				odkształt.wg [28]			1,082	1,120	1,140	1,215
2											
3											
4	$\frac{160 - 130}{25}$	0,415	1,514	0,421	0,436	0,481	0,515	1,490	1,549	1,736	1,888
1	jak wyżej				odkształt.wg [28]			1,494	1,541	1,596	1,776
2											
3											
4	$\frac{160 - 125}{50}$	0,494	1,593	0,484	0,501	0,568	0,625	1,553	1,613	1,823	1,998
5	$\frac{125 - 115}{25}$	0,167	1,760	0,169	0,178	0,198	0,212	1,722	1,791	2,021	2,210

Odkształcenia lokalne w prętach kutyh zgodnie z technologią stosowaną dla stali - SKC

Posługując się metodami interpolacyjnymi oraz wykorzystując kryteria podobieństwa geometrycznego, obliczono odkształcenia lokalne odpowiadające przepustom stosowanym przy kuciu prętów ze stali SKC. Następnie zsumowano odkształcenia lokalne w punktach odpowiadających położeniom sworzni leżących w odległościach 0 ; $0,3 R_z$; $0,6 R_z$ oraz $0,9 R_z$. Uzyskane wyniki zestawiono w tabl. 5.12, w której zamieszczono również wyniki uzyskane w pracy [28]. Porównanie tych wyników pozwala stwierdzić, że lokalne odkształcenia wyznaczone w pracy [28] są znacznie zaniżone w stosunku do wyznaczonych w niniejszych badaniach (uwaga ta dotyczy zewnętrznych warstw pręta). Przyczyny należy upatrywać w nieuwzględnieniu nieproporcjonalności przebiegu odkształcenia w czasie przejścia określonego punktu materialnego pręta przez kotlinę odkształcenia.

5.4.2. Cechy geometryczne przekroju prętów

Wyniki badań wpływu parametrów procesu kucia i cech geometrycznych na niekołowość i makronierówność prętów wykazały, że udział makronierowności jako składnika błędu kształtu jest znaczący jedynie dla małych prędkości posuwu. W miarę wzrostu prędkości wartość niekołowości wielokrotnie przewyższa makronierówność. Zarówno względy techniczne związane z trudnością wyodrębnienia na wykresach biegunowych (rys. 5.21) wielkości makronierowności, jak i względy praktyczne - nieznaczny wpływ na sumaryczny błąd kształtu, są podstawą do przyjęcia jako granicznej wielkości względnego przesunięcia $x' = 1,5$. Tej wartości odpowiadają prędkości przesuwu odpowiednio dla średnicy 40 mm - 30 mm/s , 80 mm - 60 mm/s oraz $120 - 40 \text{ mm/s}$.

Ponieważ makronierówność determinuje wielkość błędu kształtu przekroju jedynie dla małych prędkości ($x' \leq 1,5$) analizę wpływu parametrów kucia na makronierówność ograniczono tylko do tego zakresu prędkości. W wyniku przeprowadzenia testu istotności wpływu poszczególnych parametrów kucia i cech geometrycznych kowadka ustalono, że istotny (na poziomie istotności $0,05$) jest jedynie wpływ stopnia przylegania. Do ustatkowania ilościowych zależności przeprowadzono aproksymację funkcją

$$\frac{\bar{M}}{M_t} = C \quad (5.24)$$

gdzie:

M_t - makronierówność teoretyczna,

$M_t = 0,0034 d_g (1 - s)$.

\bar{M} - średnia wartość makronierowności obliczona dla przedziału $0 < x' < 1,5$.

Ustalono, że C jest istotnie różne od jedności i jest funkcją s (tabl. 5.13). Zależność tę można objaśnić wyrabianiem się części kalibrującej kowadła we wcześniejszych fazach kucia - poprzedzających kucie kalibrujące. Średnica kutego pręta jest w tej fazie kucia znacznie większa od średnicy gotowego wyrobu. Przy dużym dopasowaniu daje to tendencje do jego zmniejszenia, a przy małym stopniu - zwiększenia. Chcąc uzyskać ekstremalnie małą makronierówność, należałoby więc kucie kalibrujące prowadzić na specjalnie dobranych kowadłach, w których prowadzono by jedynie przejście kalibrujące.

W normalnych warunkach kucia dla określenia przybliżonej wartości makronierówności można posłużyć się wzorem:

$$M = 0,0034 \cdot C \cdot d_g(1-s) \quad (5.25)$$

gdzie C - współczynnik zależny od s (tabl. 5.13).

Wartości współczynnika $c = \frac{M}{M_t}$

Tablica 5.13

s	0,0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
c	0,70	0,75	0,8	0,85	0,9	1,10	1,35

Dla prędkości odkształcenia odpowiadającej wartości $x' > 1,5$ istotnym składnikiem określającym błąd kształtu przekroju jest niekołowość. Dla małych prędkości posuwu ($x' \leq 1,5$) przy właściwej nastawie kowadeł niekołowość jest równa makronierówności. W tym zakresie wpływy prędkości posuwu i wielkości gniotu są pomijalne. Narastają one w miarę wzrostu prędkości posuwu. Badania przeprowadzone na kowadłach o kontrolowanych założonych cechach geometrycznych pozwoliły uchwycić ilościową zależność wpływu poszczególnych czynników na niekołowość.

Wpływ stopnia przylegania (rys. 5.14) można uznać za istotny jedynie dla małej prędkości posuwu. W miarę jej wzrostu rozrzut uzyskiwanych wartości jest tak duży, że wychwycenie jego wpływu jest praktycznie niemożliwe, a wielkości są pomijalne.

W równaniu (4.40) wpływ stopnia przylegania reprezentuje w przybliżeniu wartość współczynnika "a".

Wpływ prędkości posuwu i wielkości gniotu jest szczególnie duży. Można stwierdzić, że wpływ tych czynników wzajemnie się potęguje. Znajduje to odbicie w przebiegach krzywych ilustrujących wpływ tych czynników na niekołowość (rys. 5.12 do 5.16) oraz wpływu na wartość współczynnika b we wzorze (4.40).

Przewidywany teoretyczny wpływ prędkości powiązany jedynie z zarysem wzdłużnej tworzącej jest, jak należało się spodziewać, powiększony występującymi sprężystymi odkształceniami elementów kowarki. Wielkością od-

kształceń sprężystych można również objaśnić współdziałanie gniotu w prze-
 ścią i prędkości podawania, które łącznie poprzez powierzchnię nacisku
 i gniot w uderzeniu decydują o sile nacisku kowadeł.

Na wykresach 5.15 i 5.16, ilustrujących wpływ parametrów kucia na ma-
 kronierówność i niekołowość przy różnych stopniach zużycia kowadeł, nanie-
 siono wielkości makronierówności i niekołowości określonych na podstawie
 pomiarów cech geometrycznych części kalibrującej kowadeł. Występujące w
 tych przypadkach różnice rzeczywistych cech geometrycznych prętów w sto-
 sunku do teoretycznych można objaśnić jedynie odkształceniami sprężystymi
 elementów kowarki i specyfiką płynięcia materiału. Wyniki tych badań poz-
 walają również na stwierdzenie występowania nierównomiernego zużycia się
 narzędzi, co prowadzi do zakłócenia symetryczności obciążeń układu kowa-
 deł, a w dalszej konsekwencji do dużych niekołowości będących następstwem
 zróżnicowanego przylegania powierzchni kalibrującej do kutego materiału.
 Wywołany tym zróżnicowaniem efekt odpowiada niekołowości spowodowanej złą
 nastawą kowadeł. Nierównomierne obciążenie poszczególnych kowadeł może
 również spowodować negatywne efekty w eksploatacji, objawiające się nad-
 miernie intensywnym zużyciem się elementów kowarki. Praktycznym zalece-
 niem, pozwalającym na minimalizację negatywnego wpływu nadmiernego zuży-
 cia, jest stosowanie małych gniotów ($\xi_d \leq 0,18$) oraz prędkości posuwu (od-
 powiadających $x' \leq 1,5$).

Pomimo występowania w niektórych przypadkach (rys. 5.15c) tendencji do
 zmniejszenia niekołowości w miarę postępującego procesu zużycia narzędzi,
 nie należy wyciągać z tego wniosków o pozytywnym jego oddziaływaniu. Dla
 wszystkich badanych przypadków stwierdzono bowiem zdecydowany wzrost dys-
 persji wyników badań w miarę wzrostu stopnia zużycia.

Pozytywny wynik aproksymacji wyników badań prętów pochodzących z bie-
 żącej produkcji (rys. 5.19) pozwala na zastosowanie do obliczenia niekołow-
 wości wzoru:

$$N = a \cdot d_g \cdot \exp \frac{b \cdot v_p \cdot T_m}{d_g} \quad (5.26)$$

Zestawienie wartości współczynników a i b dla poszczególnych wartości
 względnego gniotu ξ_d (tabl. 5.14) wskazuje na zależność wartości współ-
 czynnika "b" od względnego gniotu ξ_d .

Istnienie tej zależności jest potwierdzeniem przewidywanego mechanizmu
 łącznego oddziaływania prędkości i gniotu. Współczynnik "b" można wyzna-
 czyć ze wzoru:

$$b = b_0 + b_1 \cdot \xi_d \quad (5.27)$$

w którym:

$$b_0 = 0,398$$

$$b_1 = 0,832$$

Tablica 5.14

Zestawienie wartości współczynników wzorów (5.6) i (5.26)

Gniot względny ξ_d	Współczynnik	
	a	b
0,063 - 0,083	0,00211	0,44248
0,125	0,00176	0,51848
0,166	0,00222	0,54474
0,250	0,00185	0,59700
0,333 - 0,375	0,00193	0,69169

Współczynnik korelacji dla aproksymacji funkcją (5.27) wynosi 0,99, co potwierdza dobre jej dopasowanie do opisywanych wyników. Uwzględniając zależność (5.26) i (5.27) oraz przyjmując przybliżoną wartość "a" = 0,002, niekołowość prętów o przekroju kołowym można obliczyć ze wzoru:

$$N = 0,002 \cdot d_g \cdot \exp \frac{(0,4 + 0,8 \cdot \xi_d) v_p \cdot T_m}{d_g} \quad (5.28)$$

Wyniki badań eksperymentalnych potwierdziły ogólne zależności ustalone w rozważaniach teoretycznych zarówno dla makronierówności (wzór (4.37)), jak i niekołowości (wzór (4.40)). Ustalone rozbieżności koryguje dla makronierówności współczynnik C (wzór (5.25)), a dla niekołowości współczynniki a i b (wzór (5.26)), przy czym współczynnik b jest funkcją względnego gniotu (ξ_d).

5.4.3. Struktura prętów

F a z a w ę g l i k o w a

Ocenę fazy węglkowej prowadzono przy użyciu skali porównawczej oraz metod metalografii ilościowej.

W pręcie o średnicy 280 mm (rys. 5.23) w całej objętości występuje w pełni zamknięta siatka eutektyki węglkowej w osnowie ferrytu stopowego. Eutektyka ta ma postać szkieletową lub pierzastą. Typ rozkładu, wielkość "oczka" i grubość siatki ledeburytu w odległości od 0 do 0,8 R_z od osi są podobne. Jedynie w tarczach 1,2 i 3 występują wydłużone "oczka" będące efektem wywołanych w tym odcinku pręta odkształceń plastycznych. Zdecydowanie różni się od pozostałych obszarów struktura w odległości 0,9 R_z od o-

si. Odnacza się ona znacznie mniejszym "oczkiem" i mniejszą grubością siatki ledeburytu.

W tarczy "1" można zaobserwować wyraźny efekt odkształcenia plastycznego. W tarczach od głowy do stopy wielkość "oczek" ma tendencje malejące, pomimo zmniejszenia się odkształcenia ($\varphi_p = 0,58$ dla głowy, $\varphi_p = 0,035$ dla stopy).

Ogólnie oceniając strukturę w przecie, należy stwierdzić, że jest ona bardzo silnie zróżnicowana - będąc prawie wiernym odbiciem struktury wlewka. Wskaźnikami liczbowymi charakteryzującymi zróżnicowanie struktury są: procent powierzchni zajmowanej przez fazę węglkową i wielkość pojedynczych węglików i skupisk węglików. Wahają się one odpowiednio w zakresach:

- 6,23% - 10,2%
- $1,9 \mu\text{m}^2$ - $20,8 \mu\text{m}^2$
- $350 \mu\text{m}^2$ - $2314 \mu\text{m}^2$.

W przecie o średnicy 160 mm w całym obszarze wyraźnie widoczny jest efekt odkształcenia plastycznego. Można zaobserwować dwa zjawiska:

- wyraźne wydłużenie "oczka" siatki ledeburytu, które nie we wszystkich przypadkach prowadzi jednak do przerwania ciągłości siatki,
- pogrubienie się pasm węglików, które jest spowodowane zbliżaniem się pasm siatki w obszarze styku jej "oczek".

Wyraźne efekty rozbitcia ciągłości siatki występują jedynie w obszarach odpowiadających tarczom "1, 2 i 3" w całym przekroju oraz w tarczach "4 i 5" w odległości większej od $0,3 R_z$ od osi pręta. Zjawisko "pogrubienia się" pasm węglików występuje wyraźnie na całej długości pręta w osi oraz w odległości $0,3 R_z$ oraz w tarczach 1 i 2 w odległości $0,6 R_z$.

W przecie o średnicy 130 mm utrzymuje się w osi pręta i w odległości $0,3 R_z$ tendencja do "pogrubienia się" pasm na całej długości pręta. W odległości $0,6 R_z$, a szczególnie $0,9 R_z$, pasma węglików ulegają wyraźnemu pocienieniu. Z wyjątkiem miejsc w odległości $0,9 R_z$ od osi, w pozostałym obszarze pręta można zaobserwować charakterystyczne "haki" będące pozostałością siatki ledeburytu. Nie zauważa się już struktury o zamkniętej siatce ledeburytu.

Pręty o średnicy 115 mm odznaczają się najbardziej jednorodną strukturą w kierunku długości pręta. Występują jednak zauważalne pozostałości rozkładu siatkowego węglików na odcinku od osi do $0,6 R_z$.

5.4.4. Korelacja pomiędzy lokalnym odkształceniem a strukturą

Próby znalezienia korelacji pomiędzy lokalnym odkształceniem a strukturą podjęto dla następujących wskaźników ilościowych wyrażających cechy struktury:

- średnia powierzchnia płaskiego przekroju pojedynczych węglików, \bar{S}_1 ,
- współczynnik zmienności wielkości pojedynczych węglików w próbce, V_w ,

- średnia powierzchnia skupiska węglików \bar{S} ,
- współczynnik zmienności wielkości skupisk węglików w próbce, V_S .

Do znalezienia korelacji posłużono się następującymi typami funkcji:

$$y = a_0 = a_1 x \quad (5.29a)$$

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad (5.29b)$$

$$y = a_0 \cdot \exp(a_1 \cdot x) \quad (5.29c)$$

$$y = a_0 \cdot x^{a_1} \quad (5.29d)$$

$$y = a_0 + a_2 \cdot \ln x \quad (5.29e)$$

Wyniki dokonanych prób aproksymacji były pozytywne dla ilościowych wskaźników opisujących wielkość pojedynczych węglików i ich skupisk.

W dociekaniach wstępnych spodziewano się, że procesy "rozdrabniania" węglików i skupisk węglików będą przebiegały z zachowaniem kryterium podobieństwa geometrycznego. Założono więc, że zmiana wielkości pojedynczych węglików oraz ich skupisk, odniesiona do wielkości początkowej, da możliwość znalezienia uniwersalnej zależności uwzględniającej wielkość początkową pojedynczych węglików oraz ich skupisk.

Przeprowadzona analiza wykazała jednak istotny wpływ na przebieg "rozdrabniania" bezwzględnej wielkości początkowej tych cech fazy węglikowej. Dla dużych węglików i skupisk przebieg procesu "rozdrabniania" był bardzo intensywny, a dla małych - powolny. Dla uwzględnienia tego zjawiska dokonano podziału poszczególnych obszarów analizy na grupy w zależności od początkowej wielkości węglików i ich skupisk, przyjmując następujące przedziały wielkości w μm^2 :

<u>Przedział</u>	<u>dla węglików</u>	<u>dla skupisk</u>
I	2 ÷ 5	300 ÷ 650
II	5 ÷ 8	650 ÷ 1000
III	8 ÷ 11	1000 ÷ 1350
IV	11 ÷ 14	1350 ÷ 1700
V	14 ÷ 17	1700 ÷ 2050
VI	17 ÷ 21	2050 ÷ 2400

Dla tak rozdzielonych grup wyników największe korelacje uzyskano dla funkcji (5.31c), która po podstawieniu odpowiednich oznaczeń i współczynników przyjmuje postać:

- dla pojedynczych węglików

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_1^0 \cdot \exp \cdot a_1 \cdot \varphi \quad (5.30)$$

Tablica 5.15

Średnia wielkość pojedynczych węglików oraz skupisk węglików w prętach ze stali SKC odkutych w kowarce

Średnica pręta mm	Miejsce oceny	Średnia pow. pojed. węgl. \bar{S}_1 [μm]					Średnia pow. skupiska węgl. \bar{S} [μm]				
	Nr tarczy odległość od osi	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
280	0	21,0	18,4	18,2	19,0	10,9	1844	1846	1776	2314	2237
	0,3 R _z	12,8	12,5	9,9	10,0	7,1	1004	1562	1571	1481	1561
	0,6 R _z	7,0	7,1	5,0	6,0	4,5	866	736	1326	1004	1018
	0,9 R _z	2,2	4,1	2,2	4,1	2,6	638	562	400	350	800
160	0	13,9	12,0	11,8	12,0	8,0	1274	1802	1290	1615	1514
	0,3 R _z	8,0	8,5	6,6	7,0	5,2	960	1056	1049	1031	948
	0,6 R _z	4,6	4,9	4,0	4,0	3,0	830	582	986	843	742
	0,9 R _z	1,9	2,8	1,9	2,5	2,0	408	406	380	290	529
130	0	10,5	9,0	8,0	8,5	6,5	1009	920	1110	1272	1172
	0,3 R _z	7,5	7,0	5,0	5,8	4,2	854	882	847	835	1004
	0,6 R _z	3,8	3,8	3,2	3,3	2,3	676	526	748	735	636
	0,9 R _z	1,5	1,8	1,6	1,7	1,7	382	357	283	260	389
115	0	8,0	7,5	8,1	8,2	5,0	920	892	890	1056	1162
	0,3 R _z	6,1	6,0	4,2	4,9	4,0	766	699	778	701	783
	0,6 R _z	3,2	3,3	2,8	2,8	2,0	584	474	541	566	580
	0,9 R _z	1,3	1,5	1,1	1,2	1,2	331	314	254	248	319

- dla skupisk węglików

$$\bar{S} = \bar{S}^0 \cdot \exp \cdot a_1 \cdot \varphi \quad (5.31)$$

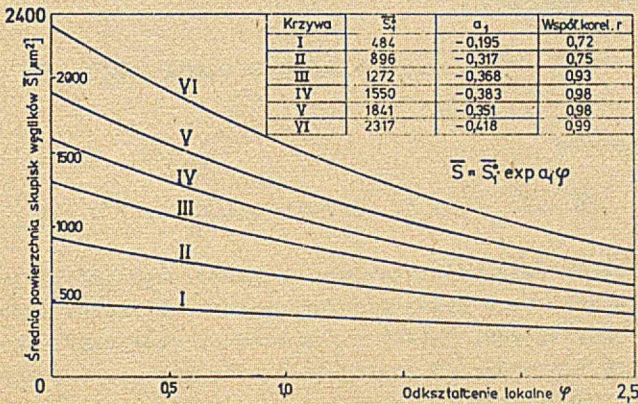
gdzie:

- \bar{S}_1, \bar{S} - wartości średnie odpowiednio węglików i skupisk węglików po odkształceniu,
- \bar{S}_1^0, \bar{S}^0 - średnia początkowa wielkość odpowiednio węglika i skupiska węglików (tabl. 5.15),
- φ - odkształcenie rzeczywiste,
- a_1 - współczynnik (tabl. 5.15).

Wartości współczynników a_1 wykazują zależność od wartości początkowej wielkości pojedynczych węglików oraz skupisk węglików. Wyznaczenie funkcji $a_1(\bar{S}_1^0)$ oraz $a_1(\bar{S}^0)$ pozwala na wyrażenie analizowanych cech struktury zależnościami o charakterze ciągłym:

- dla pojedynczych węglików

$$\bar{S}_1 = \bar{S}_1^0 \cdot \exp [(a_1 \cdot \bar{S}_1^0) \cdot \varphi] \quad (5.32)$$



Rys. 5.32. Wpływ odkształcenia na wielkość pojedynczych węglików

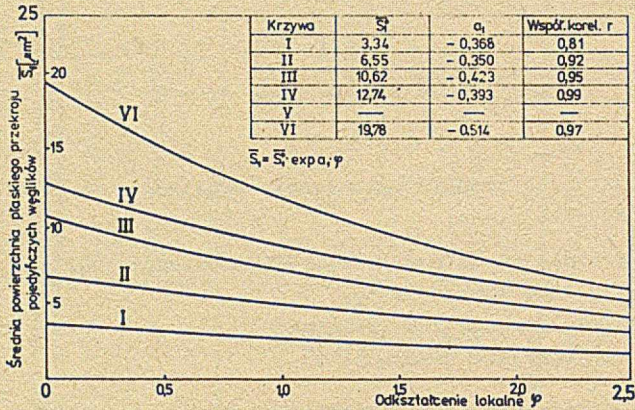
- dla skupisk węglików

$$\bar{S} = \bar{S}^0 \cdot \exp [a_1(\bar{S}^0) \cdot \varphi] \quad (5.33)$$

Stosując metody aproksymacji, wyznaczono funkcje:

$$a_1(\bar{S}_1^0) = -0,313 - 0,009 \cdot \bar{S}_1^0 \quad (5.34)$$

$$a_1(\bar{S}^0) = -0,190 - 0,00011 \cdot \bar{S}^0 \quad (5.35)$$



Rys. 5.33. Wpływ odkształcenia na wielkość skupisk węglików

Podstawiając te zależności odpowiednio do wzorów (5.32) i (5.33), uzyskano wzory pozwalające obliczyć wielkość węglików oraz skupisk węglików dla danej wielkości początkowej elementów struktury oraz lokalnych odkształceń:

- dla pojedynczych węglików

$$S_1 = S_1^0 \cdot \exp [(- 0,313 - 0,009 \cdot S_1^0) \cdot \varphi] \quad (5.36)$$

- dla skupisk węglików

$$S = S^0 \cdot \exp [(- 0,190 - 0,00011 \cdot S^0) \cdot \varphi] \quad (5.37)$$

Dla współczynników zmienności zarówno wielkości węglików, jak i skupisk węglików nie udało się wyznaczyć funkcyjnej zależności tych wielkości od lokalnych odkształceń. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że stwierdzono jednakże ogólną tendencję do zmniejszania się tych wskaźników w miarę wzrostu wielkości odkształceń.

Pozytywny wynik przeprowadzonych prób ilościowego ujęcia związków pomiędzy odkształceniem a wybranymi cechami struktury pozwala na wiązanie z tym kierunkiem badań dużych nadziei. Należy jednakże zdać sobie sprawę, że zakres przeprowadzonych badań był z konieczności ograniczony. Dopiero nagromadzenie odpowiednio bogatego materiału eksperymentalnego pozwoli na stworzenie nowych możliwości w zakresie prognozowania i kształtowania własności materiału w wyrobach hutniczych.

Uzyskane wyniki należy więc traktować jako wstępną próbę szukania ilościowych korelacji pomiędzy lokalnym odkształceniem a strukturą. Główny wysiłek w dalszych pracach z tego zakresu należy skupić na doskonaleniu metodyki ilościowej oceny struktury oraz doskonaleniu wyznaczania lokalnych odkształceń. W zakresie metod metalografii ilościowej chodzi głównie o

maksymalne ujednoczenie i sformalizowanie toku postępowania przy wyznaczaniu wartości liczbowej wskaźnika zarówno na etapie preparatyki doboru parametrów pracy automatycznych analizatorów obrazu, jak również obliczania wskaźników do oceny struktury. W zakresie rozwoju metodyki wyznaczania odkształceń lokalnych należy szerzej poznać wpływ wielkości obszaru analizy oraz niejednorodności własności materiału w danym obszarze na wielkość niejednorodności odkształceń pierwszego rodzaju.

6. WNIOSKI

Wyniki badań, stanowiące podstawę matematycznego opracowania opisu przebiegu odkształcenia w procesie kucia w kowarce oraz wpływu tego procesu na strukturę, w pełni potwierdziły tezę pracy.

- 1) Rozważania teoretyczne pozwoliły wyznaczyć parametry opisujące przebieg odkształcenia nadanego w kowarce, tzn. odkształcenia w pojedynczym uderzeniu, odkształcenia w przepuście, średnią prędkość odkształcenia, prędkość kształtowania oraz czasy odkształcania i przerw między odkształceniami. Parametry te są podstawą doboru warunków kucia z uwzględnieniem charakterystycznych własności technologicznych materiału. Analiza teoretyczna pozwoliła również na uchwycenie ogólnych tendencji wpływu parametrów kucia na cechy geometryczne wyrobów.
- 2) Eksperymentalne badania przebiegu i rozkładu lokalnych odkształceń w przekroju pręta pozwoliły na sformułowanie następujących stwierdzeń:
 - przebieg lokalnych odkształceń w czasie przejścia materiału przez kotłnię odkształcenia jest nieproporcjonalny i niemonotoniczny;
 - lokalne odkształcenie wywołane w przepuście ma wartość najmniejszą, równą w przybliżeniu odkształceniu obliczonemu ze zmiany wymiarów zewnętrznych, w środku przekroju; w pozostałych obszarach przekroju jest zdecydowanie zróżnicowane w zależności od sposobu kalibrowania i parametrów kucia;
 - dla przepustu "koło - koło" lokalne odkształcenie w przekroju pręta można wyznaczyć z opracowanej w pracy zależności (5.14) ujmującej wpływ: odległości punktu przekroju od osi pręta (r) oraz wielkości gniotu (Δd) i prędkości posuwu (v_p);
 - dla przepustów typu "koło - kwadrat", "kwadrat - ośmiokąt", "ośmiokąt - koło" lokalne odkształcenie jest funkcją współrzędnych punktu przekroju (r, θ) oraz gniotu w przepuście (Δd); wyznaczenie wartości lokalnych odkształceń dla tych przepustów jest możliwe poprzez interpolację wyników badań rozkładu lokalnych odkształceń wyznaczonych eksperymentalnie i opisanych matematycznie (wzór (5.1)) w pracy;
 - do wyznaczenia rozkładu lokalnych odkształceń w przekroju pręta po kilku przepustach można zastosować opracowaną w pracy metodę opartą na zasadzie superpozycji, wykorzystując oddytywność przyjętej miary odkształcenia.
- 3) Struktura prętów odkutych w kowarce jest pod względem jednorodności i drobnoziarnistości szczególnie korzystna w warstwach zewnętrznych, co

jest wynikiem zarówno rozkładu struktury we wlewkach, jak i większych lokalnych odkształceń w tych obszarach pręta. Jednorodne odkształcenie w przekroju odkuwki oraz rozszerzenie możliwości kształtowania struktury można osiągnąć jedynie przez zastosowanie "kombinowanej" przeróbki plastycznej na prasie lub młocie i w kowarce.

- 4) Ustalono istnienie związków ilościowych pomiędzy użytymi w pracy wskaźnikami oceny fazy węglkowej oraz lokalnym odkształceniem, co ujmuje zależności (5.36) i (5.37). Uzyskanie zamierzonych rozkładów lokalnych odkształceń stwarza zatem nowe możliwości w zakresie świadomego, uwzględniającego zastosowanie, kształtowania struktury wyrobów hutniczych.
- 5) Zarówno studium literatury, jak i wyniki badań własnych podważają zasadność stosowania do oceny wpływu przeróbki plastycznej na strukturę i własności przyjętego powszechnie "stopnia przerobu" obliczanego na podstawie zmiany wymiarów zewnętrznych. Jak wykazano w pracy, zmiana wymiarów zewnętrznych nie determinuje rozkładu lokalnych odkształceń, które zależą bardzo silnie od warunków przebiegu procesu kształtowania.
- 6) Pręty odkute w kowarce odznaczają się nieosiągalną w konwencjonalnych procesach przeróbki plastycznej dokładnością wymiarów. Cechami geometrycznymi limitującymi osiąganą dokładność są uzyskane w przepuście wykańczającym "makronierówność" i "niekołowość" przekroju pręta. Najkorzystniejsze cechy geometryczne zarysu przekroju pręta są zdeterminowane przez makronierówność i są osiąganymi dla ustalonych cech geometrycznych narzędzi przy zastosowaniu małego względnego gniotu w przepuście ($\xi_g \leq 0,18$) i małej względnej prędkości posuwu ($\dot{x} \leq 1,5$). Zarys przekroju pręta dla dużych gniotów i prędkości posuwu jest zdeterminowany przez "niekołowość". Ustalone w pracy zależności (5.25) i (5.29) pozwalają na dobór cech geometrycznych kowadeł, prędkości posuwu i gniotu w przepuście, zapewniających uzyskanie zamierzonych cech geometrycznych, tzn. makronierówności i niekołowości przekroju pręta.

Reasumując, wyniki uzyskane w pracy pozwalają na świadomy dobór sposobu kalibrowania, cech geometrycznych kowadeł, gniotu w przepuście i prędkości posuwu, zapewniających uzyskanie zamierzonych cech geometrycznych oraz rozkładu lokalnych odkształceń, a w konsekwencji kształtowanie struktury w przekroju pręta.

Pełne wyjaśnienie wielu subtelnych zjawisk wymaga prowadzenia dalszych badań, w tym głównie doskonalenia metodyki ilościowej oceny struktury oraz wpływu wielkości obszaru analizy i niejednorodności własności materiału na niejednorodność odkształceń pierwszego rodzaju.

LITERATURA

1. Grosman F. i inni: Kowarki w przetwórstwie hutniczym. Wiadomości Hutnicze, nr 8-9, 1977 r.
2. Hojas H., Valencak M., Hobusch: Planung und Betrieb einer neuen Edeltstahlschmiede. Stahl. u. Eisen 94 (1974) nr 18 (s. 841-849).
3. Ebertshäuser H.: Schmiedemaschinen, Z ind. Fertig, 59, (1966) Nr 10, (s. 502-506).
4. Hojas H.: Die Entwicklung der Schmiedetechnik bis zu den Schmiedemaschinen. Berg-u. Hüttenmanische Monats. H, 121 (1976) nr 9 (s. 358-366).
5. Twardoch R., Rodek M.: Kowarki - nowoczesne urządzenia kuźnicze. Hutnik nr 6, 1977 (s. 290-294).
6. Pilch A., Hryckowian J.: Stosowanie kowarek w przetwórstwie hutniczym. Problemy Projektowe nr 3, 1977 r.
7. Kemshall G.E.: High Reduction Machines. Steel Times, 1973, nr 9, (s. 649-652).
8. Grosman F.: Podstawowe zagadnienia kucia w kowarkach do wstępnego przerobu. Materiały Ogólnopolskiego Seminarium Kuźniczego. Wisła 1976.
9. Hoskins K.R.: Application of a new rapid deformation process by means of a Kocks swing-forging machine. J. of The Iron and Steel Institute III 1973.
10. Blaimschein G., Grube M., Koch H.: Schmiede-Walzverfahren zur Erzeugung von Stabstahl. u. Eisen 95 (1975), nr 8 (s. 347-355).
11. Koch H.: Betriebserfahrungen mit der Schmiedewalzanlage zur Erzeugung von Stabstahl. Fachberichte Sprehsaal-Verlag. Coburg, z. 10 - 1976 r.
12. Waldherr E.: Planung. Bau und Erfahrungen mit einer neuen Schmiedeanlage. Stahl u. Eisen, 89 (1969), nr 8.
13. Kulmurg A.: Die Herstellung von Stabstahl aus Schnellarbeitsstahl mit einer Langschmiedemaschine. Materiały Sympozjum Naukowego "Postęp technologiczny stali szybko tnących". Wisła 1977.
14. Schmid H.E.: Qualitätskenngrößen von auf der Langschmiedemaschine erzeugtem Stabstahl aus S6-5-2 im Abmessungsbereich über 100 mm und deren Prüfmethode sowie Erörterung von Prüfverfahren der Karbidverteilung in Schnellarbeitsstählen mit den O.F.M. Materiały Sympozjum Naukowego "Postęp technologiczny w produkcji stali szybko tnących". Wisła 1977.
15. Koch H., Tuke K.H.: Der Schmiede - Walzprozess ein Sonderverfahren zur Herstellung von Halbzeug u. Stabstahl. Stofffluss-Stand der Technik und Zukunftsaussichten, "Der Kalibreur" Z. 29, 1978 r. (s. 31-66).
16. Radjuczenko Ju.S.: Rotacjonnoje obzatie. Maszynostrojenije. Moskwa 1972.
17. Ljubwin W.I.: Obrabotka metallow radialnym obzatiem. Maszynostrojenije. Moskwa 1975.
18. Mäkelä H.: Arbeitsweise und Leistung von Umlaufpressen. Werkstatttechnik u. Maschinenbau (1955), z. 8 (s. 381-383).
19. Uhlig A.: Näherungsweise Berechnung der Rundknetkraft aus der Fläche und dem mittlern Druck, Bänder-Blache-Rohre, 6 (1965 r. nr 4, s. 200-206).

20. Uhlig A.: Umformarbeit und Werkzeugkräfte bei einem idealisierten Rundknetvorgang. Metall. 19, 1965, z. 4, (s. 322-328).
21. Uhlig A.: Werkzeugbewegung und erzeugbare Formen beim Rundkneten. Werkstatt u. Betrieb, 98 (1965), z. 5, (s. 299-304).
22. Uhlig A.: Zur Berechnung und Messung der Werkzeugkräfte beim Rundkneten. Bender-Bleche-Rohre: 6 (1965) nr 2, (s. 87-92).
23. Uhlig A.: Über die Mase - und Formgenauigkeit beim Rundkneten von Aussenformen. Werkstatt u. Betrieb 100 (1967), z. 2 (s. 91-96).
24. Zwierzajew N.F.: Napraženoje sostojanije i usilie dieformacii pri rotacionnoj kowkie. Trudy LPI nr 238, Maszynostrojenije, Moskwa 1964.
25. Kegg R.L.: Mechanics of the rotary swaging process Trans. ASME, 1964, nr 4 (s. 317-324).
26. Prospekty firm produkujących kowarki: "GFM-Steyer", "Sack", T.H.Kie-sserling u. ALBRECHT, "USINE WECKER", "IARISTON BROWN".
27. Haller H.W.: Handbuch des Schmiedens. Carl Hanser Verlag, München 1971.
28. Cwajna J., Onderka J., Pustówka E.: Rozprawa doktorska. Wyd. Metalur-giczny Politechniki Śląskiej, Katowice 1978.
29. Pustówka E., Grosman F., Maciejny A.: Wpływ parametrów kucia na kowar-ce na jakość prętów ze stali szybko tnącej SW18. Materiały Sympozjum Naukowego. Postęp technologiczny w produkcji stali szybko tnących. Wis-za 1977.
30. Pustówka E., Maciejny A., Grosman F.: Dobór parametrów kucia stali szybko tnących w kowarkach. Zesz. Naukowe Pol. Śląskiej. "Hutnictwo". z. 18, 1979.
31. Praca zbiorowa: Podniesienie własności użytkowych stali szybko tnących poprzez modyfikację i obróbkę pozapiecową oraz dobór parametrów prze-róbki plastycznej i obróbki cieplnej. IIM Katowice 1975-1979 (Sprawo-zdania z pracy n-b - niepublikowane).
32. Patent P 2361521. 6 - (Austria).
33. Patent P 2361570. 5 - (Austria).
34. Unksow E.P.: Inżynieryjne metody roszczota usilij pri obrabotkie mie-tałków dawlenijem. Wyd. Maszgiz. Moskwa 1955.
35. Krause F.: Rundkneten. Fertigungstechnik und Betrieb 13. 1963 z. 7 (s. 452-456).
36. Osipow E.P.: Napraženoje sostojanije pri obzatił diska (pri rotacion-noj kowkie prutka czetiriema matricami, Trudy IM. wyd. 7, Akad. Nauk SSSR, Moskwa 1960 (s. 49-59).
37. Grosman F., Pustówka E.: Kotlina odkształcenia i przebieg odkształce-nia w procesie kucia w kowarkach, Hutnik, nr 7, 1979 r.
38. Geller Ju.A.: Instrumentalnyje stali. Mietałłurgija, Moskwa 1975.
39. Dzugutow M.Ja.: Platiczeskaja dieformacja wysokolegirowanych stalej i spławow. Wyd. Mietałłurgija. Moskwa 1971.
40. Andrejuk Ł.U., Tjulenzew G.G.: Analiticeskaja zawisimost soprotiwle-nija dieformacii mietałła ot tiempieratury, skorosti i stiepieni die-formacii. Stal nr 7, 1972, (s. 825-828).
41. Haberling E., Weigand H.H.: Wpływ przeróbki plastycznej na gorąco na rozwój struktury oraz przyrost twardości stali szybko tnących. TEU - Techn. Bericht Nr 2 1975 (s. 127-130), tk. IMZ T-258/76.
42. Chazanow J.O., Jegorow Ju.P.: Wlijanije rieżimow nagriewa i dieforma-cji na raznoziernistost wielicziny austenitnogo zierna stali R18. I.W.U.Z. Czornaja Mietałłurgija nr 11, 1976 (s. 140-144).
43. Rossard C., Blain P.: Badanie plastycznych odkształceń stali na gora-co. Obr. Plast. z. 1, 1960 (s. 7-58).

44. Valorinta V.: Wpływ temperatury i prędkości odkształcenia na opór plastyczny stali przy kuciu. Obr. Plast. z. 2, 1960, (s. 59-71).
45. Kroneis M., Skamletz Th.: Werkzeugformen zum Streckschmieden von schwerverformbaren Stählen, Stahl u. Eisen 83/1963, (s. 1-8).
46. Krineis M.: E tude du forgeage de Disques par Refoulement Revue de Metal. Nov. 1962 (s. 953-958).
47. Pawelski P.: Theoretische Grundlagen des Freiformschmiedens.
48. Lipowczan J., Szafraniec B.: Podstawowe zależności między parametrami wymiarowymi kowadeł wykrojowych a materiałem kutym. Hutnik Nr 2, 1976 (s. 74-82). Stahl u Eisen Nr 4, 1974 (s. 158-163).
49. Mulders O.: Erzeugung von in den Deutschen Edstahlwerken. DEW. Techn. Bericht Nr 3, 1971 (s. 111-117).
50. Geller Ju.A.: Ob učezszenije struktury bystrorieżuszczej stali wslitkie, prokatkie i prokawkach. Stal Nr 9, 1963, (s. 831-834).
51. Geller Ju., Mininon R.D.: Ewtiektika bystrorieżuszczich stalej. Stal Nr 6, 1970 (s. 549-552).
52. Mucka J., Sykora J.: Wpływ stopnia przekucia na usuwanie niejednorodności węglików ze stali szybko tnącej CSN 15800, 19824 oraz problem za stosowania większych wlewków, Hutn. Listy, Nr 10, 1963 (s. 711-718).
53. Hoyle G., Ineson H.: Modyfikation of the cast structure of high-speed steel. J. Iron Steel Inst. 193, nr 3/1959 (s. 254-269).
54. Doronin W.M., Winogradow J.W.: Wpływ składu chemicznego i stopnia odkształcenia na niejednorodność węglkową w stalach szybko tnących, Stal nr 7, 1969 (s. 12-17).
55. Dzugutow M.Ja.: Kuzmiezchno Sztampowocznoje Proizw. nr 5/1964 (s.7-12).
56. Ochrimienko Ja.M., Tiurin W.A.: Nierawnomiermost dieformacjii pri kowkie. Wyd. Maszynostrojenije, Moskwa 1969.
57. Heil H.P.: Umformbedingungen und Gestaltung der Werkzeuge beim Freiformen. Praca doktorska. Technische Hochschule, Aachen 1970.
58. Zagorski W.J. i inni: Technologia przeróbki stali szybko tnących (tłum.), Stal nr 8, 1973 (s. 738-748).
59. Winogradow Ju.W.: Issledowanije karbidnoj nieodnorodnosti w prutkach stali R18 połączonych metodom goriaczego priessowanija. Kuznieczno-Sztampow. Proizw. Nr 3, 1969 (s. 9-13).
60. Radowicki K., Matusiewicz H.: Sprawozdanie z pracy badawczej nr 496. Bibl. IMŻ.
61. Rondak A. i inni: Einfluss der Herstellungsbedingungen auf die Gleichmässigkeit des Gefüges von molybdenreichem Schnellarbeitsstählen. Archiv. f. Eisenhüttenwesen. Nr 10, 1965 (s. 725-736).
62. Patent Nr 3, 290, 936 (U.S.A.).
63. Ogorodnikow W.A.: Ocienka dieformirujemosti mietalżkow pri obrabotkie dawlenijem. Kuzn. Sztampow. Proizw. Nr 3, 1977 (s. 15-17).
64. Stuhl J.: Współzależności pomiędzy parametrami struktury i własnościami użytkowymi stali szybko tnących. Materiały Sympozjum nt. Postęp technologiczny w produkcji stali szybko tnących. Wisła 1977.
65. Pr. zb.: Ujednolicenie zapisu stopnia przerobu. Spraw. IMŻ nr 102.
66. Małciniak Z.: Wyznaczenie wskaźnika odkształcenia plastycznego dla dużych odkształceń. Prace Instytutu Mechaniki, 1956.
67. Ryś J.: Wstęp do metalografii ilościowej. Wyd. Śląsk, Katowice 1970.
68. Cwajna J. i inni: Ilościowa ocena niejednorodności rozmieszczenia węglików w stalach szybko tnących. Materiały konferencji nt. Stale szybko tnące. Wisła 1979.

69. Cwajna J. i inni: Ilościowa ocena kształtu i wielkości węglików w półwytwarzach ze stali szybko tnących. Materiały konferencji nt. Stale szybko tnące, Wisła 1979.
70. Cwajna J., Hetmańczyk M., Maciejny A.: Ocena niejednorodności ziarna osnowy w hartowanych stalach szybko tnących. Hutnik nr 5/1977 (str. 233-240).
71. Żmihorski E.: Stale narzędziowe i obróbka cieplna stali narzędziowych. WNT, Warszawa 1976.
72. Fiedorow W.W.: Teoria optymalnego eksperymentu. Wyd. Nauka, Moskwa 1971.
73. Mańczak K.: Technika planowania eksperymentu. WNT, Warszawa 1976.

S t r e s z c z e n i e

W części pracy zawierającej studium literatury dokonano uporządkowania i weryfikacji dotychczasowych poglądów w odniesieniu do wstępnego przerobu w kowarkach oraz wpływu procesu przeróbki plastycznej na strukturę metali.

Badania własne objęły analizę teoretyczną i eksperymentalną procesu kowarkowego. W zakresie teoretycznej analizy procesu opisano kotlinę odkształcenia oraz przebieg odkształceń, który określono odkształceniem w przepuszczeniu, odkształceniem w pojedynczym uderzeniu, prędkością odkształcenia, czasami odkształcania i przerw między odkształceniami pojedynczymi i przepustami. Przeprowadzono również teoretyczną analizę wpływu warunków kucia na cechy geometryczne wyrobu i ustalono wielkości ograniczające zakres zmienności parametrów kucia. W badaniach eksperymentalnych ustalono wpływ parametrów kucia na rozkład lokalnych odkształceń, cechy geometryczne i strukturę odkutych prętów. Uzyskane wyniki ujęto w formie zależności matematycznych.

Dla wybranych, określonych metodami metalografii ilościowej, cech struktury ustalono zależności funkcyjne pomiędzy lokalną strukturą w odkutym pręcie a odpowiadającym mu lokalnym odkształceniem i strukturą wsadu. Takie ujęcie wpływu procesu przeróbki na strukturę wyrobów hutniczych stwarza nowe możliwości w zakresie kształtowania własności zdeteminowanych zastosowaniem finalnym produktu.

Резюме

В части работы, содержащей изучение литературы, сделаны упорядочение и установление достоверности существующих до сих пор взглядов по отношению к предварительной переработке в ковочных машинах, а также влиянию процесса пластической переработки на структуру металлов. Собственные исследования заключили в себе теоретический и экспериментальный анализы процессаковки. В области теоретического анализа процесса описаны горное гнездо деформаций, а также ход деформаций, который определен деформацией в пропуске, деформацией в отдельном ударе, скоростью деформации, продолжительностью деформации и промежутков между отдельными деформациями и пропусками. Проведен тоже теоретический анализ влиянияковки на геометрические свойства изделия и установлены величины, ограничивающие предел вариантности параметровковки. В экспериментальных исследованиях определены влияние параметровковки на распределение местных деформаций, геометрические свойства и структура откованных прутков. Полученные результаты представлены в форме математических зависимостей. Для отобранных, определенных методами количественной металлографии свойств структуры, установлены функциональные зависимости между местной структурой в откованном прутке и отвечающей ему местной деформацией и структурой шихты. Такое истолкование влияния процесса переработки на структуру металлургических изделий создает новые возможности в области формования детерминированных финальным применением продукта свойств.

S u m m a r y

The part of paper containing the study of literature comprizes the arrangement and verification of up-tillnow existing views on the preliminary processing in swaging machines and on the influence of plastic working process on metal structure.

Investigations have covered theoretical and experimental analyses of swaging process. Theoretical analysis of the process contains the description of deformation roll-gap and the course of deformations which were defined as: deformations in roll-pass, deformation under single impact, speed of deformation, times of deformation and the gaps between single deformations and roll-passes. Theoretical analysis of the influence of forging conditions on geometrical characteristics of the product has been carried out and the quantities limiting the range of changeability of forging parameters have been determined.

In experimental test, the influence of forging parameters on the distribution of local deformations, geometrical characteristics and the structure of forged rods has been defined. Obtained results have been put into the form of mathematical dependances. Functional dependances between local structure in the forged rod and its corresponding local deformation and charge structure have been determined for the chosen structure characteristics defined by the methods of quantitative metallography.

Such approach to the influence of processing on the structure of metallurgical products creates new possibilities within the range of shaping properties determined by the final utilization of the product.

3353/80/22

WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻNA NABYC W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:

- 44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-094 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 053, ul. Wolności 22
41-306 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBOWID-u 3
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 163, Rynek 1
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN —
Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 8.