

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**

P. 3353/96

Antoni PIEŁA

**ZASTOSOWANIE NUMERYCZNEJ SYMULACJI
DO ANALIZY I PROJEKTOWANIA TECHNOLOGII
KUCIA W KOWARKACH**

HUTNICTWO

z. 52

**GLIWICE
1996**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE



Nr 1346

7.3353/96

Antoni Piela

**ZASTOSOWANIE NUMERYCZNEJ SYMULACJI
DO ANALIZY I PROJEKTOWANIA TECHNOLOGII
KUCIA W KOWARKACH**

OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Franciszek Grosman
Prof. dr hab. inż. Maciej Pietrzyk

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY – Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski
REDAKTOR DZIAŁU – Dr hab. inż. Stanisław Serkowski-
Prof. Politechniki Śląskiej
SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Elżbieta Leško

REDAKCJA

Mgr Aleksandra Kłobuszowska

REDAKCJA TECHNICZNA

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0324 - 802X

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
ul. Kujawska 3, 44 - 100 Gliwice

Nakł. 110+83 Ark. wyd. 12 Ark. druk. 7,5 Papier offset. kl. III 70 x 100, 80 g
Oddano do druku 9. 10. 1996 Podpis. do druku 9. 10. 1996 Druk ukończ. w październiku 1996
Cena 12,00

Fotokopie, druk i oprawę wykonał: "ROLEK", Gliwice, ul. Kazimierza Wielkiego 4

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	7
1. WSTĘP	11
2. STUDIUM LITERATURY	13
2.1. Kowarki do wstępnego przerobu	13
2.2. Geometryczna kotlina odkształcenia	15
2.3. Analiza pływnięcia metalu w kotlinie odkształcenia	23
2.4. Siła kucia w kowarce	36
2.5. Wpływ procesu kucia w kowarce na strukturę i własności wyrobu	40
2.6. Podsumowanie przeglądu literaturowego	43
3. DOBÓR TEMATU I JEGO UZASADNIENIE	45
4. CEL, TEZA I PLAN PRACY	48
5. ANALIZA PROCESU KOWARKOWEGO	50
5.1. Model fizyczny	50
5.2. Model dyskretny	58
6. PRZYKŁADY ANALIZ ORAZ WERYFIKACJA WYNIKÓW NUMERYCZNEJ SYMULACJI PROCESU KOWARKOWEGO	60
6.1. Parametry technologiczne oraz warunki brzegowe wprowadzone do obliczeń numerycznych	60
6.2. Wyniki obliczeń oraz ich analiza	63
6.3. Weryfikacja wyników obliczeń numerycznych	72
7. PRAKTYCZNE MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA WYNIKÓW SYMULACJI W PROJEKTOWANIU TECHNOLOGII PROCESU KOWARKOWEGO	88
7.1. Sterowanie rozkładem odkształceń lokalnych w odkutych pretach	88
7.2. Analiza zmienności wskaźnika stanu naprężenia w kotlinie odkształcenia	91
7.3. Przebieg zmian temperatury materiału w procesie kowarkowym	95
8. PRZYJĘTE ZASADY OPRACOWANIA PROGRAMU WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA TECHNOLOGII KUCIA W KOWARCE	98
9. PROGRAM PROJEKTOWANIA TECHNOLOGII KUCIA W KOWARCE	103
10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	108
LITERATURA	110
STRESZCZENIE	118

CONTENTS

SPECIFICATION OF MORE IMPORTANT DENOTATIONS	7
1. INTRODUCTION	11
2. LITERATURE REVIEW	13
2.1. Swaging machines for preliminary processing	13
2.2. A geometrical deformation gap	15
2.3. Analysis of metal flow in the deformation gap	23
2.4. Forging force in a swaging machine	36
2.5. The effect of forging process in a swaging machine on the product's structure and properties	40
2.6. Summary of the literature review	43
3. THE SUBJECT'S CHOICE AND ITS JUSTIFICATION	45
4. OBJECTIVE, PROPOSITION AND PLAN OF THE THESIS	48
5. ANALYSIS OF SWAGING PROCESS	50
5.1. A physical model	50
5.2. A discrete model	58
6. EXAMPLES OF ANALYSES AND VERIFICATION OF RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF THE SWAGING PROCESS	60
6.1. Technological parameters and boundary conditions introduced in numerical calculations	60
6.2. Results of calculations and their analysis	63
6.3. Verification of numerical calculations results	72
7. PRACTICAL POSSIBILITIES OF USING THE RESULTS OF SIMULATIONS IN DESIGNING THE TECHNOLOGY OF THE SWAGING PROCESS	88
7.1. Control of local deformations distribution in forged bars	88
7.2. The analysis of variability of the stress state factor in the deformation gap	91
7.3. The course of material's temperature changes in the swaging process	95
8. ASSUMED PRINCIPLES OF WORKING OUT A PROGRAMME FOR COMPUTER-AIDED DESIGNING OF FORGING TECHNOLOGY IN A SWAGING MACHINE	98
9. A PROGRAMME FOR DESIGNING A FORGING TECHNOLOGY IN A SWAGING MACHINE	103
10. SUMMARY AND CONCLUSION	108
REFERENCES	110
ABSTRACT	119

TABLE DES MATIERES

LISTE DES SIGLES PLUS IMPORTANTS	7
1. INTRODUCTION	11
2. ETUDE DE LA LITTERATURE	13
2.1. Forgeuses pour le prétraitement	13
2.2. Emprise géométrique de déformation	15
2.3. Analyse de l'écoulement du métal dans l'emprise de déformation	23
2.4. Effort de forgeage sur la forgeuse	36
2.5. Influence du procédé de forgeage sur la forgeuse sur la structure et les caractéristiques du produit	40
2.6. Conclusion de l'étude de la littérature	43
3. CHOIX DU SUJET ET SA MOTIVATION	45
4. BUT, THESE ET PLAN DU MEMOIRE	48
5. ANALYSE DU PROCEDE DE FORGEAGE	50
5.1. Modèle physique	50
5.2. Modèle discret	58
6. EXEMPLES DES ANALYSES ET VERIFICATION DES RESULTATS DE LA SIMULATION NUMERIQUE DU PROCEDE DE FORGEAGE	60
6.1. Paramètres technologiques et conditions aux limites introduits aux calculs numériques	60
6.2. Résultats des calculs et leur analyse	63
6.3. Vérification des résultats des calculs numériques	72
7. POSSIBILITES PRATIQUES D'UTILISATION DES RESULTATS DE LA SIMULATION A L'ETUDE DE LA TECHNOLOGIE DU PROCEDE DE FORGEAGE	88
7.1. Commande de la répartition des déformations locales dans les barres forgées	88
7.2. Analyse de la variabilité du taux de l'état de contrainte dans l'empreinte de déformation	91
7.3. Allure des variations de températures dans le procédé de forgeage	95
8. DONNEES DE BASE ADOPTEES POUR L'ETABLISSEMENT DU LOGICIEL D'ASSISTANCE DE L'ETUDE DE LA TECHNOLOGIE DE FORGEAGE SUR LA FORGEUSE	98
9. LOGICIEL DE L'ETUDE DE LA TECHNOLOGIE DE FORGEAGE DANS LA FORGEUSE	103
10. CONCLUSIONS	108
BIBLIOGRAPHIE	110
RESUME	120

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

b_1, b_2	- współczynniki termoinercji materiałów pary trącej $b = \sqrt{k \rho c_p}$,
b_k	- szerokość kowadła,
b_{og}	- szerokość strefy odkształcenia,
B	- rzeczywista szerokość powierzchni kalibrującej kowadła,
c_p	- ciepło właściwe,
d	- średnica kutego pręta, odpowiednio $d_{n,1}$ przed przepustem i d_n po przepuście, d_0 początkowa oraz d_k końcowa,
d_g	- średnica wyrobu gotowego, pomiędzy kowadłami,
d_m	- średnica kutego pręta w płaszczyźnie podziałowej (obliczona wg zależności uproszczonych),
d_n', d_p	- średnica kutego pręta w płaszczyźnie podziałowej,
d_s, d_{SI}, d_{SII}	- średnia średnica pręta, odpowiednio dla obszarów I i II kotliny odkształcenia,
2D, 3D	- oznaczenie elementu, odpowiednio płaskiego i trójwymiarowego,
e	- mimośrodowość,
f	- wskaźnik niejednorodności odkształcenia,
f_u	- częstość uderzeń,
f_x	- strzałka ugięcia,
f^d	- wektor naprężeń pochodzący od obciążeń zewnętrznych,
F	- całkowita siła kucia, siła nacisku jednego kowadła,
h_k	- droga ruchu kowadła,
K	- funkcja $K_{(k,t,T,...)}$ opisująca własności reologiczne odkształcanego materiału,
k	- współczynnik przewodzenia ciepła,
k_o, k_r	- wskaźnik stanu naprężeń, $k_o = \sigma_m / \sigma_i$, $k_r = \sigma_m / \tau_i$,
l_k	- długość strefy kalibrującej,
l_r	- długość powierzchni roboczej kowadła,
l_i	- długość strefy redukcji przekroju,
l_I, l_{II}	- długość obszarów I i II strefy redukcji przekroju,
l_{og}	- długość strefy odkształcenia,
m	- wykładnik potęgowy, wskaźnik charakteryzujący czułość materiału na prędkość odkształcenia,
m_r	- czynnik tarcia,
M	- makronierówność,
n	- wykładnik potęgowy krzywej umocnienia,
"m", "n"	- płaszczyzna,
n_T	- liczba uderzeń kowadeł w czasie pełnego obrotu głowicy manipulatora,
n_x	- liczba wydzielonych warstw na długości kotliny odkształcenia,
N	- niekołowość,
p	- posuw materiału przy kuciu w kowarce, wykładnik charakteryzujący czułość materiałów pary trącej na prędkość poślizgu,
p_s	- skok linii śrubowej wyznaczony śladami uderzeń kowadła,
q	- średni nacisk jednostkowy,
Q	- energia aktywacji,
\dot{Q}	- prędkość generowania ciepła,
r_w	- promień wytoczenia kowadeł,

R	- promień kutego pręta,
R_x	- promień pierścienia, torusa,
s	- stopień przylegania,
S	- powierzchnia, powierzchnia przekroju poprzecznego pręta, odpowiednio S_{n-1} przed przepustem i S_n po przepuście, S_0 początkowa oraz S_k końcowa,
S_{ij}	- dewiator stanu naprężenia,
$\frac{S_T}{S_1}, \bar{S}$	- powierzchnia kontaktu narzędzia z odkształcanym materiałem, średnie pole powierzchni płaskiego przekroju węglików, odpowiednio pojedynczych węglików i skupisk węglików po odkształceniu,
$\bar{S}_1^\circ, \bar{S}^\circ$	- początkowe średnie pole powierzchni płaskiego przekroju węglików, odpowiednio pojedynczych węglików i skupisk węglików,
t	- czas,
t_g	- czas pełnego obrotu głowicy manipulatora,
t_k	- czas pełnego cyklu pracy kowadeł,
t_m	- czas manipulacji przed wprowadzeniem kutego pręta pomiędzy kowadła,
t_p	- czas przerw,
t_{pc}	- czas między wyjściem a ponownym wejściem w strefę odkształcenia przekroju pręta położonego w odległości "x" od jego końca,
t_r	- czas redukcji przekroju pręta w jednym przepuście,
t_u	- czas odkształcania w jednym uderzeniu kowadeł,
T	- temperatura, T, T_0 - temperatury ciał wymieniających ciepło,
T_I, T_{II}	- siła tarcia, odpowiednio dla obszarów I oraz II,
T_k	- temperatura kowadła,
v	- kinematycznie dopuszczalne pole prędkości,
v_k	- prędkość kształtowania, prędkość ruchu kowadeł,
v_p	- prędkość podawania,
$v_r, v_z, v_{r,z}$	- składowe wektora prędkości dla układu współrzędnych walcowych,
v_{uk}	- prędkość ruchu modelowanego układu kowadła - odkształcany materiał,
V	- objętość analizowanej bryły,
W	- moc kucia,
z	- współczynnik,
x	- odległość, wymiar liniowy,
x_i	- chwilowa współrzędna węzła siatki,
α	- współczynnik wymiany ciepła (zastępczy),
α_r	- kąt pochylenia części roboczej kowadła,
α_u	- kąt obrotu materiału między uderzeniami kowadeł,
α_w	- kąt pochylenia części wejściowej kowadła,
β	- temperaturowy wykładnik krzywej umocnienia,
γ_i	- intensywność odkształcenia postaciowego, pierwiastek kwadratowy drugiego niezmiennika dewiatora odkształcenia,
Δh	- gniot bezwzględny,
Δd	- gniot całkowity w przepuście, $\Delta d = d_{n-1} - d_n$
$\Delta d'$	- gniot w pojedynczym uderzeniu kowadeł,
Δt	- przyrost czasu,
Δv	- prędkość względnego ruchu odkształcanego materiału i narzędzia,
δ	- szerokość szczeliny między przyległymi kowadłami,
ε	- odkształcenie rzeczywiste (miara Hencky'ego),
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	- odkształcenie rzeczywiste główne,
$\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\rho, \varepsilon_\varphi$	- odkształcenie we współrzędnych sferycznych,

ε_k	- odkształcenie graniczne,
ε_i	- intensywność odkształcenia,
ε_p	- redukcja przekroju, odkształcenie w przejściu zależne od typu kalibrowania,
ε_z	- odkształcenie wzdłuż osi pręta, kierunku "z",
$\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{III}$	- odkształcenie lokalne w wydzielonych strefach I, II, III, na przekroju pręta,
$\dot{\varepsilon}$	- prędkość odkształcenia, $\bar{\varepsilon}$ - średnia prędkość odkształcenia,
$\dot{\varepsilon}_i$	- intensywność prędkości odkształcenia,
$\dot{\varepsilon}_{ij}$	- tensor prędkości odkształcenia,
$\dot{\varepsilon}_v$	- prędkość odkształcenia objętościowego,
ε_{poj}	- średnie odkształcenie dla pojedynczego uderzenia kowadeł,
$\bar{\varepsilon}_{poj}$	- średnia prędkość odkształcenia w jednym uderzeniu kowadeł,
ε	- współczynnik emisji,
φ_p	- odkształcenie pękania,
\mathcal{F}	- funkcjonal mocy odkształcenia,
Θ	- kąt opasania materiału kowadłami,
λ	- współczynnik wydłużenia,
λ_c	- współczynnik wydłużenia skumulowanego,
μ	- współczynnik tarcia,
σ	- naprężenie normalne,
σ_B	- stała Boltzmanna,
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	- naprężenia główne,
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	- naprężenia normalne, działające w płaszczyznach prostopadłych do osi układu współrzędnych kartezjańskich x,y,z,
σ_i	- intensywność naprężeń normalnych,
σ_m	- naprężenie średnie,
σ_p	- naprężenie uplastyczniające,
$\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$	- naprężenia normalne, działające w płaszczyznach prostopadłych do osi układu współrzędnych walcowych r,z, θ ,
σ_{po}	- początkowe naprężenie uplastyczniające dla danej temperatury,
τ	- naprężenie styczne, naprężenie tarcia,
$\tau_{\rho\varphi}, \tau_{rz}$	- naprężenie styczne na powierzchni ρ, φ - w układzie współrzędnych sferycznych, r, z - w układzie współrzędnych walcowych,
τ_i	- intensywność naprężeń stycznych,
ν	- współczynnik Poissona,
ϱ	- gęstość,
ϱ_p	- stała kary wynosząca 10^6 ,
Ω	- wydzielony obszar,
Φ	- gęstość strumienia cieplnego, Φ_c - dla wymiany ciepła przez konwekcję, Φ_r - dla wymiany ciepła przez promieniowanie,
Φ_p	- gęstość strumienia ciepła wytworzonego pracą sił tarcia.

Indeksy

i,j	- wskaźniki nieme,	α, ρ, φ	- współrzędne sferyczne,
r,z, θ	- współrzędne walcowe,	max	- wartość maksymalna,
n	- liczba naturalna lub zero,		

1. WSTĘP

Zadaniem nowoczesnych technologii jest wytwarzanie wyrobów o wysokiej jakości przy małej materiał- i energochłonności. Celem takiego procesu technologicznego oprócz otrzymania wyrobu o założonym kształcie i tolerancji wymiarów jest wytworzenie odpowiedniej struktury materiału, najkorzystniejszej ze względu na założone cechy użytkowe wyrobu. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w technologiach przeróbki plastycznej. Zapewnienie właściwej technologii jest możliwe poprzez komputeryzację zarówno etapu projektowania technologii, jak i etapu nadzoru i sterowania procesem. Zastosowanie technik komputerowych stwarza jednocześnie nowe możliwości racjonalnego wykorzystania rezerw tkwiących w każdym procesie technologicznym. Użyteczność technik komputerowych jest tym większa, im bardziej stabilne i sterowalne są założone parametry procesu. Warunki takie spełnia proces kowarkowy.

Celowość stosowania technik komputerowych w analizie, projektowaniu i sterowaniu procesu kowarkowego wynika również z faktu, iż kucie w kowarkach do wstępnego przerobu stosowane jest głównie dla stali wysokostopowych, w tym mało plastycznych, czułych na niedotrzymywanie parametrów technologicznych. Równocześnie specyfika tego procesu, związana ze sposobem podawania materiału i ruchem kowadeł powoduje, że odkształcenia lokalne na przekroju odkutego pręta są zróżnicowane. Wykorzystanie tych możliwości procesu kowarkowego uwarunkowane jest znajomością relacji pomiędzy parametrami technologicznymi a własnościami wyrobu, czyli warunkami rozwoju struktury. Struktura początkowa i cechy geometryczne wlewka wpływają w istotny sposób na strukturę kutego pręta, a głównie na jego odkształcalność w trakcie procesu. Otrzymanie wymaganej struktury zależne jest jednocześnie od wielkości odkształcenia (stopień przekucia) i od temperatury procesu, a wnikając głębiej w związki odkształcenie - struktura, od przyjętego schematu gniotów, wielkości odkształceń w przepuście, prędkości odkształcenia, czasu kształtowania i czasu przerw między kolejnymi uderzeniami kowadeł oraz kolejnymi przepustami. Uwzględnienie wymienionych czynników wpływających na strukturę materiału nie jest możliwe bez kompleksowego modelowania zjawisk zachodzących w strefie odkształcenia.

Szczególnie istotne w przypadku kucia w kowarce jest ustalenie nie tylko jakościowych, lecz głównie ilościowych związków opisujących relacje między parametrami technologii procesu a naprężeniami i odkształceniami, określenie rozkładu odkształceń jako wynik występującego schematu płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, a także wyznaczenie sił i energii kucia. Związki te stanowią podstawę modelu matematycznego, za pomocą którego analizowany jest proces kowarkowy. Jakość procesu modelowania, czyli stopień poprawności odwzorowania układu rzeczywistego, zależy w głównej mierze od:

- przyjętej funkcji celu,
- stopnia poznania praw rządzących analizowanym procesem,
- możliwości otrzymania zadowalających rozwiązań dla sterowalnych parametrów procesu,
- możliwości przeprowadzenia weryfikacji obliczeń i optymalizacji rozwiązań przy użyciu danych wzorcowych (wyniki pomiarów).

Prowadzenie weryfikacji jest konieczne głównie ze względu na występujące ograniczenia w procesach rzeczywistych. Podobnie niedoskonałość posiadanych rozwiązań modelowych ogranicza skuteczność działania komputerowej analizy procesu i wymusza prowadzenie permanentnej kontroli i weryfikacji wyników obliczeń.

Komputerowe projektowanie, a w dalszej kolejności sterowanie procesem technologicznym wymagają opracowania zweryfikowanych programów symulujących. Z kolei analiza płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, uwzględniająca zarówno specyfikę kinematyki procesu kowarkowego, jak i oddziaływanie warunków technologicznych, wymaga zastosowania metod numerycznych. Największe możliwości w tym zakresie daje metoda elementów skończonych (MES). W przypadku kucia w kowarce, najlepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie pełnego modelu trójwymiarowego. Jednakże numeryczne rozwiązanie tak dużego zadania nie jest możliwe bez szybkich komputerów o dużej pojemności pamięci. Zastosowanie MES w sposób umożliwiający przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych w praktycznym do przyjęcia czasie i przy użyciu dostępnych komputerów narzuca konieczność budowy uproszczonego modelu procesu z wykorzystaniem elementów płaskich (2D). Niezbędne jest zatem opracowanie modelu, który dając możliwość badania termomechanicznych warunków kotliny odkształcenia na poziomie lokalnym, tzn. w dowolnie wyodrębnionym elemencie tego obszaru, wykorzystuje MES dla zagadnień płaskich lub osiowosymetrycznych. Model taki jest pewnym przybliżeniem procesu kowarkowego. Wymaga praktycznej weryfikacji, aby mógł stanowić podstawę analizy stanu naprężenia oraz analizy płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, istotnej dla projektowania technologii kucia z możliwością prognozowania struktury i własności wyrobu.

2. STUDIUM LITERATURY

2.1. Kowarki do wstępnego przerobu

Kowarki do wstępnego przerobu stanowią w ogólnej klasyfikacji grupę kowarek, która przeznaczona jest do plastycznej przeróbki materiału o strukturze pierwotnej w postaci wlewków lub wsadu z ciągłego odlewania [27, 63, 64, 108]. Proces wstępnego przerobu w kowarkach, w zakresie celów, jakie musi spełnić, można odnieść do procesów wstępnego kucia wlewków na prasach lub walcowania wlewków na zgniataczu. Z tego względu kowarki tego typu charakteryzują się:

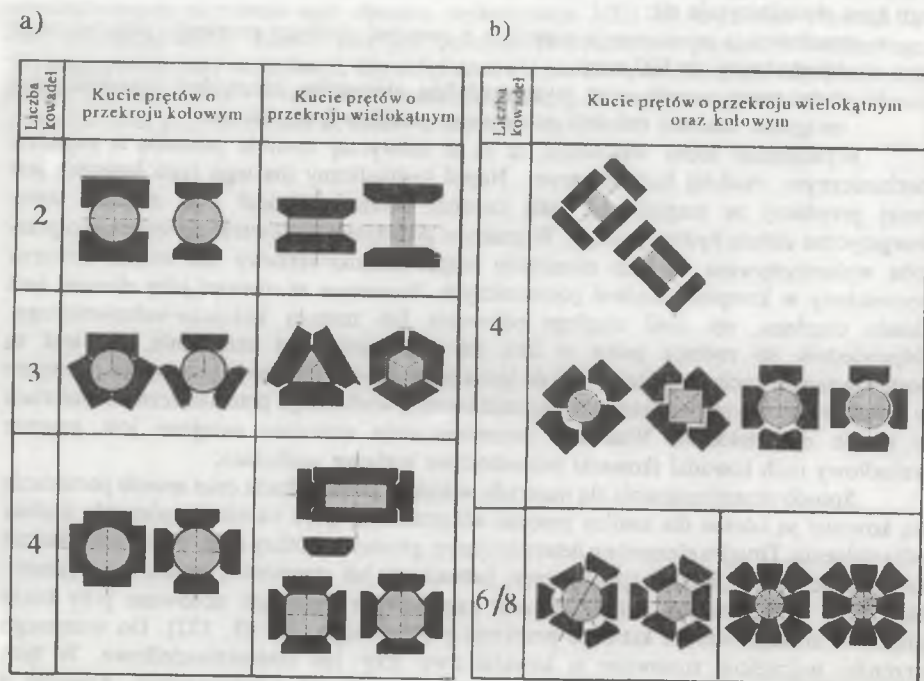
- możliwością przekuwania materiału o znacznej średnicy przekroju poprzecznego (dochodzącej do 800 mm),
- dużą mocą napędu oraz wytrzymałością elementów konstrukcji umożliwiającą osiągnięcie znacznej redukcji przekroju w przejściu (przepuście).

Wymienione cechy warunkują, iż są to zazwyczaj kowarki poziome o napędzie mechanicznym, rzadziej hydraulicznym. Napęd hydrauliczny dla tego typu kowarek jest mniej przydatny ze względu na małą częstość uderzeń kowadeł oraz znaczne straty energetyczne układu hydraulicznego. W praktyce przemysłowej kowarki do wstępnego przerobu wykorzystywane są jako niezależny zespół jednokowarkowy lub zespół kowarek wyposażony w komplet urządzeń pomocniczych. Stosowane są również jako element linii układu ciągłego, np. linii ciągłego odlewania lub zespołu kuźniczo-walcowniczego. Odpowiednio do rodzaju pracy w linii lub jako niezależne urządzenie, kowarki są dostosowane do kucia nawrotnego lub do kucia przelotowego. Kowarki przelotowe pracujące w układzie posobnym charakteryzują się możliwością wzdłużnego przemieszczania materiału w czasie odkształcenia. Wzdłużne przemieszczanie materiału osiągane jest poprzez wahadłowy ruch kowadeł (kowarki mimośrodowe korbowe wzdłużne).

Sposób przemieszczania się materiału w trakcie procesu kucia oraz sposób poruszania się kowadeł są istotne dla analizy procesu odkształcenia, gdyż określają geometrię kotliny odkształcenia. Drugim elementem determinującym geometrię kotliny odkształcenia jest kształt kowadeł, ich liczba, a także sposób pracy; jednoczesny lub przemienny parami lub trójkami. Na rys. 1 przedstawiono układy kowadeł kształtowych i płaskich stosowane przy kuciu prętów o zróżnicowanym kształcie przekroju poprzecznego [26, 63, 122]. Do wstępnego przerobu najczęściej stosowane są kowarki dwu- trzy- lub czterokowadełkowe. W tych ostatnich kowadła mogą uderzać zarówno przemiennie, jak i jednocześnie. Kowarki o większej liczbie kowadeł stosowane są głównie do kucia dokładnego półfabrykatów. W tych też kowarkach najczęściej używane są kształtowe kowadła specjalnego typu do kucia prętów o przekrojach wielokątów foremnych. W kowarkach do wstępnego przerobu stosowane są głównie kowadła kształtowe do kucia prętów okrągłych oraz uniwersalne kowadła płaskie. Jak pokazano na rys. 1, kowadła płaskie umożliwiają kucie prętów kwadratowych, prostokątnych, osmiokątnych, a przede wszystkim okrągłych, to znaczy wieloboków foremnych o dużej liczbie boków (np. dwudziestosiedmioboków).

W odniesieniu do konwencjonalnych procesów wstępnego kucia lub walcowania proces kowarkowy cechuje wiele zalet [26, 39, 63], wśród których należy wyróżnić:

- powtarzalność warunków procesu kucia,
- osiąganie dużych stopni przekucia bez dogrzewania (do 10 z jednego nagrzewu) na skutek małych strat ciepłych rekompensowanych ciepłem pracy odkształcenia plastycznego, co jednocześnie stwarza możliwość kucia stali wymagających przerobu w bardzo wąskim przedziale temperatur,
- duża dokładność kucia (możliwość stosowania małych naddatków na obróbkę mechaniczną w przypadku kucia na gotowo),
- mała prędkość odkształcenia, co pozwala na przerób szerokiego asortymentu gatunków stali, a zwłaszcza wysokostopowych stali o ograniczonej odkształcalności,
- w przypadku kucia stali wysokostopowych, zwiększony uzysk spowodowany ograniczeniem pęknięcia materiału przy kuciu w kowarce w porównaniu do konwencjonalnych metod kucia,
- zwiększoną w porównaniu do kucia na prasach wydajnością, pozwalającą na wykorzystanie kowarek w ciągłych układach kuźniczo - walcowniczych.



Rys. 1. Układy kowadeł kształtowych i płaskich stosowane w kowarkach: a) z jednoczesną, b) przemienną pracą kowadeł
 Fig. 1. Systems of shaped and flat anvils used in swaging machines, with: a) simultaneous, b) alternating operation of anvils

Wymienione korzystne cechy kowarek stanowią ich ogólną charakterystykę i odnoszą się praktycznie do różnych typów kowarek wstępnego przerobu. Ponieważ zamierzeniem niniejszej pracy jest analiza procesu wstępnego przerobu w nawrotnych kowarkach wyposażonych w cztery jednocześnie uderzające płaskie kowadła, więc dalsza analiza zagadnienia odnoszona jest głównie do tego typu procesu kowarkowego. Zastosowanie w kowarkach do wstępnego przerobu czterech jednocześnie lub przemiennie pracujących płaskich kowadeł (najbardziej uniwersalnych), przy stosowaniu różnych systemów kalibrowania, umożliwi kucie prętów o przekroju: kwadratowym, prostokątnym, ośmiokątnym oraz wielokątnym - okrągłym. Różne systemy kalibrowania typu: koło → koło, koło → kwadrat → koło, koło → kwadrat → ośmiokąt → koło (lub inne stosowane przy kuciu przekroju prostokątnego), są osiągane poprzez odpowiedni sposób podawania materiału między kowadła, ruchem prostym lub ruchem złożonym. *Ruch prosty* - podawanie materiału ruchem posuwistym w kierunku wzdłużnym kutego pręta - stosowany jest przy kuciu według schematu koło → kwadrat, kwadrat → kwadrat (prostokąt) oraz kwadrat → ośmiokąt. *Ruch złożony* - podawanie ruchem posuwistym i obrotowym - stosowany jest przy kalibrowaniu według schematu koło → koło oraz ośmiokąt → koło lub kwadrat → koło (nie zalecany).

Technologia kucia wlewków obejmuje trzy zasadnicze etapy [26]:

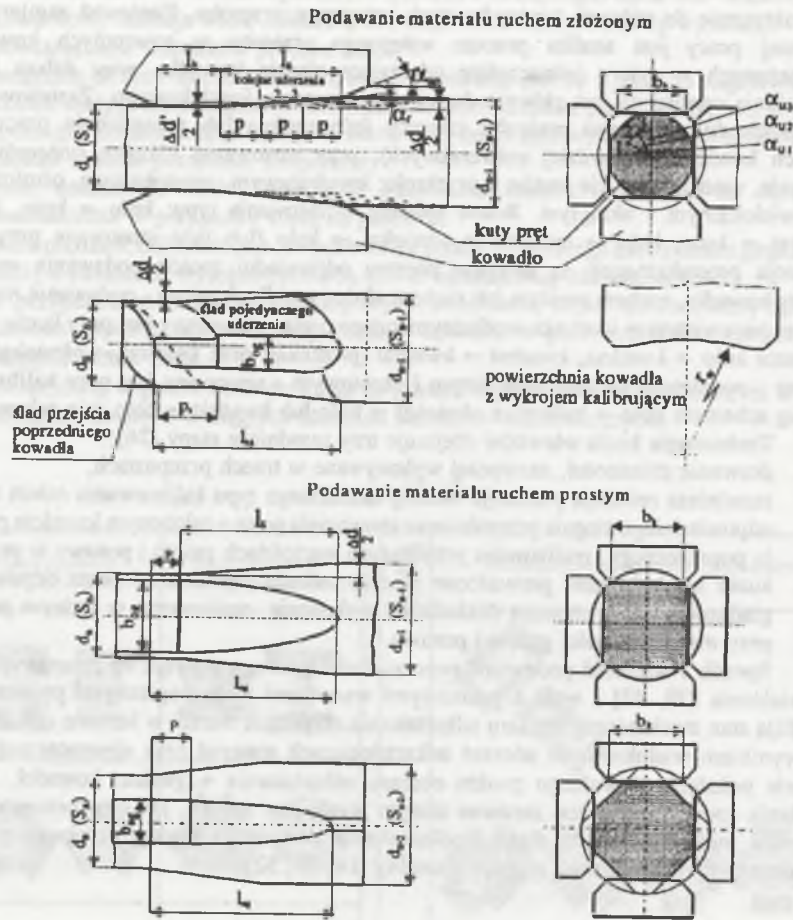
- skuwanie zbieżności, zazwyczaj wykonywane w trzech przepustach,
- zasadnicza redukcja przekroju według określonego typu kalibrowania celem nadania odpowiedniego stopnia przerobu oraz otrzymania pręta o założonym kształcie przekroju poprzecznego, realizowana przy dużych wartościach gniotu i posuwu w przejściu,
- kucie wygładzające, prowadzone w celu nadania powierzchni pręta odpowiedniej gładkości, zaś wymiarom dokładności wykonania, realizowane w jednym przejściu przy małej wielkości gniotu i posuwu.

Sposób i wielkość podawania oraz wielkość gniotu wpływają na geometrię kotliny odkształcenia [39, 42] i wraz z pozostałymi warunkami technologicznymi procesu kucia określają stan mechaniczny obszaru odkształcenia. Płynięcie metalu w kotlinie odkształcenia jest wynikiem wielokrotnych uderzeń odkształcających materiał przy równoczesnej ciągłej zmianie położenia dowolnego punktu obszaru odkształcenia względem kowadeł. Zmiana położenia spowodowana jest zarówno samym płynięciem metalu, jak i ruchem podawania materiału między kowadła, dlatego odkształcenie dowolnego punktu przekroju pręta ma charakter niemonotoniczny i nieproporcjonalny [14, 39, 52].

2.2. Geometryczna kotlina odkształcenia

Geometria kotliny odkształcenia przy kuciu w czterokowadełkowej kowarce, płaskimi kowadłami, zależy od sposobu podawania materiału (ruchem prostym lub złożonym), geometrii kutego pręta, cech geometrycznych kowadeł oraz wielkości gniotu i podania. Na rys. 2 przedstawiono geometryczną kotlinę odkształcenia przy podawaniu materiału ruchem złożonym oraz ruchem prostym. W przypadku podawania materiału ruchem złożonym wielkościami charakteryzującymi kotlinę odkształcenia są [39, 41]:

- wielkość podania materiału między kolejnymi uderzeniami,
- kąt obrotu między kolejnymi uderzeniami kowadeł,
- stopień przylegania,
- długość i szerokość ogniska odkształcenia oraz kąt pochylenia powierzchni roboczych kowadła,
- geometria wsadu i wyrobu,
- gniot pojedynczego uderzenia kowadeł oraz całkowity gniot w przepuście.



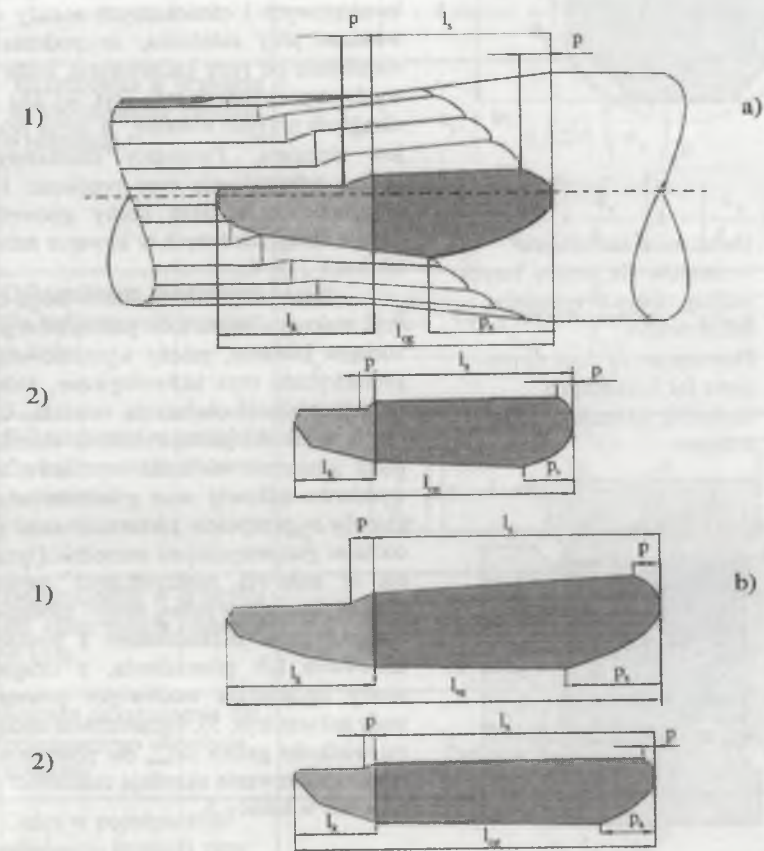
Rys. 2. Schemat geometrycznej kotliny odkształcenia przy kuciu w kowalce płaskimi kowadłami [35, 39]

Fig. 2. Geometric scheme of the deformation gap at forging with flat anvils in a swaging machine [35, 39]

Pomijając kąt obrotu między kolejnymi uderzeniami kowadeł, te same cechy charakteryzują kotlinę odkształcenia przy podawaniu materiału ruchem prostym. W odróżnieniu od kotliny odkształcenia przy kuciu kowadłami stożkowo-walcowymi, w przypadku kucia kowadłami płaskimi, na długości części roboczej kowadła l , wzrasta wielkość kąta opasania θ od zera w płaszczyźnie wejścia do maksimum na początku strefy kalibrującej. Płaszczyzna wejścia oparta jest na czterech punktach pierwszego styku kowadeł z materiałem. W miarę wgłębiania się kowadeł w materiał szerokość powierzchni styku kowadeł wzrasta kosztem zmniejszenia części swobodnych pręta. Obszar odkształcenia można określić jako

objętość zawartą pomiędzy płaszczyznami wejścia i wyjścia, powierzchniami kontaktu z kowadłami oraz powierzchniami swobodnymi pręta, które nie są objęte kowadłami (rys. 2).

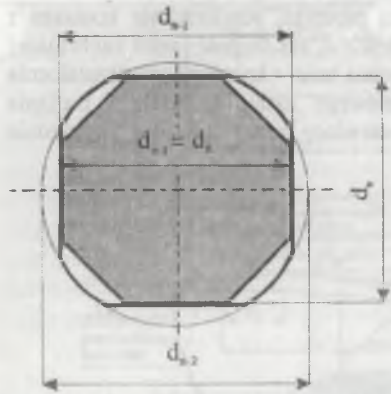
Kształt oraz wielkość powierzchni styku z kowadłami, a tym samym powierzchni swobodnych pręta zależy od sposobu podawania materiału, kąta pochylenia części roboczej kowadła, wielkości gniotu oraz wielkości posuwu materiału i średnicy pręta przed kuciem. W przypadku kucia z podawaniem materiału ruchem prostym, powierzchnie kontaktu z kowadłami oraz powierzchnie swobodne pręta są symetryczne, zaś długość części kalibrującej l_k określa wielkość posuwu. Dla kucia według kalibrowania koło \rightarrow koło kotlina odkształcenia na całej długości jest asymetryczna wskutek obrotowego ruchu materiału i trafiania (z założenia) tylko części kowadła na odcisk pozostawiony przez kowadło poprzednie (rys. 3).



Rys. 3. Ognisko odkształcenia przy kuciu płaskimi kowadłami według kalibrowania koło \rightarrow koło dla: a) małej i b) dużej wielkości gniotu oraz 1 - dużej i 2 - małej prędkości podawania

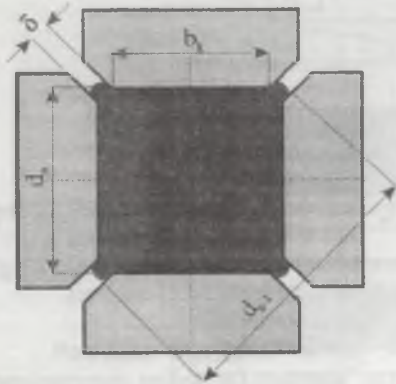
Fig. 3. A contact surface at forging with flat anvils according to circle \rightarrow circle sizing scheme for: a) small, b) large magnitude of draft and 1 - large, 2 - small speed of feeding

Jest to również powodem wydłużenia części kalibrującej poza wielkość posuwu. Na całej długości kotliny odkształcenia gniot na szerokości jest nierównomierny i zmienia się jego wielkość. Przy podawaniu materiału ruchem prostym, pomijając strefy brzegowe, gniot na szerokości kowadła jest równomierny.



Rys. 4. Oznaczenie końcowych wymiarów dla prętów kutech według różnych systemów kalibrowania

Fig. 4. Denotations of final dimensions for bars forged according to various sizing schemes



Rys. 5. Geometryczne ograniczenia wielkości gniotu [39]

Fig. 5. Geometrical limitations of the draft magnitude [39]

W tablicach 1 ÷ 5 zebrano wyprowadzone w pracy [39] wzory charakteryzujące kotline odkształcenia procesu kowarkowego, niezbędne przy projektowaniu technologii kucia. Wzory służące do obliczania wielkości odkształcenia przy stosowaniu różnych systemów kalibrowania zestawiono w tablicy 1. Zależności te uwzględniając zaokrąglenie naroży prętów kwadratowych i ośmiokątnych zostały wyprowadzone przy założeniu, że podczas kucia niezależnie od typu kalibrowania materiał nie wypływa poza obrys wsadu (rys. 4). Dla prętów okrągłych przyjęto również, iż zarys przekroju jest okręgiem. Parametry charakteryzujące kotlinę odkształcenia oraz prędkości i czasy odkształcenia, a także cechy geometryczne prętów okrągłych kutech w kowarce zebrano w tablicach 2 ÷ 4.

Wśród czynników, które mogą ograniczyć maksymalne wartości parametrów procesu kucia w kowarce, należy wyróżnić wielkości geometryczne oraz technologiczne, które warunkują wielkość obciążenia kowarki. Ograniczenia wielkości geometrycznych określane są przez graniczne wielkości wymiarów wsadu, wymiarów odkuwki oraz graniczne wielkości gniotów w przepuście zdeterminowane z kolei cechami geometrycznymi narzędzi. Ograniczenia te stanowią zabezpieczenia dwójakiego rodzaju, bowiem z jednej strony zabezpieczają kowarkę przed uszkodzeniem z powodu zaklinowania lub przeciążenia, z drugiej zaś strony ograniczają możliwości powstawania wady zakucia (rys. 5). Ograniczenie maksymalnej wielkości gniotu Δd_{max} dla poszczególnych typów kalibrowania określają zależności przedstawione w tablicy 5.

Wielkości odkształceń

Lp.	Opis	Wzór
1.1	Odształcenie w przejściu dla kalibrowania koło → koło	$\epsilon_p = 2 \ln \frac{d_{n-1}}{d_n}$
1.2	Odształcenie w przejściu dla kalibrowania koło → kwadrat	$\epsilon_p = \ln \frac{\pi}{\pi - 4 \arccos \frac{d_n}{d_{n-1}} + 4 \frac{d_n}{d_{n-1}} \sqrt{1 - \left(\frac{d_n}{d_{n-1}}\right)^2}}$
1.3	Odształcenie w przejściu dla kalibrowania kwadrat → ośmiokąt	$\epsilon_p = \ln \frac{1}{0.8284} \left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 \cdot \left[\frac{\pi}{4} - \arccos \frac{d_n}{d_{n-1}} + \frac{d_n}{d_{n-1}} \sqrt{1 - \left(\frac{d_n}{d_{n-1}}\right)^2} \right]$
1.4	Odształcenie w przejściu dla kalibrowania kwadrat → koło	$\epsilon_p = \ln \frac{\pi d_{n-2}^2 - 4 d_n^2 \arccos \frac{d_{n-1}}{d_{n-2}} + d_{n-1} \sqrt{d_{n-2}^2 - d_{n-1}^2}}{\pi d_n^2}$
1.5	Odształcenie w przejściu dla kalibrowania kwadrat → ośmiokąt	$\epsilon_p = \ln \frac{\left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 \left[\pi - 4 \arccos \frac{d_n}{d_{n-1}} + 4 \frac{d_n}{d_{n-1}} \sqrt{1 - \left(\frac{d_n}{d_{n-1}}\right)^2} \right]}{\pi}$
1.6	Odształcenie w przejściu dla kalibrowania ośmiokąt → koło	$\epsilon_p = \ln \left[\frac{3.3136}{\pi} \left(\frac{d_{n-1}}{d_n}\right)^2 \right]$
1.7	Średnie odkształcenie dla pojedynczego uderzenia kowadeł	$\epsilon_{poj} = \frac{2 v_p \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u (d_{n-1} - d_n)} \epsilon_p$
1.8	Gniot w pojedynczym uderzeniu kowadeł przy podawaniu materiału ruchem złożonym	$\Delta d' = \frac{v_p t_g}{2} \operatorname{tg} \alpha_r$
1.9	Gniot w pojedynczym uderzeniu kowadeł przy podawaniu materiału ruchem prostym	$\Delta d' = \frac{2 v_p}{f_u} \operatorname{tg} \alpha_r$

Parametry prędkości i czasu odkształcania

Tablica 2

Lp.	Opis	Wzór
2.1	Prędkość ruchu kowadeł - wartość maksymalna	$v_{k_{max}} = 2 \pi f_u \sqrt{\Delta d' \left(e - \frac{\Delta d'}{4} \right)}$
2.2	Średnia prędkość odkształcania w jednym uderzeniu kowadeł	$\bar{v}_{poj} = \frac{\varepsilon_{poj}}{t_u}$
2.3	Średnia prędkość odkształcania - dla złożonego ruchu materiału	$\bar{v} = \frac{4 \pi v_p \operatorname{tg} \alpha_r}{(d_{n-1} - d_n) \arccos \left(1 - \frac{v_p t_g \operatorname{tg} \alpha_r}{4 e} \right)} \varepsilon_p$
2.4	Średnia prędkość odkształcania dla prostego ruchu materiału	$\bar{v} = \frac{4 \pi v_p \operatorname{tg} \alpha_r}{(d_{n-1} - d_n) \arccos \left(1 - \frac{v_p \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u e} \right)} \varepsilon_p \left(\frac{d_{n-1}}{d_n} \right)$
2.5	Czas odkształcania w jednym uderzeniu kowadeł dla złożonego ruchu materiału	$t_u = \frac{\arccos \left(1 - \frac{v_p t_g \operatorname{tg} \alpha_r}{4 e} \right)}{2 \pi f_u}$
2.6	Czas odkształcania w jednym uderzeniu kowadeł dla prostego ruchu materiału	$t_u = \frac{\arccos \left(1 - \frac{v_p \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u e} \right)}{2 \pi f_u}$
2.7	Czas pełnego cyklu pracy kowadeł	$t_k = \frac{1}{f_u}$
2.8	Czas przerw między kolejnymi uderzeniami kowadeł	$t_p = t_k - t_u$
2.9	Czas redukowania przekroju pręta w przepuście (bez strefy kalibrującej)	$t_r = \frac{\Delta d}{v_p \operatorname{tg} \alpha_r}$
2.10	Czas między wyjściem a ponownym wejściem w strefę odkształcania przekroju pręta położonego w odległości "x" od jego końca	$t_{pc} = \frac{x}{v_{p_{n-1}}} + \frac{\lambda_{n-1} x}{v_{p_n}} + t_m$

Tablica 3

Sposób określenia posuwu, kąta obrotu materiału przy podawaniu ruchem złożonym, liczby uderzeń kowadła, stopnia przylegania kowadeł oraz długości i szerokości kotłiny odkształcania

Lp.	Opis	Wzór
3.1	Posuw materiału między kolejnymi uderzeniami kowadeł	$p = \frac{v_p}{f_u}$
3.2	Kąt obrotu materiału między kolejnymi uderzeniami kowadeł	$\alpha_u = \frac{2 \pi}{f_u}$
3.3	Liczba uderzeń kowadeł w czasie pełnego obrotu głowicy manipulatora	$n_T = t_g \cdot f_u$
3.4	Stopień przylegania	$s = \frac{d_g}{2 r_w}$
Strefa odkształcania - przy podawaniu materiału ruchem złożonym		
3.5	Szerokość strefy odkształcania	$b_{og} = \frac{(d_{n-1} - \Delta d) \operatorname{tg} \frac{\alpha_u}{2} + \sqrt{\frac{5 v_p \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u} \left(d_{n-1} - \frac{5 v_p \operatorname{tg} \alpha_r}{f_u} \right)}}{2}$
3.6	Długość strefy odkształcania	$l_{og} = \frac{\Delta d}{2} \operatorname{ctg} \alpha_r + v_p \frac{t_g}{4}$
Strefa odkształcania przy podawaniu materiału ruchem prostym		
3.7	Szerokość strefy odkształcania dla kalibrowania koło → kwadrat	$b_{og} = \sqrt{\Delta d (2 d_{n-1} - \Delta d)}$
3.8	dla kalibrowania ośmiokąt → kwadrat	$b_{og} = d_{n-1} \operatorname{tg} \frac{\pi}{4}$
3.9	Długość strefy odkształcania	$l_{ok} = \frac{\Delta d}{2} \operatorname{ctg} \alpha_r + \frac{v_p}{f_u}$

Cechy geometryczne prętów kutych w kowarce

Tablica 4

Lp.	Opis	Wzór
Kucie narzędziami z płaską powierzchnią kalibrującą		
4.1	Makronierówność przekroju pręta - niekołowość	$N = M = \frac{d_g}{2} \left(\frac{1}{\cos \frac{\pi v_p}{4 f_u l_s}} - 1 \right)$
Kucie narzędziami wykazującymi ślady zużycia		
4.2	Makronierówność	$M = 0,0034 C \operatorname{ctg}(1-s)$
	Gdzie:	
	s	0,0 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7
	C	0,70 0,75 0,80 0,85 0,90 1,11 1,35
4.3	Niekołowość	$N = 0,002 d_g \exp \frac{\left(0,4 + 0,8 \frac{\Delta d}{d_{g-1}} \right) v_p t_k}{d_g}$

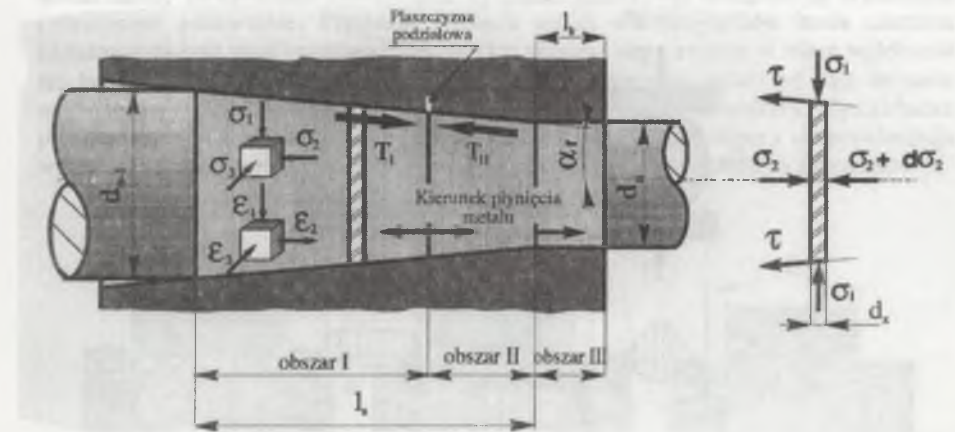
Warunki geometryczne ograniczające proces kucia

Tablica 5

Lp.	Opis	Wzór
5.1	Ograniczenie maksymalnego gniotu długością powierzchni roboczej kowadła	$\Delta d_{\max} = 2 l_r \operatorname{tg} \alpha_r$
5.2	Ograniczenie maksymalnej średnicy wsadu wielkością promienia wyotoczenia kowadła	$s = \frac{d_g}{2 r_w} \leq 1$
Ograniczenie maksymalnego gniotu przy kalibrowaniu koło → kwadrat		
5.3	Rzeczywistą szerokością powierzchni kalibrującej kowadła - B	$\Delta d_{\max} = d_{n-1} - \sqrt{d_{n-1}^2 - B^2}$
5.4	Wielkością szczeliny między przyległymi kowadłami - δ	$\Delta d_{\max} = d_{n-1} - B - \sqrt{2} \delta$

2.3. Analiza płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia

Schemat kotliny odkształcenia, dla przypadku kucia odkuwek o przekroju okrągłym za pomocą stożkowo-walcowych kowadeł, przedstawiono na rys. 6. W kotlinie odkształcenia wyodrębnione są: strefa redukcji przekroju (l_r) oraz strefa kalibrująca (l_k). Ze względu na zróżnicowanie kierunków płynięcia metalu, a tym samym zróżnicowanie kierunków działania sił tarcia na powierzchni kontaktu odkształcany metal - narzędzie, w kotlinie odkształcenia wyróżnia się trzy obszary. W strefie redukcji przekroju występują obszary I oraz II rozdzielone płaszczyzną podziałową. Obszary te charakteryzują się przeciwnym kierunkiem działania sił tarcia, podobnie jak występuje to w procesie walcowania.

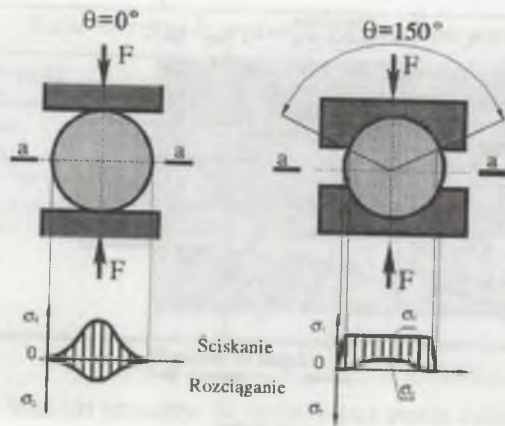


Rys. 6. Schemat kotliny odkształcenia przy kuciu stożkowo-walcowymi kowadłami [64]
Fig. 6. A diagram of the deformation gap at forging with conically-cylindrical anvils [64]

Obszar III usytuowany jest w strefie kalibrującej i cechuje się takim samym kierunkiem przemieszczania metalu oraz kierunkiem działania sił tarcia, jak obszar II [64]. W modelu tym przyjmuje się, że w strefie redukcji przekroju (l_r) wskutek działania sił nacisku kowadeł materiał podlega obwodowemu ścisnaniu, natomiast siły tarcia na powierzchni kontaktu z narzędziem powodują występowanie naprężenia ściskającego w kierunku osiowym. Materiał poddawany jest wszechstronnemu nierównomiernemu naprężeniu ściskającemu, natomiast schemat odkształceń głównych, przy dokonanych założeniach, obejmuje obwodowe skracanie z wydłużaniem w kierunku osi pręta. Model ten, jak stwierdzono w pracy [64], jest poprawny dla sumarycznych kątów opasania materiału kowadłami, zawartych w przedziale $240 \div 300^\circ$. Zmniejszenie kąta opasania, na przykład poprzez kucie kowadłami płaskimi, prowadzi do istotnych zmian rozkładu naprężeń normalnych, co przedstawiają wykresy na rys. 7.

W rozważaniach nad kotliną odkształcenia pomijana jest często strefa kalibrująca. Zakłada się [64, 108, 121, 126], że zasadniczy proces odkształcania realizowany jest w strefie redukcji przekroju. Szereg dalszych uproszczeń wynika z przyjęcia przedstawionych założeń lub jest konsekwencją celu obliczeń. Przykładem tego są zależności służące do obliczania parametrów energo-siłowych [64], gdzie w rozwiązaniach zakładany jest np.

rozkład naprężeń stycznych i normalnych wzdłuż kotliny odkształcenia, podobny jak przy spęczaniu próbek klinowych płaskimi kowadłami, zaś warunki graniczne ustalane są doświadczalnie [64, 121]. Kolejne założenia dotyczą przyjęcia postulatu, iż przemieszczenie metalu następuje jedynie wzdłuż kotliny odkształcenia, a tym samym odkształcenia w kierunkach obwodowym i promieniowym są sobie równe i zróżnicowane wzdłuż promienia pręta [64]. Proces nierównomiernego płynięcia metalu w strefie odkształcenia analizowany jest podobnie jak proces ściskania z udziałem tarcia. Tarcie powoduje zmniejszenie prędkości płynięcia metalu w warstwach przyległych do kowadeł w porównaniu do stref leżących w środku pręta. Drugim czynnikiem oddziałującym na nierównomierne płynięcie jest kąt pochylenia kowadeł α , którego wzrost prowadzi do zwiększenia nierównomierności płynięcia metalu [64].



Rys. 7. Zależność rozkładu naprężeń normalnych od wielkości kąta opasania materiału kowadłami [63, 123]

Fig. 7. The dependence of normal strains distribution versus the magnitude of material's wrapping angle with anvils [63, 123]



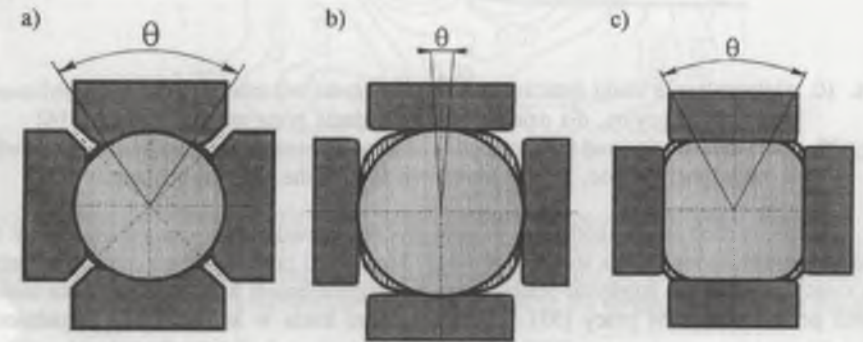
Rys. 8. Względna długość kotliny odkształcenia, zależna od położenia płaszczyny podziałowej

Fig. 8. A relative length of the deformation gap, depending on the location of a dividing plane

W pracy [63] przyjęto założenie, że przy kuciu w kowarce, podobnie jak w procesie walcowania, nierównomierność odkształceń w przekrojach poprzecznych zależy od względnej długości kotliny odkształcenia l_s/d_s (rys. 8). Analizując warunki płynięcia metalu oddzielnie dla obszarów I oraz II przy uwzględnieniu zmiennych stosunków l_s/d_s dla tych stref stwierdzono, że zmiana prędkości płynięcia w obszarze I zależy jedynie od tarcia. Natomiast dla obszaru II, wskutek zmniejszenia oporów płynięcia metalu w stronę zbieżności stożka, wzrasta prędkość płynięcia metalu w przekrojach poprzecznych, od warstw wierzchnich ku środkowi. Końcowy wniosek tej analizy stwierdzający,

że konieczne jest ustalenie praktycznych związków pomiędzy poszczególnymi parametrami kotliny odkształcenia niezbędnych dla prawidłowego określenia technologii kucia potwierdza, iż problem kinetyki płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia został rozwiązany jedynie w sposób opisowy. W pracach [64, 108, 121, 126] stwierdza się jednocześnie, że schemat mechaniczny odkształcenia w kowarkach zależy głównie od kształtu powierzchni i kąta pochylenia kowadeł, kąta opasania, sposobu ruchu kowadeł oraz wielkości gniotu i wielkości podania materiału, co ma istotny wpływ na kinetykę płynięcia metalu, a czego praktycznie nie uwzględniają omawiane modele kucia w kowarce. Formułowany jest natomiast wniosek, że przy sumarycznym kącie opasania $\Sigma\theta \geq 300^\circ$ poszerzenie praktycznie nie występuje.

Pewne uzupełnienie do przedstawionych modeli płynięcia, uwzględniające możliwość zróżnicowanego płynięcia metalu zależnie od fazy procesu, przedstawiono w pracy [63]. Stwierdzono, że na skutek zmniejszenia wysokości przedkuwki następuje jej wydłużenie i nieznaczne poszerzenie. Charakter płynięcia metalu dla przypadków kucia czterema kształtowymi oraz płaskimi kowadłami, gdy kąt opasania ulega zmianie w miarę wgłębiania się kowadeł w materiał, przedstawiono na rys. 9. Poszerzenie zależy od kąta opasania materiału kowadłami i jest tym bardziej ograniczane, im kąt opasania większy. Wyniki badań przedstawione w pracach [39, 40, 42, 106] zaprzeczają tym założeniom i nie potwierdzają wniosku dotyczącego charakteru poszerzenia materiału przy kuciu płaskimi kowadłami.



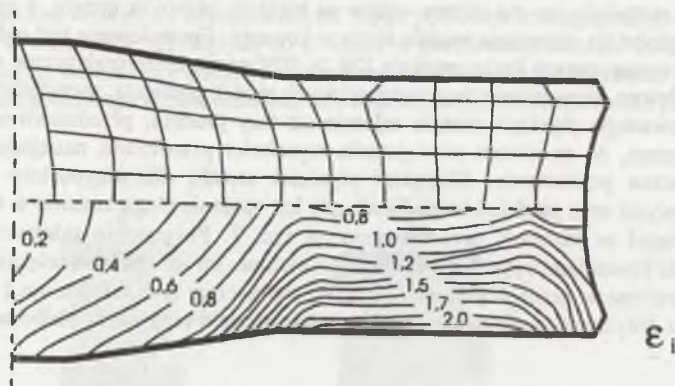
Rys. 9. Wpływ kąta opasania θ na poszerzenie metalu przy kuciu w kowarce [63]:

a) kucie kowadłami kształtowymi, b), c) kucie kowadłami płaskimi

Fig. 9. The effect of wrapping angle θ on widening of the metal at forging in a swaging machine [63]: a) forging with shape anvils, b), c) forging with flat anvils

Przedstawione schematy procesu kucia oraz uproszczone modele płynięcia mają charakter opisowy i nie dają możliwości wyznaczenia ilościowej charakterystyki naprężenia czy odkształcenia. Znaczny postęp w analizie i modelowaniu matematycznym procesów przeróbki plastycznej metali, w tym również procesu kowarkowego, spowodowało zastosowanie metod numerycznych. Zastosowanie metody wariacyjnej do analizy procesu kowarkowego przedstawiono w pracy [16]. Uwzględniając zmianę geometrii kotliny odkształcenia dla każdego kroku obliczeń, wyznaczono drogą minimalizacji funkcjonalu mocy, kinematycznie dopuszczalne pola przemieszczeń, przy uwzględnieniu nieściśliwości materiału oraz nałożeniu warunków brzegowych wynikających z założenia, że strefa redukcji przekroju ma kształt stożka ściętego, natomiast strefa kalibrująca jest walcem. Otrzymane w wyniku obliczeń rozkłady intensywności odkształcenia, przy założeniu sztywno-plastycznego modelu ciała, przedstawiono na rys. 10. Zastosowana metoda wariacyjna z podziałem strefy

odkształcenia na elementy, jak pokazano na rys. 10, dla przyjętego schematu procesu kucia, ograniczającego rozwiązanie do zagadnień osiowo-symetrycznych, pozwala już na ilościowe określenie odkształceń lokalnych. Ma również tę zaletę, że modelowany jest proces kucia, a nie tylko pojedyncze uderzenie kowadeł.

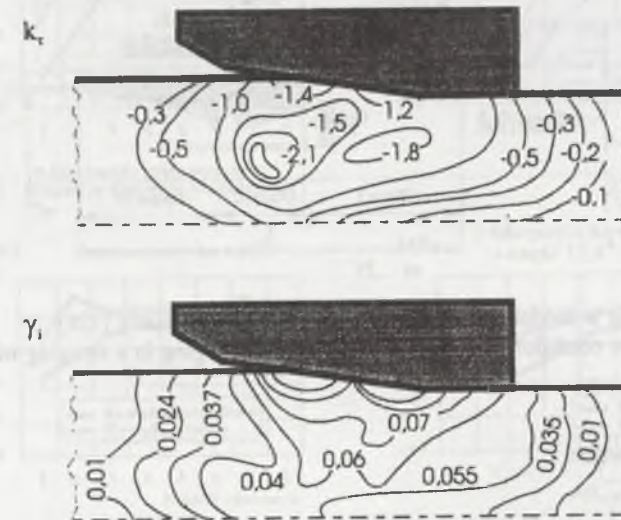


Rys. 10. Odształcenie siatki oraz rozkład intensywności odkształceń lokalnych obliczony metodą wariacyjną, dla dziewiętnastego podania pręta między kowadła [16]
 Fig. 10. Grid deformation and the distribution of local deformations intensity calculated with a variational method, for the nineteenth feed of the bar between anvils [16]

Kolejny krok w udoskonalaniu modelu procesu kowarkowego - to wprowadzenie do analizy niejednorodnego pola temperaturowego. Model taki przy założeniu osiowej symetrii dla nieściśliwego ciała sprężysto-plastycznego z uwzględnieniem liniowego warunku umocnienia przedstawiono w pracy [53]. Traktując proces kucia w kowarce jako zagadnienie quasi-stacjonarne, wyznaczono naprężenia i odkształcenia w kotlinie odkształcenia oraz w obszarze odkutego pręta (rys. 11). Wyznaczono również, na przekroju wzdłużnym kotliny odkształcenia, rozkłady intensywności odkształcenia postaciowego γ_i oraz wskaźnika stanu naprężenia $k_r = \sigma_m / \tau_s$, będącego stosunkiem naprężenia średniego do intensywności naprężeń stycznych. Obliczenia przedstawionych na rys. 11 wielkości γ_i oraz k_r , w powiązaniu z krzywą odkształcalności granicznej, pozwala na ustalenie obszarów przypuszczalnych pęknięć materiału, co jak wynika z danych przedstawionych na tym rysunku, najbardziej prawdopodobne jest w strefie osi pręta, gdzie materiał jest najmniej przerobiony plastycznie, zaś wskaźnik stanu naprężenia wskazuje, iż mały jest udział naprężeń ściskających σ_m . Jak stwierdzono w badaniach [53], bliskie zera wartości wskaźnika stanu naprężenia występują dla przypadków kucia z dużym gniotem. Kucie z bardzo dużym gniotem, takim, że kotlina odkształcenia sięga poza geometryczną kotlinę odkształcenia, powoduje nawet, że wskaźnik stanu naprężenia jest dodatni.

Istotny postęp w zakresie analizy procesu płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia spowodowało zastosowanie metody elementów skończonych (MES). Przykład zastosowania (MES) dla przypadku kucia w kowarce prętów okrągłych, czterema kształtowymi kowadłami, przedstawiono w pracy [110]. Upraszczając proces kowarkowy do zagadnienia osiowo-symetrycznego względem osi pręta, przy założeniu sprężysto-lepko-plastycznego modelu

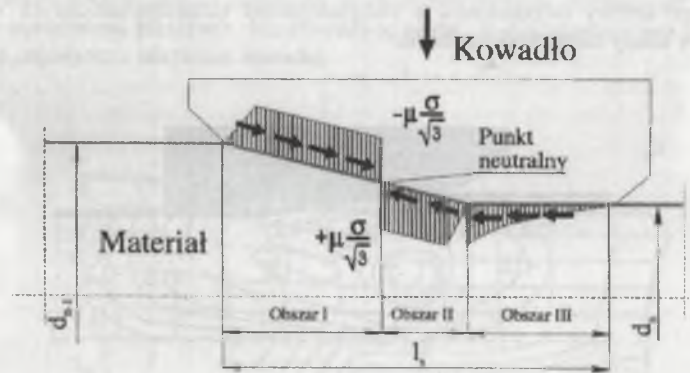
ciała, wyznaczono metodą elementów skończonych podstawowe charakterystyki stanu mechanicznego kotliny odkształcenia z uwzględnieniem termomechanicznych warunków generowania i utraty ciepła podczas kucia.



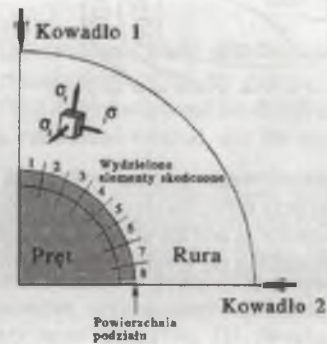
Rys. 11. Rozkład intensywności odkształcenia postaciowego γ_i oraz wskaźnika stanu naprężenia k_r , obliczony metodą wariacyjną przy modelowaniu kucia w kowarce [53]
 Fig. 11. The distribution of shape deformation intensity γ_i and the stress state coefficient k_r , calculated with a variational method at modelling the forging in a swaging machine [53]

Zbudowany model, przy założeniu rozkładu tarcia wzdłuż kotliny odkształcenia, jak pokazano na rys. 12, posłużył do symulacji procesu spajania wewnętrznych nieciągłości podczas kucia w kowarce, występujących w kęsach z ciągiego odlewania. Na podstawie przeprowadzonych badań, w pracy [110] zwrócono uwagę na występowanie korzystnego stanu naprężenia, pozwalającego na zlikwidowanie zlokalizowanych w osi pręta nieciągłości. Występowanie naprężeń ściskających w osi pręta stwierdzono przy całkowitym domknięciu kowadeł i pełnym opasaniu materiału kowadłami.

Wykorzystując (MES) dla elementów przestrzennych (3D) w pracy [67], poddano analizie proces obwodowego przekuwania w kowarce czterekowadełkowej, mający na celu spajanie rury z osadzonym w środku prętem (rys. 13). Choć trudno tego rodzaju proces zaliczyć do wstępnego przerobu, to badania te są istotne dla analizy początkowej fazy wgniatania kowadeł w materiał. Obliczenia symulujące przeprowadzono dla dwuwarstwowego modelu pręta o średnicy ϕ 180 mm, przyjmując gniot $\Delta d' = 0,477$ mm. Przy założeniu, że proces jest izotermiczny, dla ciała sprężysto-plastycznego (bez umocnienia) wyznaczono zmiany naprężenia promieniowego σ_r , oraz naprężenia średniego σ_m na powierzchni podziału, rdzeń - otoczka rurowa (rys. 14), a także składowe stanu naprężenia w osi pręta. Badania te wykazały, że przy kuciu płaskimi kowadłami w analizowanej strefie rozdziału, pręt - otoczka rurowa, na znacznej części obwodu występują naprężenia rozciągające.



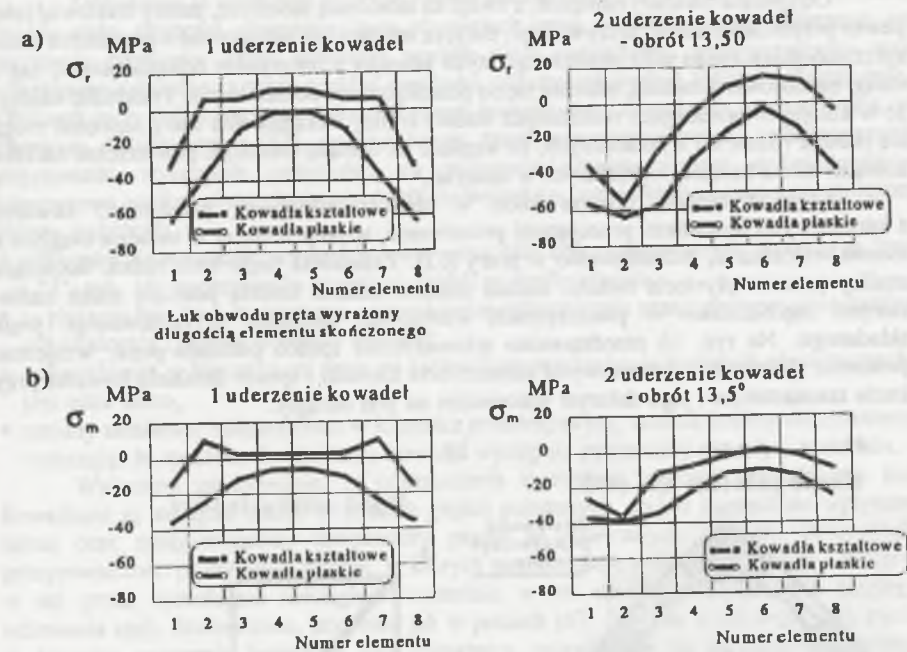
Rys. 12. Przyjęte w modelowaniu kucia w kowarce warunki tarcia [126]
 Fig. 12. Friction conditions assumed in modelling the forging in a swaging machine [126]



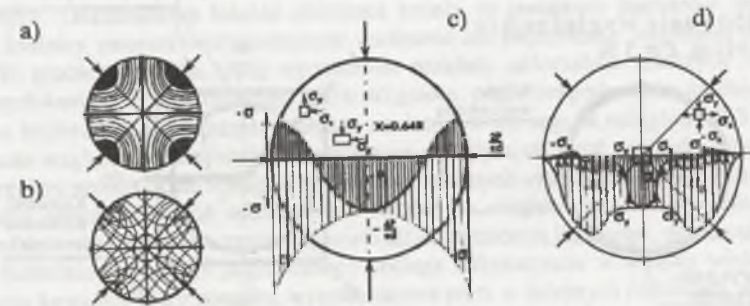
Rys. 13. Schemat procesu spajania w kowarce [67]
 Fig. 13. A diagram of pressure welding in a swaging machine [67]

Zastosowanie kowadeł kształtowych zwiększa kąta opasania θ i prowadzi do korzystnej zmiany stanu naprężenia. W badanej strefie podziału występują wówczas jedynie naprężenia ściskające σ_r i σ_m (rys. 14). Dla osi pręta naprężenie w kierunku wzdłużnym oraz naprężenie średnie, zarówno przy kuciu kowadłami płaskimi, jak i kształtowymi, jest rozciągające. Dodatkowo są również, dla pierwszego uderzenia, naprężenia obwodowe i promieniowe w osi pręta przy kuciu kowadłami płaskimi. W przypadku kucia kowadłami kształtowymi naprężenia te są ściskające. Ogólne wnioski wynikające z tych badań wskazują, że niebezpieczna jest początkowa faza wgniatania kowadeł w materiał. Zarówno w strefie osi, jak i strefach poza obszarem objętym kowadłami występuje stan naprężenia sprzyjający powstawaniu pęknięć materiału.

Charakterystyka procesu kucia w kowarkach, a zwłaszcza zagadnienia dotyczące kotliny odkształcenia, były również przedmiotem badań o charakterze doświadczalnym. Jedną z najwcześniejszych prac doświadczalnych, w której wykorzystano metody elastooptyki do analizy procesu kowarkowego, przeprowadzona została przez W. G. Osipowa [70]. Wyznaczony w tych badaniach rozkład naprężeń przy kuciu czterema płaskimi kowadłami przedstawiono na rys. 15.



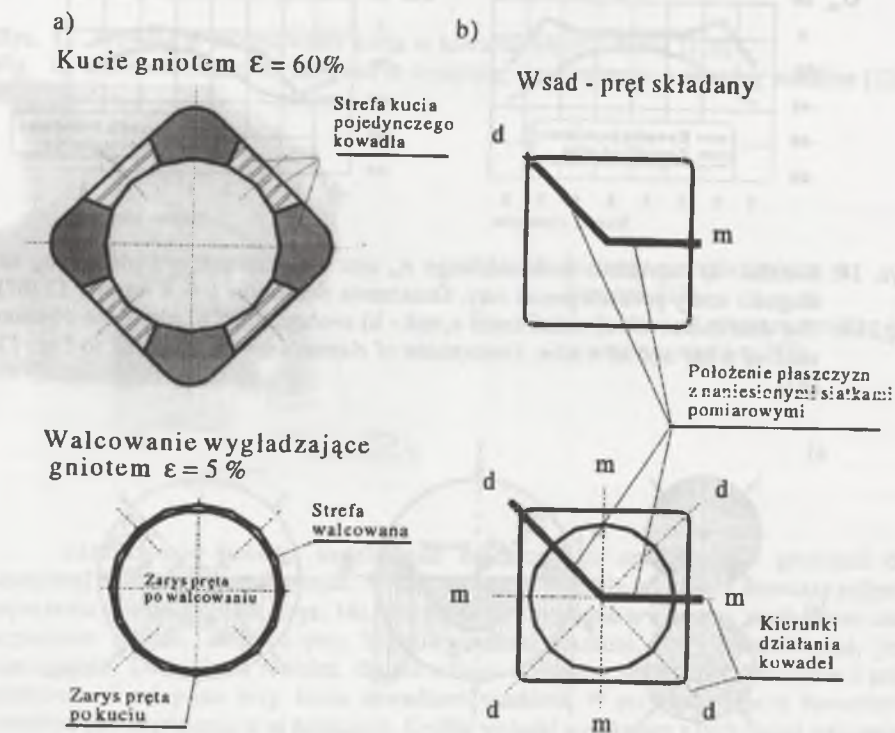
Rys. 14. Rozkład: a) naprężenia promieniowego σ_r , oraz - b) naprężenia średniego σ_m na długości strefy podziału pręta i rury. Oznaczenia elementów 1 ÷ 8 wg rys. 13 [67]
 Fig. 14. The distribution of: a) radial stress σ_r , and - b) average stress σ_m along the division zone of a bar and of a tube. Denotations of elements 1 ÷ 8 according to Fig. 13 [67]



Rys. 15. Rozkład naprężeń przy kuciu w kowarce czterokowadełkowej [70]: a) rozkład naprężeń normalnych, b) rozkład naprężeń stycznych, c) rozkład naprężeń normalnych wzdłuż kierunku nacisku kowadeł, d) rozkład naprężeń normalnych w kierunku nachylonym pod kątem 45° do kierunku nacisku kowadeł
 Fig. 15. The distribution of stress at forging with a four-anvil swaging machine [70]: a) normal stress distribution, b) tangential stress distribution, c) normal stress distribution along the edge of anvils' thrust, d) normal stress distribution in a direction inclined at 45° to the anvils' thrust direction

Otrzymane rozkłady naprężeń, z uwagi na stosowaną metodykę, należy traktować jako pewne przybliżenie stanu rzeczywistego, dotyczą one bowiem odkształceń z pogranicza stanu sprężysto-plastycznego oraz punktowego styku kowadeł z materiałem odkształcanym, zaś z uwagi na stosowaną metodę, odnoszą się do płaskiego stanu odkształcenia. Podkreślić należy, że w kolejnych przekrojach rozłożonych wzdłuż kotliny odkształcenia stany naprężeń mogą się istotnie różnić od wyznaczonych, ze względu na rosnącą szerokość powierzchni nacisku kowadeł coraz bardziej wgniatanych w materiał.

Szerokie badania procesu kucia w ośmiokowadełkowej, przelotowej kowarce z kształtowymi kowadłami pracującymi przemiennie, współpracującej w układzie ciągłym z trzema walcarkami, przedstawiono w pracy [52]. Zasadniczą część tych badań, dotyczącą analizy procesu płynięcia metalu, została przeprowadzona metodą pomiaru siatek naniesionych mechanicznie w płaszczyznach wzdłużnych specjalnie przygotowanego pręta składanego. Na rys. 16 przedstawiono schematycznie sposób podziału pręta, wzajemne położenie płaszczyzn z naniesionymi siatkami oraz kierunki i sposób działania kowadeł przy kuciu szesnastokąta i jego dalszym walcowaniu na pręt okrągły.



Rys. 16. Analiza płynięcia metalu metodą próbek składanych: a) sposób odkształcania, b) sposób podziału pręta, orientacja położenia płaszczyzn z siatkami oraz kierunki działania kowadeł [52]

Fig. 16. The analysis of metal flow by means of a composed bars method: a) the deformation method, b) the method of dividing a bar, the orientation of planes with grids and the directions of anvils operation [52]

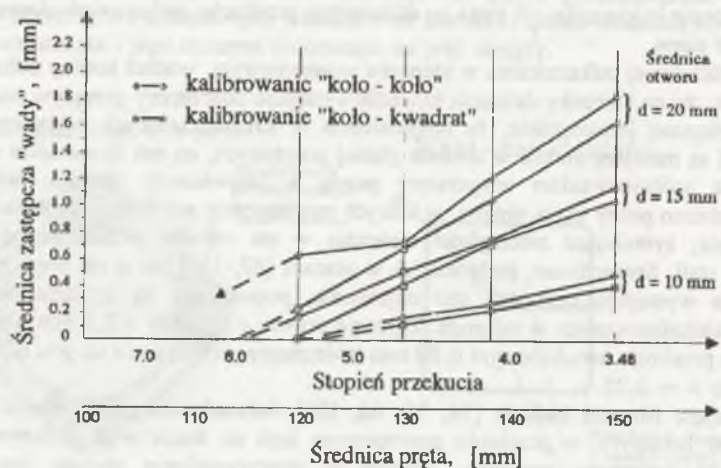
Zakładając, iż występuje symetria osiowa dla badanych płaszczyzn, przy zachowaniu zasady stałej objętości, opierając się na równaniach teorii odkształceniowej obliczono, na podstawie pomiarów zmian położenia węzłów siatki podziałowej, przemieszczenia oraz odkształcenia lokalne, a także rozkład prędkości odkształceń wzdłuż kotliny odkształcenia. Obliczeń tych dokonano przy założeniu quasi-stacjonarnego charakteru procesu kucia w kowarce. Autorzy pracy [52], podając szereg zasad prowadzenia badań, gwarantujących poprawność wykonania pomiarów, na podstawie przeprowadzonej doświadczalno-teoretycznej analizy płynięcia metalu doszli do wniosków, wśród których jako najważniejsze należy wyróżnić:

- odkształcenie w strefie powierzchniowej pręta (dla obu analizowanych płaszczyzn "m" i "d" rys. 16) występowało wcześniej aniżeli w strefie rdzenia,
- w płaszczyźnie "m" stwierdzono występowanie odkształcenia przed geometryczną kotliną odkształcenia (granicą działania kowadeł),
- odkształcenie w kierunku osi pręta po całkowitym przekuciu, w badanych płaszczyznach, jest takie samo,
- zmiany składowej odkształcenia w kierunku promieniowym, wzdłuż kotliny odkształcenia wskazują, że na kierunku działania kowadła występuje poprzeczny przepływ materiału.

Wykazano jednocześnie, że odkształcenia w strefach leżących bezpośrednio pod kowadłami są mniejsze aniżeli w strefach głębiej położonych, co jest tłumaczone wpływem tarcia oraz zróżnicowaniem temperatury pasma w omawianych strefach. Równolegle przeprowadzono próby kucia prętów, w których mechanicznie wykonano wzdłużne nacięcia w osi pręta, symulujące nieciągłości materiału w osi wlewka pochodzące z ciągłego odlewania stali. Stwierdzono, podobnie jak w pracach [67, 110], że w osi pręta przy kuciu w kowarce występuje korzystny stan naprężeń, pozwalający na zgrzanie nieciągłości materiału zlokalizowanych w osi pręta. Zgrzanie otworu o średnicy $\phi 3,2$ mm wykonanego w przecie o przekroju kwadratowym $\square 80$ mm stwierdzono po przekuciu na pręt okrągły przy wydłużeniu $\lambda = 2,25$.

Podjęto również badania [14, 39, 66, 106] doświadczalnego określenia rozkładu odkształceń lokalnych w przekroju poprzecznym kęsa po kuciu w czterokowadełkowej kowarce do wstępnego przerobu. Badania te przeprowadzono metodą tzw. prętów składanych. Odkształcenia lokalne obliczone zostały na podstawie pomiarów, przed i po kuciu, średnicy sworzni wprowadzonych wzdłużnie lub poprzecznie względem osi kutego kęsa. W pracach [14, 66, 106] wyznaczono rozkłady odkształceń lokalnych w prętach poddanych kuciu przy zróżnicowanej wielkości gniotu, prędkości podawania, średnicy wsadu, systemu kalibrowania. Sworznie wzdłużne osadzono w osi oraz w odległości 0,3 0,6 i 0,9 promienia względnego. Ze względu na założoną metodykę obliczeń wielkości odkształcenia oraz przyjęty sposób opisu rozkładu odkształceń lokalnych uzyskane w tych pracach wyniki pozwalają jedynie określić odkształcenia lokalne w miejscu założenia sworzni. Pewne wątpliwości budzi również wyznaczona wielkość odkształcenia lokalnego, ponieważ dowolny punkt materialny przekroju poprzecznego podlega odkształceniu w wyniku wielokrotnego uderzenia kowadeł, które ponadto, wskutek obrotu pręta w kolejnych podaniach, uderzają w różnych miejscach obwodu pręta. Dlatego całkowite odkształcenie lokalne jest niemonotoniczne oraz nieproporcjonalne i nie może być określone jedynie na podstawie pomiarów początkowego i końcowego kształtu przekroju sworzni, odpowiednio przed i za kotliną odkształcenia. Badania te są jednak interesujące, gdyż dają pogląd odnośnie do charakteru zmian odkształceń lokalnych zależnie od warunków technologicznych kucia, głównie typu kalibrowania oraz wielkości gniotu. Dla wszystkich typów kalibrowania stwierdzono, iż odkształcenia lokalne narastają od najmniejszych wartości zlokalizowanych w strefie rdzenia do największych, które występują w warstwach przypowierzchniowych.

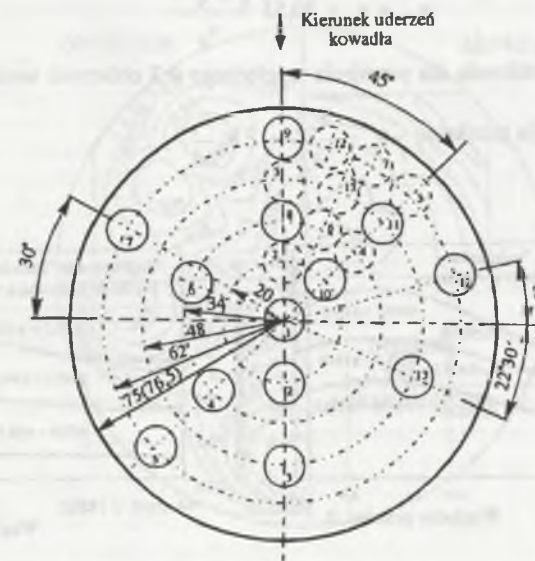
Stwierdzono również, iż odkształcenia lokalne są zróżnicowane na obwodzie pręta, co jest szczególnie widoczne po kuciu przy podawaniu materiału ruchem prostym. Przeprowadzone badania wykazały jednocześnie iż pomijalnie małe jest śrubowe skręcenie pręta wskutek asymetrycznego działania wypadkowych siły nacisku kowadeł. Jako istotny należy odnotować wniosek, iż wpływ tego skręcenia na odkształcenie pręta jest znikomym [14, 66]. Kuciu poddano również pręty z nawiercanymi w osi otworami, symulującymi występowanie wad w postaci nieciągłości materiału. Zmniejszenie średnicy otworu w kolejnych przepustach świadczy o występowaniu w osi pręta ściskających naprężeń promieniowych oraz obwodowych pozwalających na zasklepienie nawet dużych otworów o średnicy $\phi 10 \div 20$ mm (rys. 17). Zasklepienie otworów, zarówno przy kuciu według kalibrowania koło \rightarrow koło jak i koło \rightarrow kwadrat, dla wady o średnicy początkowej 10 mm, uzyskano po przekroczeniu wartości stopnia przekucia $n = 5,5$ [14, 48].



Rys. 17. Wpływ stopnia przekucia na wielkość zasklepienia otworu w osi pręta [14, 48]
Fig. 17. The effect of the forging level on the magnitude of closing the opening in a bar's axis [14, 48]

Bardzo wnikliwe badania technologii kucia wlewków ze stali narzędziowych w czterokowadełkowej kowarce do wstępnego przerobu przy użyciu płaskich kowadeł przedstawiono w pracy [39]. Zasadniczą część badań dotycząca pomiarów rozkładu odkształceń lokalnych wykonana została metodą prętów składanych. Próby kucia przeprowadzono dla prętów z osadzonymi sworzniami, rozmieszczonymi na przekroju pręta (rys. 18) w sposób umożliwiający zageszczenie wyników obliczeń przy uwzględnieniu symetrii odkształceń, występującej przy kuciu czterema kowadłami. Uwzględniając nieproporcjonalny przyrost odkształceń przy przejściu pasma przez kotlinę odkształcenia, całkowite odkształcenie lokalne obliczono sumując odkształcenia lokalne wyznaczone dla wybranych przekrojów poprzecznych, określone na podstawie pomiarów sworzni w tarczach wyciętych na długości kotliny. Jako miarę odkształcenia przyjęto zastępcze odkształcenie rzeczywiste, natomiast odkształcenia lokalne określono przyjmując założenia: jednorodności odkształceń w obszarze jednego sworznia, eliptycznego kształtu zarysu przekroju sworznia, prostokątności kierunków odkształceń głównych do osi kutego pręta oraz monotoniczności

i proporcjonalności przyrostu odkształceń podczas jednego uderzenia kowadeł. Opracowano również metodykę obliczania wartości sumarycznych odkształceń lokalnych realizowanych w kolejnych przepustach.



Rys. 18. Rozmieszczenie sworzni w prętach składanych [39]
Fig. 18. Location of pins in composed bars [39]

Na podstawie dokonanych pomiarów opracowane zostały mapy rozkładu odkształceń lokalnych dla różnych systemów kalibrowania i zróżnicowanych warunków kucia (wielkości gniotu i prędkości podawania). Na rys. 19 przedstawiono wyniki rozkładów odkształceń na przekroju pręta po kuciu trzema wielkościami gniotu - małym $\Delta h = 10$ mm, średnim $\Delta h = 20$ mm i dużym $\Delta h = 40$ mm, przy zastosowaniu małej $v_p = 25$ mm/s i dużej $v_p = 50$ mm/s prędkości podawania według kalibrowania koło \rightarrow koło. Autor pracy [39], wyodrębniając na przekroju pręta trzy koncentryczne strefy określone wielkością promienia względnego R , opracował zależność opisującą rozkłady intensywności odkształceń lokalnych od warunków kucia, w formie funkcji sklejącej. W osi pręta odkształcenie lokalne jest równe wartości obliczonej z redukcji przekroju, zgodnie ze wzorem (1.2 tablica 1). Dla poszczególnych stref odkształcenie lokalne opisują zależności:

strefa I, która zawarta jest w przedziale wielkości promienia względnego $0 \leq R < 0,3$:

$$\varepsilon_I = \varepsilon_p + \frac{\varepsilon_{0,3} - \varepsilon_p}{0,3} R \quad (1)$$

strefa II, obejmująca warstwy środkowe pręta $0,3 \leq R \leq 0,9$:

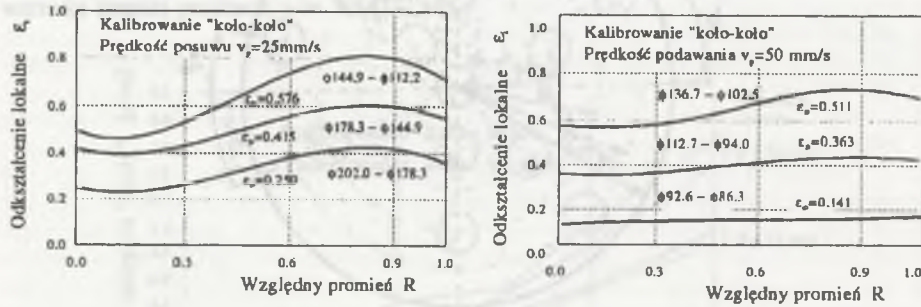
$$\varepsilon_{II} = \varepsilon_p + (33,44 + 27,64 \cdot \ln R) \cdot \frac{1 - e^{-\frac{R}{2}}}{v_p} \quad (2)$$

strefa III, dotycząca warstw przypowierzchniowych $R > 0,9$:

$$\epsilon_{III} = \epsilon_p + 30,53 \frac{1 - e^{-\frac{\epsilon_p}{2}}}{v_p} \quad (3)$$

gdzie: $\epsilon_{0,3}$ - odkształcenie dla promienia względnego 0,3 obliczone według wzoru (2),

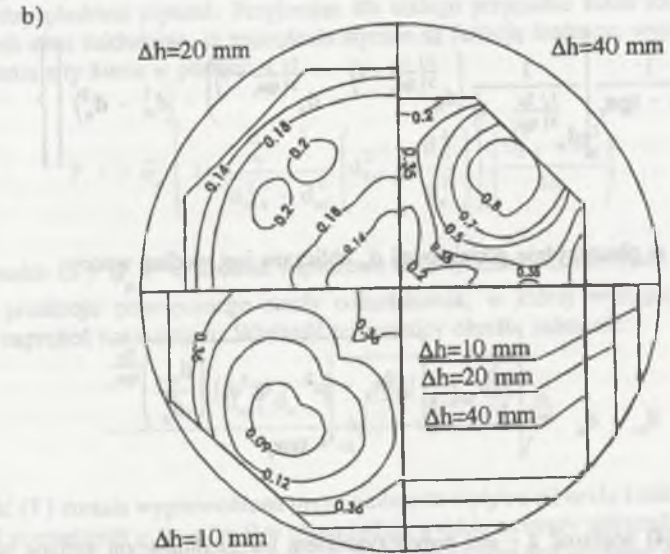
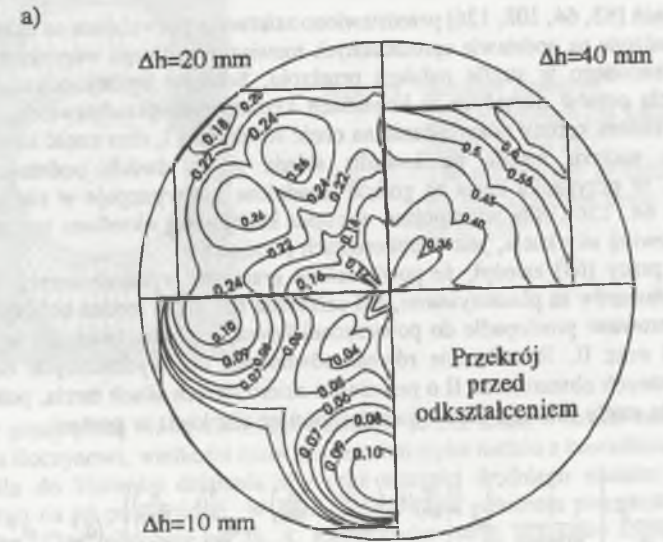
$$\epsilon_p - \text{redukcja przekroju} \quad \epsilon_p = \frac{S_{n-1}}{S_n} = 2 \ln \frac{d_{n-1}}{d_n}$$



Rys. 19. Rozkład odkształceń lokalnych na przekroju prętów, kutych według kalibrowania koło \rightarrow koło, dla różnych wielkości odkształceń w przepuszczeniu oraz małej i średniej prędkości podawania v_p [39]

Fig. 19. The distribution of local strains in the cross-section of bars forged according to circle \rightarrow circle sizing scheme, for various deformation per pass values and for a small and large speed of feeding v_p [39]

Rozkład odkształceń lokalnych w przekroju prętów kutych według kalibrowania koło \rightarrow kwadrat oraz kwadrat \rightarrow ośmiokąt, to znaczy przy podawaniu ruchem prostym, przedstawiono na rys. 20. Wyznaczone doświadczalnie rozkłady odkształceń cechują się zróżnicowaną wielkością odkształcenia lokalnego, zależną od usytuowania rozpatrywanego miejsca przekroju względem kowadeł. Jak stwierdzono w pracach [39, 40, 66], wielkości odkształceń lokalnych zależą jedynie od wielkości gniotu i nie zależą od prędkości podawania, jak to występuje przy podawaniu materiału ruchem złożonym. Przyjęcie tego postulatu pozwoliło autorowi pracy [39] obliczyć współczynniki funkcji przyjętej w postaci wielomianu trzeciego stopnia, pozwalającej na obliczenie odkształcenia lokalnego w dowolnym miejscu przekroju, dla danej wielkości gniotu. Wyrażenie odkształceń poprzez intensywność odkształcenia rzeczywistego pozwala na obliczanie rozkładów odkształceń lokalnych po kilku przepustach przy wykorzystaniu addytywności przyjętej miary odkształcenia. W omawianych badaniach opracowano metodykę obliczania rozkładów odkształceń lokalnych przy kuciu czterema płaskimi kowadłami, według różnych systemów kalibrowania. Opracowane zależności pozwalają w sposób zamierzony dobierać wielkość gniotu w przepuszczeniu oraz wielkość prędkości podawania celem otrzymania pręta o założonym rozkładzie odkształceń lokalnych i odpowiednio do tego zróżnicowanej strukturze, a tym samym własnościach.



Rys. 20. Rozkład odkształceń lokalnych po kuciu według kalibrowania: a) koło \rightarrow kwadrat, b) kwadrat \rightarrow ośmiokąt [39]

Fig. 20. The distribution of local strains after forging according to: a) circle \rightarrow square, b) square \rightarrow octagon sizing scheme [39]

2.4. Siła kucia w kowarce

W pracach [63, 64, 108, 126] przedstawiono zależności pozwalające na określenie siły kucia wyprowadzone na podstawie uproszczonych rozwiązań ogólnego warunku równowagi elementu wydzielonego w strefie redukcji przekroju. Schemat kotliny odkształcenia dla przypadku kucia prętów okrągłych w kowadłach kształtowych przedstawiono na rys. 6. Zgodnie z podziałem kotliny odkształcenia na część redukującą I, oraz część kalibrującą I_k, całkowita siła nacisku metalu na kowadła składa się z dwóch podstawowych sił kształtujących. W przypadku kucia na gorąco zasadnicza siła występuje w części redukcji przekroju [27, 64, 126]. Siła występująca w części kalibrującej określana szacunkowo na 4 + 6 % całkowitej siły kucia, jest w obliczeniach pomijana.

Autor pracy [64] założył, że powierzchnie graniczne wyodrębnionych w kotlinie odkształcenia obszarów są płaszczyznami, zaś całkowitą siłę kucia można obliczyć sumując wszystkie, skierowane prostopadle do powierzchni kowadeł, elementarne siły występujące w obszarach I oraz II. Rozwiązanie równań równowagi dla wydzielonych elementów, przyporządkowanych obszarom I i II o przeciwnie skierowanych siłach tarcia, pozwoliło na wyznaczenie dla strefy redukcji przekroju zależności na siłę kucia w postaci:

$$F = \frac{1.45 z \sigma_p}{\cos^2 \alpha_r} \left\{ \frac{1}{5\mu + \operatorname{tg} \alpha_r} \left[d_{n-1}^{\frac{1}{3} \left(\frac{5\mu}{\operatorname{tg} \alpha_r} + 1 \right)} \left(d_m^{\frac{5}{3} \left(1 - \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha_r} \right)} - d_{n-1}^{\frac{5}{3} \left(1 - \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha_r} \right)} \right) - (d_m^2 - d_{n-1}^2) \right] + \frac{1}{5\mu - \operatorname{tg} \alpha_r} \left[\frac{1}{d_n^{\frac{1}{3} \left(\frac{5\mu}{\operatorname{tg} \alpha_r} - 1 \right)}} \left(d_m^{\frac{5}{3} \left(\frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha_r} + 1 \right)} - d_n^{\frac{5}{3} \left(\frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha_r} + 1 \right)} \right) - (d_m^2 - d_n^2) \right] \right\} \quad (4)$$

Średnica pręta w płaszczyźnie podziałowej d_m obliczana jest według wzoru:

$$d_m = d_n \sqrt[2\mu]{\frac{\operatorname{tg} \alpha_r + \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_r - (\mu^2 - \operatorname{tg}^2 \alpha_r) \left(\frac{d_{n-1}}{d_n} \right)^{\frac{2\mu}{\operatorname{tg} \alpha_r}}}}{\mu + \operatorname{tg} \alpha_r}} \quad (5)$$

W zależności (4) wielkość z - jest współczynnikiem uwzględniającym zmianę naprężenia normalnego spowodowaną zmianami wielkości kąta opasania odkształcanego metalu kowadłami. Na rys. 7 przedstawiono rozkłady naprężeń normalnych w funkcji kąta opasania Θ , wyznaczone w próbach kucia na prasie, prętów okrągłych, płaskimi i kształtowymi kowadłami [123]. Przy kuciu w zakresie kąta $\Theta = 130 \div 150^\circ$ (rys. 21), zmiany naprężenia σ_1 mieszczą się w granicach 15% (rys. 7), co zdaniem W. I. Lubwina [64], pozwala przyjąć współczynnik $z = 1,1$ przy obliczaniu siły kucia według wzoru (4).



Rys. 21. Rozkład naprężeń promieniowych dla kąta opasania $\Theta = 150^\circ$

Fig. 21. The distribution of radial stress for the wrapping angle $\Theta = 150^\circ$

W pracy [126] N. F. Zwierajew założył, że siła kucia w strefie redukcji przekroju jest równa iloczynowi, wielkości rzutu powierzchni styku metalu z kowadłem na płaszczyznę prostopadłą do kierunku działania siły oraz wartości średniego nacisku jednostkowego działającego na tej powierzchni. W celu zdefiniowania położenia płaszczyzny podziałowej autor pracy [126], podobnie jak Ju. S. Radiuczenko [107], przyjął w rozwiązaniu równań równowagi dla procesu kowarkowego założenie warunków tarcia jak dla procesu spęczania klina między płaskimi płytami. Przyjmując dla takiego przypadku kucia rozkład naprężeń normalnych oraz zakładając, iż naprężenia styczne są funkcją średnicy, wyprowadził wzór do obliczania siły kucia w postaci:

$$F = \bar{\sigma}_p \left[1 + \frac{\mu}{\alpha_r} \frac{1}{d_{n-1}^2 - d_m^2} \left(d_{n-1}^2 - \frac{d_m^4}{d_n^2} \right) \right] \left(\frac{d_{n-1}^2 - d_n^2}{4\alpha_r} \right) \quad (6)$$

W zależności (6) $\bar{\sigma}_p$ - to średnie naprężenie uplastyczniające, natomiast d_m - oznacza średnicę przekroju poprzecznego strefy odkształcenia, w której występują maksymalne wartości naprężeń normalnych. Wielkość tej średnicy określa zależność:

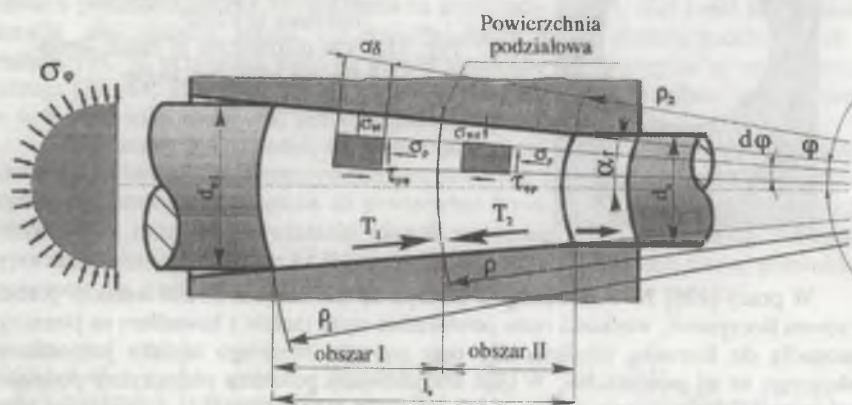
$$d_m = d_{n-1} d_n \sqrt{\frac{2}{d_{n-1}^2 - d_n^2} \ln \frac{d_{n-1}}{d_n}} \quad (7)$$

Zależność (7) została wyprowadzona przy pominięciu wpływu sił tarcia i założeniu równości naprężeń normalnych $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ w płaszczyźnie wyjścia ze strefy odkształcenia [63, 107].

Analizując układ obciążeń działających na elementarną powierzchnię w strefie redukcji przekroju Ju. S. Radiuczenko [108] podał uproszczone rozwiązanie równań równowagi dla współrzędnych sferycznych, przyjmując tym samym, że powierzchnie graniczne wydzielonych obszarów są czaszami kuli (rys. 22). Zakładając jednocześnie, że naprężenie normalne po obu stronach sfery neutralnej (zdefiniowanej przy założeniu, że $d_m = \sqrt{d_u d_l}$) jest rozłożone równomiernie, Ju. S. Radiuczenko wyprowadził wzór na całkowitą siłę kucia całkowując równanie równowagi w wydzielonych granicach obszarów I oraz II strefy redukcji

przekroju. Sumując wynik całkowania oraz wprowadzając uproszczenia dla funkcji trygonometrycznych otrzymał wzór na siłę kucia w postaci równania:

$$F = \frac{\sigma_p}{4 \alpha_r^2} \left[(1 + 2\alpha_r) d_{n-1}^2 - 2 (d_{n-1} d_n) + (1 - 2\alpha_r) d_n^2 \right] \quad (8)$$



Rys. 22. Schemat naprężenia i sił tarcia w obszarach I i II kotliny odkształcenia [108]
Fig. 22. A diagram of stress and of friction forces in regions I and II of the deformation gap [108]

Przedstawione zależności (4),(6),(8), pozwalające obliczyć siłę kucia w procesie kowarkowym, wyprowadzono opierając się na uproszczonych modelach procesu kowarkowego. Podstawowe uproszczenia dotyczą przyjęcia osiowoosymetrycznego stanu naprężenia, założenia liniowego rozkładu naprężeń stycznych w przekrojach poprzecznych strefy odkształcenia, przyjęcia równomiernego rozkładu naprężeń normalnych na długości strefy redukcji przekroju lub też przyjmowania do rozwiązań doświadczalnie ustalanych zależności rozkładu naprężeń stycznych na powierzchni kontaktu narzędzia z metalem zgodnie z próbami ściskania próbek klinowych między płaskimi płytami. Dalsze założenia dotyczą warunków określających położenie płaszczyzny podziałowej oraz określających zmiany wielkości kąta opasania metalu kowadłami co istotnie wpływa na charakter rozkładu naprężeń normalnych w strefie kontaktu (rys. 7, 21). Przykładem jest wzór (8) wyprowadzony praktycznie dla takich samych warunków, co zależność (4), lecz przy założeniu, że kąt opasania dla jednego kowadła Θ wynosi 180° .

Odmiennej sposób obliczania siły kucia przy założeniu, że całkowita siła nacisku zarówno dla strefy redukcji przekroju, jak i strefy kalibrującej, jest iloczynem powierzchni styku metalu z kowadłem oraz średniego nacisku jednostkowego, przedstawiono w pracach [120÷122]. Zdaniem autora tych prac, błędem jest nieuwzględnianie w obliczeniach sił wzdłużnych wywoływanych przez manipulator, a działających podobnie jak naciąg i przeciwny naciąg przy walcowaniu. Wniosek ten potwierdziły wyniki badań procesu kucia na zimno, na podstawie których opracowano zależności do obliczania powierzchni styku dla całej strefy odkształcenia, jak również zależności do obliczania wartości średniego nacisku jednostkowego

dla poszczególnych stref. Trudno jednak adaptować opracowane zależności empiryczne dla procesu kucia na gorąco, gdyż jak stwierdza sam autor [121], przy dużych odkształceniach, prawdopodobnie z powodu zmian warunków tarcia na długości strefy odkształcenia, obliczone wartości siły kucia znacznie różniły się od wyników pomiarów.

Odrębny problem stanowi określenie sił kucia prętów o przekroju nieokrągłym. Przedstawiona w pracy [63] analiza metodyki obliczania naprężeń dla założonego modelu strefy odkształcenia oraz przyjętego rozkładu sił tarcia przy kuciu prętów okrągłych wykazała, że przedstawione wzory (4), (6), (8) mogą być wykorzystywane do obliczania orientacyjnej siły kucia przy kształtowaniu dowolnego przekroju. W tym celu należy do wzorów na siłę kucia wprowadzić zastępcze wymiary średnic strefy odkształcenia, obliczone z zasady równości pól powierzchni przekroju kutego pręta kwadratu i zastępczego pręta okrągłego.

Omówione zależności pozwalają jedynie na obliczenie orientacyjnych wartości wielkości siły kucia. Wynika to z przyjętych uproszczeń oraz założeń modelu kucia, jak również braku uwzględnienia zmian naprężenia uplastyczniającego w funkcji parametrów procesu kucia. Z tych powodów niezmiernie ważne staje się określenie, na ile różnią się wyniki obliczeń od wyników pomiaru. Wnikliwe badania tego problemu dla kucia na gorąco stali NC10 oraz SW18 w kowarce typu SXL-40 przy zastosowaniu kalibrowania koło → koło przedstawiono w pracy [34]. Na podstawie dokonanego porównania wartości zmierzonych i obliczonych stwierdzono, że otrzymane rozbieżności wyników mieszczą się w granicach $10 \div 25\%$, przy czym wielkości obliczone były zawsze wyższe od zmierzonych.

Znacznie dokładniejsze rezultaty otrzymano w pracy [60], gdzie autorzy analizując proces kucia prętów okrągłych, kwadratowych i prostokątnych czterema płaskimi kowadłami, dla różnych typów ogniska odkształcenia, wyznaczyli pole rzutu powierzchni styku odkuwki z kowadłem w funkcji zmian warunków kształtowania zarówno geometrycznych, jak i technologicznych. Na podstawie wyprowadzonych zależności opisujących kotlinę odkształcenia stwierdzają, iż możliwe jest określenie siły i mocy kucia. Ze względu jednak na złożony opis matematyczny opracowanego modelu, praktyczne rozwiązanie, dla uśrednionych wielkości parametrów technologicznych, podano w formie aproksymowanej wielomianami trzeciego stopnia. Siłę kucia dla przypadków kształtowania prętów okrągłych płaskimi kowadłami w kowarce czterokowadełkowej określa zależność:

$$F = \sigma_p (14,6 - 103,4 \cdot 10^{-2} \psi + 2,9 \cdot 10^{-2} \psi^2 - 10,5 \cdot 10^{-5} \psi^3) 10^{-3} \quad (9)$$

gdzie:

$$\psi = 46,5 \cdot 10^{-3} d_{n-1} + 48,1 \cdot 10^{-2} (d_{n-1} - d_n) + 30,9 \cdot 10^{-2} v_p \quad (10)$$

Dla obliczenia mocy kucia opracowano następującą zależność:

$$W = \sigma_p (19,17 - 12,14 \cdot 10^{-1} \psi_1 + 2,48 \cdot 10^{-2} \psi_1^2 - 7,74 \cdot 10^{-3} \psi_1^3) 10^{-1} \quad (11)$$

gdzie:

$$\psi_1 = 5,71 \cdot 10^{-2} d_{n-1} + 7,47 \cdot 10^{-1} (d_{n-1} - d_n) + 4,25 \cdot 10^{-1} v_p \quad (12)$$

W równaniach (9)÷(12), przy wprowadzeniu naprężenia w MPa, wymiarów liniowych w mm prędkości podawania w mm/s, siła kucia wyrażona jest w MN natomiast moc w kW.

Przedstawione zależności posłużyły do obliczenia siły kucia, którą porównano z wielkością siły nacisku kowadeł wyznaczoną na podstawie tensometrycznych pomiarów odkształcenia korpusu kowarki. Przy stosowaniu w obliczeniach naprężenia uplastyczniającego określonego w badaniach plastometrycznych z uwzględnieniem występującej w procesie technologicznym średniej temperatury, odkształcenia określonego wielkością redukcji przekroju oraz średniej prędkości odkształcenia, różnice pomiędzy obliczeniami a danymi doświadczalnymi mieściły się w granicach 20% wartości zmierzonych.

2.5. Wpływ procesu kucia w kowarce na strukturę i własności wyrobu

Wiele prac prowadzonych w Katedrze Mechaniki i Technologii Przeróbki Plastycznej oraz Katedrze Nauki o Materiałach Politechniki Śląskiej, w których analizowano wpływ technologii kucia w kowarce na strukturę stali, dotyczyło badań metalicznych materiałów narzędziowych. Wyniki przeprowadzonych badań w zakresie sposobów kształtowania struktury tych materiałów w procesie technologicznym podsumowano w pracach [11, 39, 43÷45, 47, 65], natomiast w zakresie strukturalnych kryteriów oceny ich jakości zebrano w pracy [13] oraz publikacjach [10, 12, 33, 117, 118].

Konwencjonalne badania metalograficzne makro- i mikroskopowe oraz wrywkowa ocena fazy węglkowej metodami metalografii ilościowej przeprowadzona dla stali szybko tnącej SKC [39] wykazały, że w procesie kucia w kowarce następują wyraźne zmiany wielkości, kształtu i niejednorodności rozmieszczenia węglków, ściśle związane z odkształceniem. Na podstawie tego wniosku opracowano wzory pozwalające obliczyć wielkość węglków oraz skupisk węglków dla danej wielkości początkowej elementów struktury oraz lokalnych odkształceń. Uzyskano następujące empiryczne zależności:

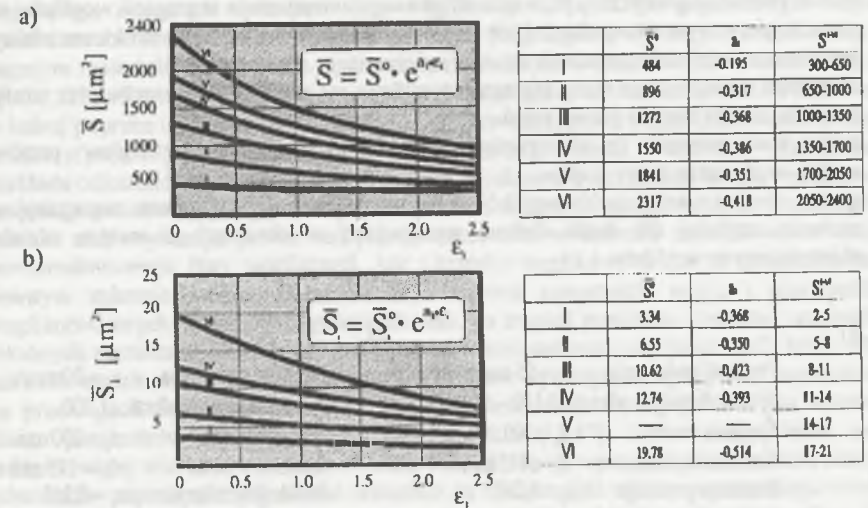
- dla pojedynczych węglków

$$\bar{S}_i = \bar{S}_i^0 \exp[(-0.313 - 0.009 \bar{S}_i^0) \varepsilon_i] \quad (13)$$

- dla skupisk węglków

$$\bar{S} = \bar{S}^0 \exp[(-0.190 - 0.00011 \bar{S}^0) \varepsilon_i] \quad (14)$$

przy zróżnicowanej początkowej wielkości węglków i ich skupisk, które ujęte w przedziały od I÷VI przedstawiono na rys. 23. Wyznaczenie ilościowych związków pomiędzy odkształceniem lokalnym a parametrami stereologicznymi fazy węglkowej dla stali szybko tnącej umożliwiło opracowanie modelu oddziaływania odkształcenia na fazę węglkową [104]. Opierając się na wyznaczonych w pracach [39, 43] zależnościach, stworzono program komputerowy pozwalający na projektowanie procesu kucia prętów ze stali narzędziowej w kowarkach z uwzględnieniem wymagań co do cech użytkowych gotowego wyrobu. Część programu dotycząca wyznaczania parametrów procesu kucia przy założonym rozkładzie odkształceń lokalnych stanowi opracowanie autora opisane w pracach [28÷32, 78].



Rys. 23. Wpływ odkształcenia lokalnego na wielkość: a) skupisk węglków, b) pojedynczych węglków [31]

Fig. 23. The effect of local deformation on the magnitude of: a) carbides clusters, b) single carbides [31]

W programie tym do analizy rozkładu odkształceń wprowadzono wskaźnik niejednorodności odkształcenia opisany zależnością:

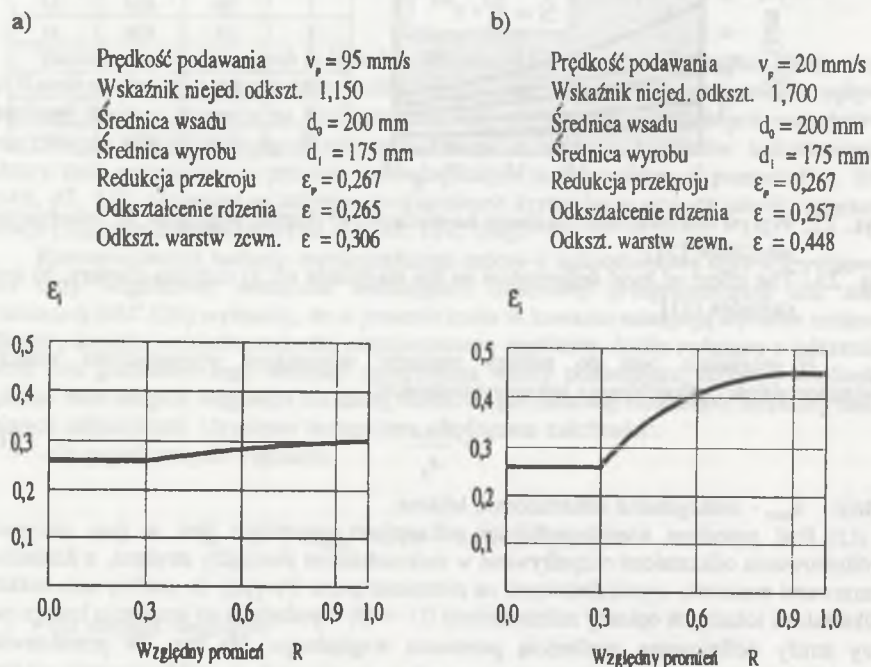
$$f = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_p} \quad (15)$$

gdzie: ε_{max} - maksymalne odkształcenie lokalne.

Pod pojęciem niejednorodności odkształceń rozumiane jest w tym przypadku zróżnicowanie odkształceń rozpatrywane w makroobszarze pomiędzy strefami, a dokładniej, warstwami materiału wyodrębnionymi na promieniu pręta. Przyjęty do analizy opis rozkładu odkształceń lokalnych opisany zależnościami (1) ÷ (3) wyodrębnia na przekroju kutego pręta trzy strefy definiowane wielkością promienia względnego. Na rys. 24 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń programu przy założeniu minimalnego zróżnicowania wielkości odkształceń lokalnych między warstwą wierzchnią a rdzeniem (rys. 24.a) oraz zróżnicowania maksymalnego (rys. 24.b).

Wprowadzona do omawianego programu, empiryczna zależność pomiędzy wielkością początkową węglków, odkształceniem lokalnym i wielkością węglków została opracowana dla prętów ze stali szybko tnącej SKC [39]. Wykazanie uniwersalności tej zależności umożliwiłoby komputerową symulację fazy węglkowej w prętach o różnych przekrojach i różnym stopniu przekucia, dla innych materiałów narzędziowych. Analiza statystyczna wyników oceny wpływu odkształcenia lokalnego na wielkość węglków została przeprowadzona dla oszczędnościowych stali szybko tnących o podwyższonej twardości [47], a także nieledeburtycznych stopów narzędziowych [13]. Wyznaczone mapy strukturalne na przekrojach wzdłużnych i poprzecznych, wykonane zarówno dla wlewków, jak i odkutych prętów, pozwoliły na określenie występowania pewnych prawidłowości zmian fazy węglkowej w funkcji cech pierwotnych struktury oraz parametrów kucia. Sformułowano następujące wnioski dotyczące wpływu stopnia przekucia na strukturę badanych prętów:

- proces przeróbki plastycznej prowadzi do istotnego zmniejszenia segregacji węglików w prętach, przy czym nawet dla dużych stopni przekucia widoczne są w strukturze efekty świadczące o dziedziczeniu cech struktury pierwotnej,
- obszarami o szczególnie dużej segregacji węglików są: strefa osiowa prętów oraz strefy przylegające do stopy i głowy prętów,
- proces kucia prowadzi do intensywniejszych zmian struktury w obszarze głowy prętów aniżeli w obszarze stopy prętów,
- proces rozdrabniania siatki węglików i przekształcania jej w pasma segregacyjne zachodzi szybciej dla siatki drobnej występującej w obszarach o małym udziale objętościowym węglików.



Rys. 24. Wpływ parametrów technologii kucia na rozkład odkształceń lokalnych - wyniki obliczeń programu [32]

Fig. 24. The effect of parameters of forging technology on the distribution of local strains - results of programme calculations [32]

W odniesieniu do map strukturalnych dla wlewków stwierdzono zróżnicowanie na przekroju wzdłużnym wlewka udziału objętościowego węglików pierwotnych oraz zróżnicowanie wielkości węglików, które świadczą o występowaniu we wlewku trzech obszarów istotnie różniących się strukturą. W obszarze przylegającym do stopy wlewka ujawniono najdrobniejsze węgliki, jednak ich udział objętościowy był największy (10%). Charakterystyczną cechą strefy środkowej wlewka jest najmniejszy udział objętościowy węglików (4% do 6%). W tej strefie występują węgliki o średniej powierzchni płaskiego przekroju do $30 \mu\text{m}^2$, tj. o wielkości zbliżonej do węglików występujących pod nadlewem.

Największą zmienność tych cech fazy węglikowej na przekroju poprzecznym wlewka stwierdzono w strefie występującej pod nadlewem [47]. Ogólny wynik tych badań oparty na bogatym materiale doświadczalnym i analizach zawartych w pracach [10÷13, 28÷30, 32, 33, 37, 39, 43÷45, 47, 65, 78, 104, 117, 118] potwierdza założenie, że istnieje zależność, w której poprzez ilościowe określenie struktury pierwotnej możliwe jest ilościowe określenie struktury prętów po przekuciu w zależności od warunków kucia w kowarce i otrzymanego rozkładu odkształcenia lokalnego. Jednocześnie uzyskane wyniki analizy nie dały podstaw do uznania przedstawionej w pracach [39, 44, 45, 47] zależności za uniwersalną. Poszczególne gatunki stali wykazują pewne cechy indywidualności w zakresie zróżnicowania udziału powierzchniowego fazy węglikowej, jak i kształtu węglików. O ile te spostrzeżenia w pewnym zakresie można wiązać ze zróżnicowaną zawartością węgla i pierwiastków węglilotwórczych w badanych gatunkach stali, to stopień przekucia i rozkład odkształceń lokalnych skutecznie oddziałują zarówno na rozmieszczenie węglików M_6C , MC i NbC , jak i ich kształt oraz wielkość. Podstawowy wniosek wynikający z tych badań stwierdza, iż na przekrojach poprzecznych prętów kutech w kowarkach występuje strefowa zależność zmian parametrów morfologicznych fazy węglikowej [47]. Są to strefy, które prócz zróżnicowanej wielkości odkształceń lokalnych, różnią się występowaniem istotnie różnych schematów naprężenia. Wynik ten wskazuje na konieczność opracowania takiego modelu oddziaływania parametrów kucia na fazę węglikową stali szybkoznących, aby możliwe było również uwzględnienie wpływu występującego w kotlinie odkształcenia stanu naprężenia.

Niemniej ważnym zagadnieniem dla poprawnego określenia omawianych uniwersalnych zależności jest określenie metody wyznaczania rozkładu odkształceń na przekrojach poprzecznych prętów kutech w kowarkach. Dotyczy to zagadnienia uchwycenia w sposobie określania rozkładu odkształceń lokalnych zarówno parametrów technologicznych, jak i danych materiałowych, gdyż jak stwierdzono w pracach [28÷29, 78], zastosowanie związków czysto geometrycznych nie oddaje stanu mechanicznego występującego w procesie kowarkowym na tyle dokładnie, aby można go uznać za uniwersalny dla jednoznacznego definiowania warunków kształtowania struktury prętów kutech w kowarkach.

2.6. Podsumowanie przeglądu literaturowego

Analiza płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia oraz określenie schematu naprężenia przy kuciu w kowarce były przedmiotem prac zarówno o charakterze teoretycznym, jak i doświadczalnym. Prezentowane w literaturze rozwiązania, uzyskane na drodze analitycznej lub teoretyczno-doświadczalnej, zawierają szereg założeń i często daleko idących uproszczeń. Samo modelowanie kinematyki procesu kowarkowego stwarza już wiele problemów. Teoretyczna analiza wymaga rozwiązania układu równań teorii plastyczności obejmujących między innymi przyjęte związki geometryczne, równania fizyczne, równania równowagi, które muszą zarazem uwzględniać specyfikę procesu kowarkowego oraz technologiczne warunki realizacji procesu. Z uwagi na złożony opis matematyczny takiego modelu, rozwiązania w przypadku opracowań teoretycznych zawierają uproszczenia. Spotykane w różnych opracowaniach najbardziej istotne założenia budowy uproszczonych modeli procesu kowarkowego, a zarazem najbardziej kontrowersyjne to:

- przyjęcie określonej geometrii kotliny odkształcenia, najczęściej w formie stożka ściętego dla strefy redukcji przekroju oraz walca dla strefy kalibrującej,

- uproszczenie lub całkowite pominięcie schematu mechanicznego procesu, głównie w zakresie konsekwencji wzajemnego ruchu kowadeł i kutego materiału,
- przyjęcie symetrii osiowej zarówno dla naprężeń, jak i odkształceń względem osi pręta,
- założenie, iż proces jest statyczny lub też izotermiczny, zaś odkształcenia są monotoniczne, a ich przyrosty proporcjonalne.

Dalsze uproszczenia wynikają z przyjęcia przedstawionych założeń lub przyjętego celu obliczeń. Przykładem tego są zależności służące do obliczania siły kucia, gdzie w rozwiązaniach zakładany jest rozkład naprężeń stycznych i normalnych wzdłuż kotliny odkształcenia, podobnie jak przy speczaniu próbek klinowych płaskimi kowadłami, zaś warunki graniczne ustalane są doświadczalnie. Dlatego przedstawione zależności (4,6,8) pozwalają jedynie na obliczenie orientacyjnych wartości wielkości sił kucia. Wynika to zarówno z przyjętych uproszczeń modelu kucia w kowarce, jak również braku uwzględniania w obliczeniach zróżnicowania naprężenia uplastyczniającego w funkcji parametrów technologicznych w różnych miejscach kotliny odkształcenia.

Proponowane rozwiązania teoretyczne, opracowane na bazie uproszczonych modeli płynięcia metalu, mają charakter opisowy i nie dają możliwości wyznaczenia ilościowej charakterystyki naprężenia lub odkształcenia. Równocześnie w przedstawianych w literaturze analizach procesu kowarkowego stwierdza się, że geometria narzędzi, kształt kotliny odkształcenia, wielkość kąta opasania, wielkość gniotu oraz prędkości podawania i typ kalibrowania w sposób znaczący oddziałują na schemat mechaniczny procesu. Praktycznie zaś wymienione czynniki stanowiące o specyfice procesu kowarkowego w przytaczanych rozwiązaniach teoretycznych są w różnym stopniu upraszczane lub pomijane.

Znaczący postęp w zakresie matematycznego modelowania procesów przeróbki plastycznej metali, w tym również procesu kowarkowego, został spowodowany zastosowaniem metod numerycznych [16, 53, 58÷60, 67, 110], zwłaszcza zaś termomechanicznej analizy opartej na metodzie elementów skończonych [90]. Wprowadzenie do numerycznej analizy niejednorodnego pola temperaturowego pozwala na badanie termomechanicznego stanu metalu w kotlinie odkształcenia na poziomie lokalnym, to znaczy w dowolnie wyodrębnionym elemencie tego obszaru [76, 79]. Oczywiście, rozwiązania te zawierają różnego rodzaju założenia odnośnie do przyjętego modelu ciała, sposobu modelowania jego własności czy też ogólnie, sposobu rozwiązania zadania numerycznego. Są to jednak założenia, które pozwalają wprowadzić i uwzględnić w obliczeniach wielkości istotne dla modelowania procesu. Programy symulujące oparte na bazie tej metody pozwalają ponadto na opisanie dowolnej fazy procesu.

3. DOBÓR TEMATU I JEGO UZASADNIENIE

Badaniom oraz analizie poddano proces kucia w czterokowadełkowej kowarce do wstępnego przerobu. Wybór ten uzasadniają następujące przesłanki:

- wstępne kucie w kowarkach stosowane jest do przerobu stali wysokostopowych, trudno odkształcalnych, wymagających ścisłego przestrzegania rygorów technologii - jest to więc proces technicznie trudny, lecz rokujący duże efekty ekonomiczne w przypadku opracowania programu komputerowo wspomaganego projektowania technologii,
- stopień automatyzacji kucia w kowarce pozwala na zastosowanie technik komputerowych zarówno na etapie projektowania, jak i sterowania procesem,
- pod względem modelowania jest to proces złożony, który w aktualnym stanie technik komputerowych wymaga zastosowania rozwiązań uproszczonych, a zarazem uniwersalnych, co stwarza możliwości adaptowania tego modelu do projektowania innych technologii procesów przeróbki plastycznej na gorąco o podobnym schemacie działania narzędzi oraz podobnym charakterze płynięcia metalu.

Prezentowane w literaturze rozwiązania sposobu doboru oraz obliczania parametrów technologii procesu kowarkowego odnoszą się głównie do przypadków kucia prętów okrągłych w kowadłach kształtowych. Ponadto zagadnienie projektowania technologii traktowane jest przyczynkowo lub też zawężane do określenia: typu kalibrowania, wielkości gniotów w przepuście, dopuszczalnej wartości siły oraz mocy kucia, wyboru konstrukcji wykroju lub typu kowadeł oraz przyjęcia przedziału temperatury kucia z zakresu temperatur dopuszczalnych dla danego materiału. Stosowana w nielicznych przypadkach analiza płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia lub analiza stanu naprężenia, dokonywana na podstawie uproszczonych rozwiązań zależności teorii plastyczności lub przy użyciu metod inżynierskich, w tym numerycznych [16, 53, 58, 59, 110], znajduje ograniczone zastosowanie z uwagi na założenie osiowej symetrii obciążeń względem osi kutego pręta. W przypadku kucia płaskimi kowadłami trudno jednak przyjąć takie założenie, z którego wynika, iż w kierunku obwodowym pręta nie ulega zmianie termomechaniczny stan procesu plastycznego kształtowania oraz stałe są warunki technologiczne jego realizacji.

Przytoczone w części literaturowej zależności opisujące proces kowarkowy (tablica 1÷5) pozwalają na projektowanie technologii kucia dla wielkości uśrednionych lub raczej reprezentatywnych, stałych dla całego przepustu. Założenie to całkowicie pomija historię odkształcenia i zmieniające się w kotlinie odkształcenia wielkości: odkształcenia, prędkość odkształcenia, temperatury pasma, a w konsekwencji również naprężenia uplastyczniającego określającego przecież zmiany wymienionych wielkości. Równocześnie wnioski wynikające z analizy danych literaturowych wskazują na konieczność uwzględnienia w systemie projektowania zmian występujących lokalnie w kotlinie odkształcenia [22, 29, 31, 32, 39, 43÷45].

Projektowanie technologii kucia w kowarce z uwzględnieniem zmian występujących lokalnie w kotlinie odkształcenia wymaga opracowania sposobu symulacji procesu. W tym zakresie niezbędne jest zbudowanie modelu ujmującego zmiany technologicznych warunków odkształcenia, decydujących o własnościach wyrobu. Projektowanie technologii zapewniającej

uzyskanie wyrobu o założonej strukturze, a tym samym własnościach jest możliwe, gdy znane są związki między odkształceniem (rozkładem odkształceń) a rozwojem struktury, jak w przypadku przedstawionych zależności (1) ÷ (3) opracowanych dla fazy węglkowej stali SKC [29, 31, 32, 39, 44, 45, 47].

Należy jednak zauważyć, iż użyty do wyznaczenia przytoczonych zależności model rozkładu odkształceń lokalnych opracowany na podstawie metody prętów składanych [39] zawiera pewne niedoskonałości. Modelowanie rozkładu odkształceń metodą prętów składanych obarczone jest ograniczeniami, które wynikają z minimalnej - możliwej do zastosowania wielkości średnicy sworznia oraz stopnia upakowania sworzni na przekroju kutego pręta. Wpływ na proces płynięcia wywiera również zróżnicowanie własności materiałów sworznia i osnowy. Ponadto metoda ta nie stwarza podstaw do ekstrapolacji wyników poza obszar wypełniony sworzniami, czyli do strefy przypowierzchniowej pręta, gdzie występuje oddziaływanie sił tarcia oraz wówczas, gdy zachodzi intensywne wymiana ciepła, wskutek oddziaływania kowadeł. Dlatego też analiza procesu kowarkowego oparta na tej metodzie musi zawierać te same ograniczenia. Prawdopodobnie wymienione niedoskonałości metody prętów składanych, a zwłaszcza brak możliwości ujęcia własności i wpływu reologii odkształcanego materiału oraz oddziaływania stanu naprężenia na warunki rozwoju struktury w kotlinie odkształcenia nie pozwoliły na wyznaczenie uniwersalnej zależności opisującej związek pomiędzy rozkładem odkształceń lokalnych a strukturą fazy węglkowej prętów ze stali narzędziowych kutech w kowarce.

Wyniki pomiarów odkształceń lokalnych otrzymane metodą prętów składanych mogą natomiast służyć do weryfikacji obliczeń modelu numerycznego. W odniesieniu do metod eksperymentalnych, problem wyznaczenia rozkładów odkształceń wynika głównie z braku możliwości uniknięcia ograniczeń wynikających ze skończonych (zbyt dużych wymiarów) elementów siatki pomiarowej, segmentu składanej próbki lub minimalnej średnicy sworznia możliwego do zastosowania w metodzie prętów składanych. Ograniczenia w ujęciu badaniami doświadczalnymi praktycznie występującego zakresu zmian parametrów technologicznych dotyczą głównie prędkości odkształcenia i wielkości odkształceń pojedynczych oraz temperatury i czasu. Uniemożliwia to badania zmian stanu termomechanicznego kotliny odkształcenia w funkcji stopnia zaawansowania procesu kucia. Technicznie zaś brak możliwości badań w zakresie krótkich czasów i trudności w określeniu rzeczywistego pola temperatury ograniczają doświadczenie do zakresu małych prędkości odkształcenia i dużych wielkości odkształceń pojedynczych. Problematiczne jest nawet określenie naprężenia uplastyczniającego, co stwarza trudności w projektowaniu technologii kucia, przy braku racjonalnych przesłanek doboru, między innymi, wielkości gniotów pojedynczych, liczby przepustów, typu kalibrowania oraz obliczania siły kucia. Stąd też brak jednoznacznych kryteriów projektowania technologii kucia w kowarce, ujmujących ogólnie rozumiany wpływ parametrów kucia na zmiany struktury i własności wyrobu.

Modelowanie procesu technologicznego poprzez wykorzystanie termomechanicznej symulacji (MES) pozwala na wyznaczenie w skali makro dla założonego kontinuum materialnego rozkładów lokalnych wartości charakteryzujących stan odkształcenia, stan naprężenia oraz rozkład temperatury. Dane te, niezbędne dla projektowania procesu, nie są jednocześnie obarczone ograniczeniami, jakim podlega eksperyment w zakresie minimalizacji przyrostów prędkości i wielkości odkształcenia, zwłaszcza odkształcenia istotnie zróżnicowanego lokalnie. Zasadność użycia metody elementów skończonych do analizy procesu wstępnego przerobu wlewków w kowarce wynika z dwóch generalnych przesłanek:

- możliwości określenia rozkładu odkształceń w procesie charakteryzującym się niemonotonicznym oraz nieproporcjonalnym przebiegiem odkształcenia oraz znacznym gradientem odkształcenia na przekroju pasma,

- możliwości przeprowadzenia analizy procesu w zakresie parametrów, dla których eksperyment jest istotnie ograniczony lub wręcz nie daje możliwości dokonania takiej analizy.

W uzupełnieniu, aktualnie już jako truizm, można przytoczyć stwierdzenie, iż "... sterowanie rzeczywistą częścią systemu produkcyjnego wymaga symulowania działania nie istniejących jego elementów." Badanie warunków termomechanicznych obszaru odkształcenia na poziomie lokalnym, tzn. w dowolnym wyodrębnionym elemencie tego obszaru, daje podstawy do analizy procesu płynięcia metalu i prognozowania cech struktury, a tym samym własności wyrobu. Uwzględnienie czynników wpływających na strukturę materiału wymaga modelowania zjawisk zachodzących zarówno w strefie odkształcenia, jak i poza tą strefą. Oznacza to konieczność odnoszenia procesu modelowania do konkretnego procesu kucia w kowarce, lecz nie wyklucza możliwości korzystania z elementarnych modeli lub rozwiązań o charakterze uniwersalnym.

Na bazie pozytywnych doświadczeń zastosowania metody elementów skończonych do analizy płynięcia metalu w procesach: walcowania kształtowników [2, 18, 21, 54] oraz wyrobów płaskich [1, 95, 99 ÷ 101, 103], kucia swobodnego i matrycowego [8, 55, 96], wyciskania [69], a także w odniesieniu do analizy procesu kowarkowego [90], w tym wstępnych prób własnych [28, 74, 76, 78], należy oczekiwać pomyślnego wykorzystania wyników numerycznej symulacji (MES) przy projektowaniu technologii kucia w kowarce.

4. CEL, TEZA I PLAN PRACY

W niniejszej pracy podjęto próbę opracowania komputerowego programu wspomagania projektowania technologii kucia w kowarce do wstępnego przerobu, z uwzględnieniem zjawisk lokalnych występujących w kotlinie odkształcenia. Wprowadzenie do projektowania technologii lokalnie występujących zmian parametrów stanu termomechanicznego (stanu naprężenia, odkształcenia, pola temperatury) wymaga opracowania modelu symulującego proces płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia na bazie metody elementów skończonych (MES). Uwzględniając aplikacyjno-poznawczy charakter pracy przyjęto, iż model przydatny w projektowaniu technologii kucia spełniać musi następujące wymagania:

- uwzględniać warunki technologiczne procesu kucia, w tym stosowane przy wstępnym przerobie źródnicowane warianty kalibrowania oraz kucie w kilkunastu następujących po sobie przepustach,
- ujmować geometrię kotliny odkształcenia oraz kinetykę ruchu narzędzi i odkształcanego materiału, określającą specyfikę mechaniki procesu kowarkowego oraz charakter płynięcia metalu,
- uwzględniać własności odkształcanego materiału, głównie zaś relacje zmian naprężenia uplastyczniającego oraz lokalnych wielkości odkształcenia, prędkości odkształcenia oraz temperatury,
- stwarzać możliwość przeprowadzenia obliczeń w praktycznym do przyjęcia czasie.

Z uwagi na kinematykę ruchu narzędzi i odkształcanego metalu oraz sposób płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, niezbędne jest zastosowanie w analizie (MES) elementów przestrzennych. Uwzględniając moc obliczeniową oraz pojemność pamięci praktycznie dostępnych komputerów, określającą możliwości obliczeniowe oraz czas obliczeń numerycznych, podjęto próbę budowy modelu symulującego proces kucia w kowarce opierając się na (MES) dla zagadnień dwuwymiarowych. Zamierzeniem autora pracy było zastosowanie najprostszego rozwiązania metody elementów skończonych dla zagadnień przestrzennych, jakim jest analiza procesów osiowo-symetrycznych. W tym celu przyjęto założenie stwierdzające, iż w procesach przeróbki plastycznej na gorąco, w których spełniona jest zasada zachowania płaskich przekrojów, termomechaniczną analizę płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia można dokonać przy użyciu (MES) dla zagadnień osiowo-symetrycznych.

Zasada zachowania płaskich przekrojów, w odniesieniu do procesu kucia w kowarce, czterema płaskimi jednocześnie uderzającymi kowadłami, zarówno przy podawaniu materiału ruchem prostym, jak i ruchem złożonym, została potwierdzona w pracach [27, 39÷41]. Analizy rozkładu odkształceń lokalnych oraz potwierdzenie zasady zachowania płaskich przekrojów, w przytoczonych pracach, dokonano przy użyciu metody prętów składanych (MPS).

Zgodnie z przedstawionymi założeniami przyjęto, iż analizę stanu termomechanicznego przestrzennej kotliny odkształcenia można przeprowadzić stosując superpozycję stanów kolejnych przekrojów, uzyskanych w wyniku symulacji procesu kucia czterema płaskimi kowadłami, materiału w kształcie pierścienia (torusa), o średnicy wielokrotnie

większej od średnicy analizowanego przekroju. Taka interpretacja fizyczna sposobu obciążania odkształcanego materiału spełnia założenia dla zagadnień osiowo-symetrycznych, to znaczy warunek obciążania analizowanego przekroju siłami symetrycznie rozłożonymi względem osi. Dla opracowywanego sposobu symulacji procesu kucia, przy użyciu warstwowo modelowanej kotliny odkształcenia, na podstawie analizę metodą elementów skończonych, przyjęto roboczą nazwę metody torusa. Na podstawie rezultatów wstępnych prac własnych, dotyczących symulacji procesu kucia w kowarce przy użyciu modelu trójwarstwowego [22, 78], w których zasada zachowania płaskości przekrojów potwierdzona została wynikami obliczeń numerycznych, a także na podstawie pozytywnych wyników symulacji płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia przy założeniu płaskiego stanu odkształcenia plastycznego [76, 79], sformułowano następującą tezę pracy:

Termomechaniczna symulacja procesu płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, przy użyciu metody torusa, stwarza racjonalne podstawy projektowania technologii kucia w czterokowadełkowej kowarce do wstępnego przerobu, z uwzględnieniem występujących lokalnie zmian stanu naprężenia i odkształcenia oraz temperatury, w zależności od własności reologicznych oraz cieplnych odkształcanego materiału, technologicznych warunków procesu kucia, a także geometrii oraz kinematyki wzajemnego ruchu kowadeł i odkształcanego materiału.

Celem udowodnienia postawionej tezy pracy oraz stworzenia podstaw budowy programu komputerowego wspomagania projektowania technologii kucia w kowarce, prętów ze stali narzędziowych, przyjęto następujący plan pracy:

- zebranie oraz opracowanie zależności pozwalających na projektowanie procesu kowarkowego dla wielkości globalnych,
- opracowanie założeń oraz budowa modelu symulującego proces kucia w kowarce, uwzględniającego termomechaniczne warunki kucia mające wpływ na sposób płynięcia metalu oraz zmiany występujące lokalnie w kotlinie odkształcenia,
- wykonanie obliczeń numerycznych na bazie opracowanego modelu, przy użyciu komercyjnego programu (MES),
- przeprowadzenie analizy procesu kucia w kowarce na podstawie opracowanego modelu,
- przeprowadzenie laboratoryjnej oraz przemysłowej weryfikacji wyników numerycznej symulacji procesu kowarkowego,
- opracowanie komputerowego programu wspomagania projektowania technologii kucia w kowarce.

Wymienione zagadnienia obejmują znaczny obszar badań, dlatego mając na uwadze kompleksowe, a zarazem użytkowe rozwiązanie problemu komputerowego wspomagania projektowania technologii kucia w kowarce, jako celowe uznano korzystanie z publikowanych wyników badań oraz adaptację i dostosowywanie programów komercyjnych. Całość obliczeń symulacyjnych oraz uzupełniające badania ruchowe wykonano dla kowarki SXL-40 oraz SXL-16, co pozwoliło na wykorzystanie wyników zebranych w szeregu pracach badawczych prowadzonych w Katedrze Mechaniki i Technologii Przeróbki Plastycznej Politechniki Śląskiej.

5. ANALIZA PROCESU KOWARKOWEGO

Znaczenie zachowania się materiału w trakcie procesu obróbki plastycznej oraz poszukiwania istoty związków między warunkami odkształcania, strukturą i własnościami wyrobu, spowodowały intensywny rozwój modelowania fizycznego głównie oparty na badaniach plastometrycznych. Praktycznie jednak dopiero zastosowanie do procesu modelowania metody elementów skończonych stworzyło możliwość analizowania zjawisk zachodzących w strefie odkształcania z uwzględnieniem lokalnych zmian temperatury, odkształcania oraz prędkości odkształcania. Badanie warunków termomechanicznych kotliny odkształcania procesu przeróbki plastycznej przy użyciu metod numerycznych, dające podstawy do analizy procesu płynięcia metalu, stanu naprężenia oraz stanu odkształcania, wymaga opracowania odpowiedniego modelu badanego procesu technologicznego, uwzględniającego zarówno warunki, jak i sposób realizacji odkształcania.

5. 1. Model fizyczny

Charakter płynięcia metalu w kotlinie odkształcania procesu kowarkowego, przy kuciu czterema jednocześnie uderzającymi kowadłami, pozostaje w ścisłym związku z typem kalibrowania oraz sposobem podawania materiału. Wgłębianie kowadeł w materiał prowadzi do wzrostu długości oraz szerokości powierzchni styku materiału z narzędziem (rys. 2, 3). Prowadzi to do zmian kąta opasania materiału kowadłami ($\Sigma\theta$), który wzrasta od zera w chwili styku metalu z kowadłami, do 360° przy zwarciu kowadeł (rys. 9c). Wzdłuż kotliny odkształcania różnicują się warunki obciążania materiału zmieniając schemat mechaniczny procesu. Kinetyka płynięcia metalu oraz ruch narzędzi i ruch odkształcanego materiału należą do istotnych elementów charakteryzujących proces kucia w kowarce, wymagających uwzględnienia w modelowaniu stanu naprężenia oraz stanu odkształcania. Uwagi te są wynikiem wstępnych prac własnych [22, 45], w ramach których wykonano symulację procesu odkształcania metodą elementów skończonych przy zastosowaniu elementów bryłowych. Wyniki tych badań omówione zostały w publikacjach autora [78, 83, 89]. Ogólne wnioski wynikające z tych badań są następujące:

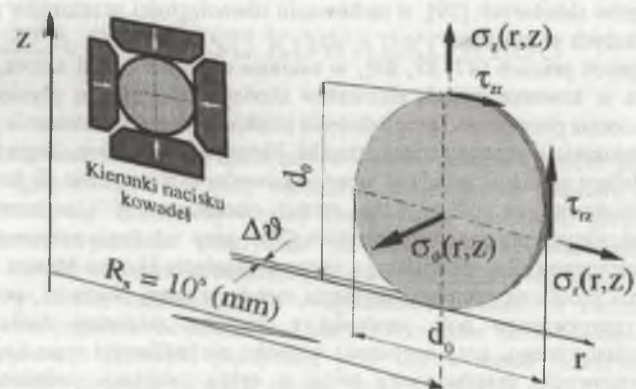
- symulacja kucia prętów okrągłych w czterokowadełkowej kowarce, metodą elementów skończonych dla elementów przestrzennych (3D), jest możliwa do przeprowadzenia nawet na komputerach typu PC, jednakże czas takich obliczeń jest bardzo długi, zaś przeprowadzenie obliczeń w praktycznym do przyjęcia czasie wymaga dokonania szeregu uproszczeń modelu, np. co do warunków geometrycznych, kinematycznych, termicznych lub technologicznych,
- model zawierający tak znaczne uproszczenia pozwala na wyznaczenie odkształceń w kotlinie odkształcania, zgodnych z wynikami pomiarów jedynie co do charakteru zmian rozkładu intensywności odkształceń lokalnych,

- zastosowanie modelu trójwarstwowego pozwoliło na potwierdzenie wniosku, wynikającego z badań rozkładu odkształceń lokalnych przeprowadzonych przy użyciu metody prętów składanych [39], o zachowaniu równoległości przekrojów poprzecznych w prętach kutyh w kowarce.

W kolejnych pracach [47, 87, 88], w zakresie własnych badań autora, dotyczących symulacji kucia w kowarce metodą elementów skończonych, analizę płynięcia metalu w kotlinie odkształcania prowadzono przy założeniu płaskiego stanu odkształcania plastycznego. Na bazie tego założenia wykonany został przez M. Pietrzyka i M. Głowackiego komputerowy program symulujący płynięcie metalu w procesie kowarkowym o nazwie *El_kowar* [90, 97]. Program ten, zbudowany na podstawie tzw. metody macierzowej [61], wykorzystuje metodę elementów skończonych dla zagadnień płaskich (2D), przy założeniu sztywno-plastycznego modelu odkształcanego ciała, spełniającego warunek płynięcia Hubera-Misesa. Szczegółowy opis rozwiązania problemu symulacji płynięcia metalu w danej objętości, polegającego na wyznaczeniu rzeczywistego pola prędkości z warunku minimum funkcjonału mocy odkształcania plastycznego, przy spełnieniu warunku nieściśliwości typu Lagrange'a oraz warunków brzegowych, przedstawiony został w cyklu publikacji poświęconych termomechanicznej symulacji różnych procesów przeróbki plastycznej [62, 95, 98 ÷ 103].

Stosując program *El_kowar*, w wersji pozwalającej na termomechaniczną symulację procesu w jednym przepuście, analizie poddano wpływ warunków brzegowych na charakter płynięcia metalu w strefie redukcji przekroju kotliny odkształcania procesu kowarkowego. W przeprowadzonych obliczeniach wyznaczono rozkład intensywności odkształceń lokalnych, rozkład intensywności prędkości odkształceń oraz rozkład temperatur na przekroju poprzecznym pręta. Po dostosowaniu programu do symulacji kucia w kolejno po sobie następujących przepustach, przeprowadzono obliczenia dla kalibrowania według schematów koło \rightarrow koło, koło \rightarrow kwadrat oraz koło \rightarrow kwadrat \rightarrow ośmiokąt. Wyniki badań w zakresie wpływu warunków technologicznych na wynik termomechanicznej symulacji procesu płynięcia metalu przy kuciu w kowarce z wykorzystaniem programu *El_kowar* zostały przedstawione w publikacjach autora [28, 76, 78, 79, 89]. W pracach tych wykorzystując między innymi metodę prętów składanych (MPS), weryfikacji poddano wyniki obliczeń rozkładu intensywności odkształceń lokalnych na przekroju prętów kutyh w kowarce według różnych schematów kalibrowania. Pozytywne rezultaty przytoczonych prac wzmocniają przyjętą hipotezę zachowania płaskości poprzecznych przekrojów w prętach kutyh w kowarce. Badania te pozwoliły jednocześnie w kolejnych pracach autora, dotyczących komputerowego projektowania technologii kucia w kowarce [29 ÷ 32, 71, 73, 84, 87, 88], podjąć zagadnienie uwzględnienia w projektowaniu technologii modelu strukturalnego.

Wykorzystując rezultaty wstępnych prac własnych, symulacji kucia w kowarce przy użyciu elementów bryłowych oraz pozytywne wyniki symulacji płynięcia metalu w kotlinie odkształcania przy założeniu uogólnionego płaskiego stanu odkształcania plastycznego, opracowano model symulujący termomechaniczny stan kotliny odkształcania w kowarce przy użyciu metody elementów skończonych dla zagadnień osiowosymetrycznych. Zastosowanie rozwiązania osiowosymetrycznego zostało podyktowane chęcią wykorzystania możliwości analizy przestrzennej, posiadającej jednocześnie tę zaletę, że dokonywana jest ona przy użyciu elementów płaskich, co znacznie skraca czas obliczeń numerycznych. Proces kucia w kowarce, przy dokonanych założeniach prowadzenia obliczeń dla zagadnień osiowosymetrycznych, sprowadza się do analizy obciążania materiału w kształcie pierścienia, za pomocą czterech kowadeł, wywierających obciążenia rozłożone symetrycznie względem jego osi głównej (rys. 25). W przypadku kucia prętów według kalibrowania koło \rightarrow koło, materiałem wsadowym jest pierścień kołowy - o powierzchni torusa.

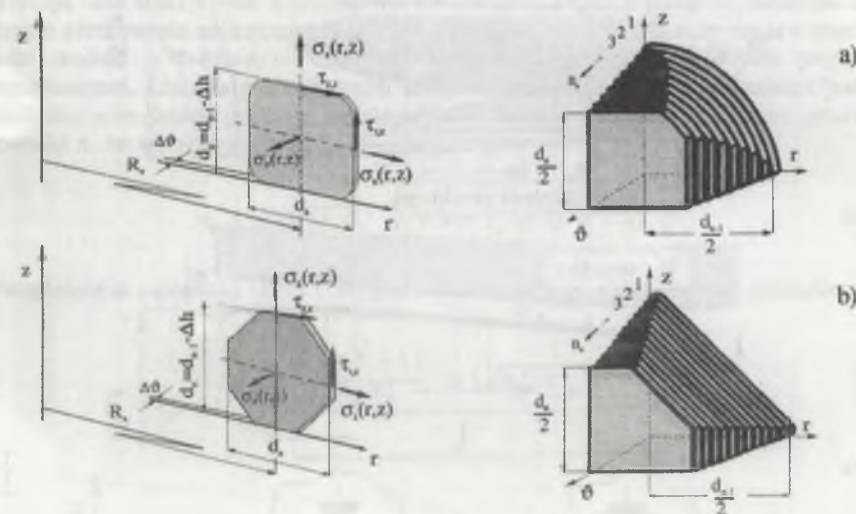


Rys. 25. Schemat obciążeń i naprężeń w analizowanym przekroju torusa - zagadnienie osiowosymetryczne teorii plastyczności

Fig. 25. A diagram of stress and strains in the analysed torus cross-section - the axially-symmetrical issue of the plasticity theory

Podawanie materiału ruchem złożonym w rozpatrywanym modelu uzyskiwane jest przez zmianę położenia kierunku nacisku kowadeł względem powierzchni pierścienia, dla kolejnych wielkości przemieszczenia kowadeł w kierunku realizowanego gniotu. Proces kucia w funkcji czasu określany jest przez wielkość gniotu pojedynczego, co opisują zależności (1.8, 1.9, tablica 1), w których zawarty jest związek z prędkością podawania opisany zależnością (3.1 tablica 3). Podczas kucia pod wpływem działania kowadeł, kołowy zarys przekroju torusa ulega zmianom przyjmując kształt wieloboku, którego forma geometryczna zależy od wielkości kąta obrotu między kolejnymi podaniami (rys. 2). Przy podawaniu materiału ruchem prostym kierunek działania kowadeł nie ulega zmianie, umożliwia to symulację procesu kucia według kalibrowania koło → kwadrat lub kwadrat → ośmiokąt (rys. 26). Przybliżenie przestrzennej kotliny odkształcenia (rys. 27) uzyskiwane jest przez złożenie płaskich przekrojów, pochodzących z kolejnych faz obciążania kowadłami analizowanego przekroju (rys. 25). Stan w dowolnie wyodrębnionym przekroju kotliny odkształcenia uzyskiwany jest przez superpozycję stanów wcześniejszych pochodzących z symulacji odkształcenia tego samego przekroju torusa, co schematycznie dla przypadku kucia przy podawaniu ruchem prostym, przedstawiono na rys. 26. W przypadku podawania materiału ruchem złożonym, położenie przekrojów wydzielonych na długości kotliny odkształcenia określa wielkość posuwu, co definiuje grubość warstwy, w ramach której realizowane jest elementarne odkształcenie wyrażone wielkością gniotu pojedynczego. W ramach danej warstwy można jedynie wydzielić przekroje odpowiadające różnym fazom tego samego uderzenia kowadeł. Dla podawania materiału ruchem prostym położenie wydzielonych przekrojów jest całkowicie dowolne pomiędzy płaszczyzną wejścia i wyjścia, i nie jest związane z wielkością posuwu, która w tym przypadku poprzez prędkość podawania definiuje jedynie czas kucia. Oczywiście zwiększenie liczby wydzielonych przekrojów (zmniejszenie wielkości $\Delta\vartheta$) zwiększa szczegółowość odwzorowania kotliny odkształcenia. Jednocześnie modelowanie procesu kowarkowego jest tym dokładniejsze, im większa jest średnica pierścienia, a ściślej,

im mniejszy jest stosunek wielkości średnicy analizowanego przekroju d do promienia R_x (rys. 25, 26). Wielkość promienia R_x decyduje o krzywiźnie wycinka torusa, a tym samym o krzywiźnie osi modelowanego pręta. Z warunku geometrycznego wynika, że dla promienia $R_0 = 10^3$ m skrzywienie osi wycinka długości 1 m wyrażone strzałką ugięcia wynosi $f_x = 0,0125$ mm.

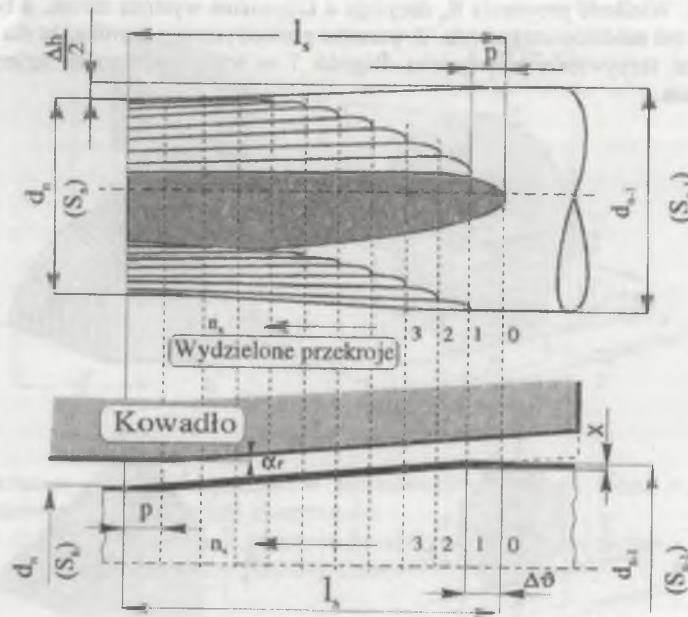


Rys. 26. Schemat obciążeń i naprężeń w analizowanym przekroju przy symulacji kucia w kowarce według kalibrowania: a) koło → kwadrat, b) kwadrat → ośmiokąt

Fig. 26. A diagram of stress and strains in the analysed cross-section at forging simulation in a swaging machine according to: a) circle → square, b) square → octagon sizing scheme

Przedstawiona koncepcja modelu procesu kowarkowego, pozwalająca na wykorzystanie metody elementów skończonych dla zagadnień osiowosymetrycznych do symulacji płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, opiera się na następujących założeniach:

- stan mechaniczny w dowolnie wyodrębnionym przekroju kotliny odkształcenia procesu kowarkowego można symulować, analizując osiowosymetryczne zadanie obciążania materiału w kształcie pierścienia, siłami symetrycznie rozłożonymi względem jego osi,
- kotlina odkształcenia modelowana jest warstwowo, przy założeniu quasi-płaskiego stanu płynięcia plastycznego ($\epsilon(r, \vartheta) = \text{const}$) w analizowanym przekroju - warstwie,
- promień pierścienia $R_x > d_0$ - średnicy analizowanego przekroju (rys. 25, 26),
- w obliczeniach pomijana jest strefa kalibrująca l_k oraz wpływ sztywnych końców,
- niestacjonarny proces kowarkowy traktowany jest jako quasi-stacjonarny,
- w procesie symulacji pominięto siły masowe oraz siły oddziaływania manipulatorów,
- w pojedynczych gniotach zachowana jest cykliczna powtarzalność zjawisk.



Rys. 27. Schemat warstwowo modelowanej kotliny odkształcenia przy kuciu w kowarce według kalibrowania koło → koło
 Fig. 27. A diagram of slice-modelled deformation gap at swaging in a swaging machine according to circle → circle sizing scheme

Zgodnie z przyjętym założeniem osiowej symetrii obciążeń, naprężenia nie zależą od zmiennej ϑ , zaś naprężenie obwodowe $\sigma_\vartheta = \sigma_\vartheta(r, z)$ jest naprężeniem głównym, natomiast naprężenia styczne $\tau_{\vartheta z} = \tau_{\vartheta r} = 0$ (współrzędne walcowe r, z, ϑ). W analizowanych przekrojach (rys. 25) pozostałe naprężenia są funkcjami współrzędnych liniowych: $\sigma_r = \sigma_r(r, z)$, $\sigma_z = \sigma_z(r, z)$, $\tau_{rz} = \tau_{rz}(r, z)$. Wektor prędkości przemieszczeń ma dwie różne od zera składowe v_r, v_z , które nie zależą od współrzędnej obwodowej, zaś składowe prędkości odkształceń opisują związki:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_r &= v_{r,r} & \dot{\epsilon}_\vartheta &= \frac{v_\vartheta}{r} & \dot{\epsilon}_z &= v_{z,z} \\ \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{1}{2}(v_{r,z} + v_{z,r}) & \dot{\epsilon}_{r\vartheta} &= \dot{\epsilon}_{z\vartheta} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Konstrukcja opracowanego modelu oparta jest na założeniu stwierdzającym, iż odkształcenia liniowe wzdłuż osi kutego pręta dla każdego dowolnego przekroju zmienia się podczas kucia w wyniku zmiany pola przekroju od wielkości S_{n-1} do wielkości końcowej S_n (rys. 27). Warunek określony równaniem (1.1 tablica 1) spełniony jest w przypadku gdy obwód pierścienia, a tym samym jego promień zmieniają się wraz z wielkością redukcji przekroju według zależności:

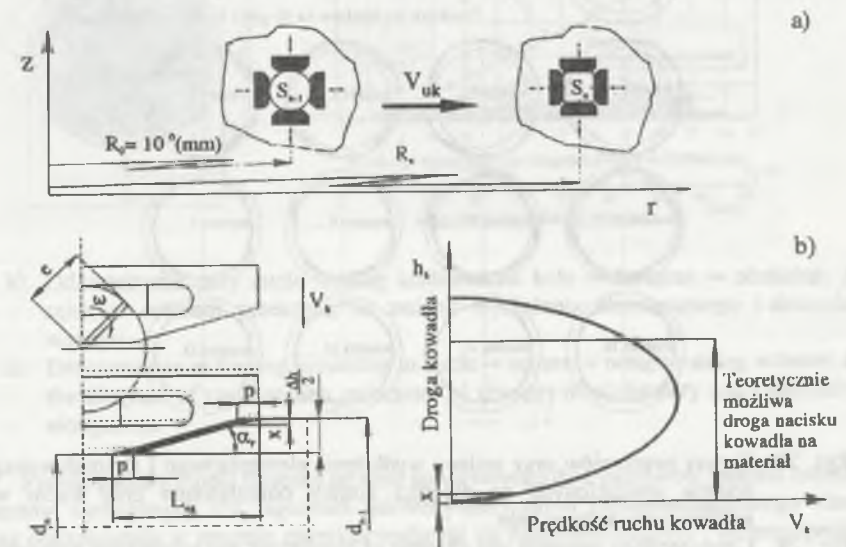
$$R_x = R_0 e^{\epsilon_p} \quad (17)$$

Spełnienie warunku (17) wymaga aby kowadła prócz ruchu związanego z kuciem, przemieszczały się w kierunku promieniowym (rys. 25, 26). Ruch całego układu kowadło - odkształcany materiał, istotny dla modelowania stanu mechanicznego kotliny odkształcenia, nie wywiera wpływu na wynik obliczeń ze względu na siły masowe, które są w obliczeniach numerycznych pomijane. Prędkość przemieszczania się całego układu v_{uk} (rys. 28) związana jest z prędkością ruchu kowadeł v_k i wielkością gniotu pojedynczego $\Delta d'$. Wielkości te określają czas kucia i wraz z pozostałymi czasami związanymi z podaniem materiału oraz czasem przebywania analizowanego przekroju poza strefą odkształcenia stanowią o poprawności modelu w zakresie obliczeń pola temperatury pasma, a także pola prędkości przemieszczeń. Liniowa prędkość ruchu kowadła dla kowarek korbowych zależna jest od wielkości mimośrodowo, prędkości obrotowej wału korbowego oraz chwilowego położenia kowadła x , co wyraża zależność:

$$v_k = \omega \sqrt{x(2 \cdot e - x)} = 2 \pi f_u \sqrt{x(2 \cdot e - x)} \quad (18)$$

Uwzględniając zależności (17) i (18), prędkość ruchu całego układu opisuje równanie:

$$v_{uk} = \frac{R_n(e^{\epsilon_p} - 1)}{x} \cdot 2\pi f_u \sqrt{x(2 \cdot e - x)} \quad (19)$$

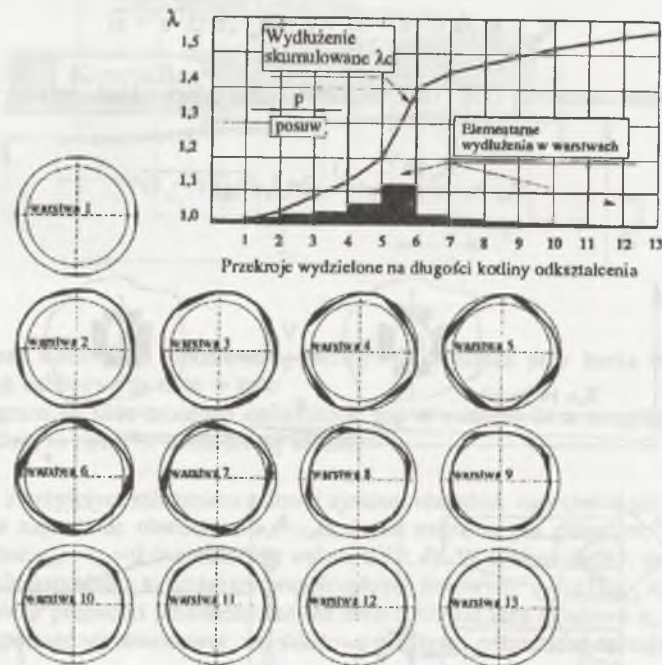


Rys. 28. Modelowanie ruchu narzędzi i odkształcanego materiału: a) związek pomiędzy prędkością ruchu układu v_{uk} oraz redukcją przekroju ϵ_p , b) zmiana prędkości kształtowania w funkcji chwilowego położenia kowadła
 Fig. 28. Modelling of tools and the deformed material movement: a) the relation between the speed of system movement v_{uk} and the cross-section reduction ϵ_p , b) the change of formation rate versus the instantaneous anvil's position

Występująca we wzorze (19) wielkość odkształcenia ε jest, oczywiście, funkcją położenia kowadeł x . Maksimum tej wielkości określa gniot w pojedynczym uderzeniu kowadeł przypadający na jeden posuw, co opisuje zależność:

$$x_{\max} = \frac{\Delta d'}{2} = \frac{v_p}{f_s} \operatorname{tg} \alpha_r = p \cdot \operatorname{tg} \alpha_r \quad (20)$$

W przypadku kucia pretów okrągłych, gdy materiał podawany jest ruchem złożonym, wielkość redukcji przekroju w obrębie warstwy zależna jest od wielkości gniotu w przepuście, wielkości posuwu oraz kąta obrotu pomiędzy kolejnymi podaniami, które to wielkości wraz z geometrią wsadu i kowadeł określają geometrię kotliny odkształcenia (rys. 29). Dla każdej warstwy wielkość redukcji przekroju można wyznaczyć z odpowiednich zależności geometrycznych opartych na równaniu (1.1. tabela 1) lub planimetrując pole odpowiedniego przekroju.



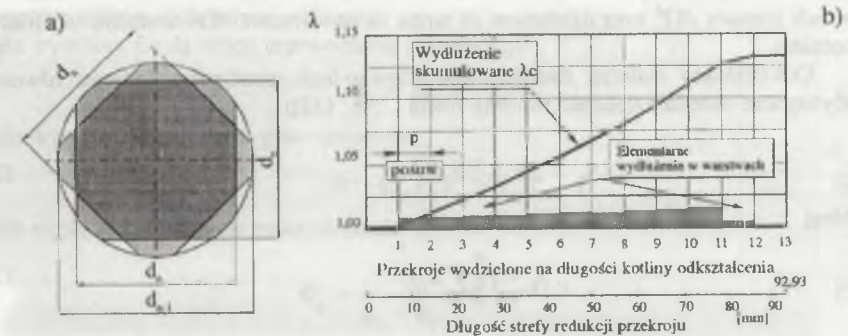
Rys. 29. Zarysy przekrojów oraz zmiany wydłużenia elementarnego i skumulowanego dla warstw wydzielonych na długości kotliny odkształcenia przy kuciu według kalibrowania koło \rightarrow koło

Fig. 29. Cross-sections contours and changes of elementary and cumulative elongation for separated layers on the length of the deformation gap at forging according to circle \rightarrow circle sizing scheme

Na rys. 29 przedstawiono zarysy przekrojów oraz zmiany wydłużenia na długości kotliny odkształcenia dla stałych odległości równych wielkości posuwu. Zarysy przekrojów wyznaczono dla pręta $d_{n-1} = 200$ mm, odkształcanego gniotem $\Delta h = 40$ mm, przy wielkości posuwu $p = 11,1$ mm, co odpowiada prędkości podawania $v_p = 50$ mm/s. Wielkość kąta

obrotu pręta między kolejnymi uderzeniami kowadeł wynosiła $\alpha_n = 13^\circ 20'$. Podane wartości są typowe dla kowarki SXL-40. Dla przypadku podawania materiału ruchem złożonym rozkład gniotu na szerokości kowadła w kolejnych podaniach (o liczbie $n > 1$) jest nierównomierny na szerokości, co wywołuje powstawanie momentu sił skręcających analizowany przekrój. Ponieważ w rzeczywistości przeciw skręcaniu poszczególnych warstw przeciwdziałają same kowadła wywierające nacisk jednocześnie na całej długości, skręcenie pręta na długości kotliny odkształcenia nie występuje, zaś na całej długości pręta jest pomijalnie małe, co wykazały badania [40, 43, 48]. Dlatego w modelu procesu kucia przy podawaniu ruchem złożonym wprowadzono warunek blokowania swobodnego ruchu obrotowego analizowanego przekroju, w początkowej fazie wgniatania kowadeł w materiał.

W myśl założeń modelu, wykres na rys. 29 przedstawia wielkości wydłużenia $\lambda - e^{\varepsilon}$ wynikającego z redukcji przekroju, dla pojedynczych uderzeń kowadeł (w kolejnych podaniach materiału) oraz wielkość wydłużenia skumulowanego w wydzielonych płaszczyznach. Na rys. 30 przedstawiono zarysy przekroju pręta kutego według kalibrowania koło \rightarrow kwadrat \rightarrow ośmiokąt oraz zmiany wielkości wydłużenia w przekrojach wydzielonych na długości kotliny odkształcenia, obliczone dla przypadku kucia pręta kwadratowego o wymiarze $d_n = 130,2$ mm na ośmiokąt gniotem $\Delta h = 23$ mm.



Rys. 30. Odkształcenia przy kuciu według kalibrowania koło \rightarrow kwadrat \rightarrow ośmiokąt: a) schemat redukcji przekroju, b) zmiany wydłużenia elementarnego i skumulowanego

Fig. 30. Deformations at forging according to circle \rightarrow square \rightarrow octagon sizing scheme: a) the diagram of cross-section reduction, b) changes of elementary and cumulative elongations

Przedstawiony model fizyczny procesu kowarkowego daje możliwość badania metodą elementów skończonych dla zagadnień osiowosymetrycznych termomechanicznego stanu kotliny odkształcenia w procesie charakteryzującym się niemonotonicznym i nieproporcjonalnym przebiegiem odkształcenia. Uwzględniając geometrię i kinematykę ruchu kowadeł oraz geometrię i kinematykę ruchu odkształcanego pręta, pomimo założenia quasi-stacjonarnego charakteru procesu, model odzwierciedla istotne cechy sposobu kucia w kowarkach, tzn. kucia z dużą częstotliwością uderzeń, kowadłami poruszającymi się ze zmienną prędkością na wysokości gniotu, względem materiału podawanego ruchem prostym lub złożonym, przy różnych wielkościach posuwu i gniotu.

5. 2. Model dyskretny

Do analizy płynięcia metalu w procesie kowarkowym wykorzystano komercyjny program o nazwie FORGE2 [105], oparty na standardowym rozwiązaniu metody elementów skończonych dla zagadnień płaskich oraz osiowosymetrycznych, opisany w pracach [6 ÷ 8, 57, 68]. Rozwiązanie problemu polega na wyznaczeniu pola prędkości, w wydzielonym obszarze Ω , będącego rzeczywistym rozwiązaniem zadania dla założonego warunku nieściśliwości oraz przyjętych warunków brzegowych, a spełniającego warunek minimum funkcjonału wyrażającego całkowitą moc odkształcenia plastycznego:

$$\mathcal{F} = \int_{\Omega} \frac{K}{m+1} (\sqrt{3} \dot{\epsilon}_i)^{m+1} dV + \int_{\Omega} \frac{\rho_p K}{2} (\text{div}(v))^2 dV - \int_{\partial\Omega^d} f^d \cdot v dS + \int_{\partial\Omega^p} \frac{\mu K}{p+1} |\Delta v|^{p+1} dS \quad (21)$$

przy pominięciu sił ciężkości oraz sił bezwładności. Odpowiednie składowe funkcjonału reprezentują prace związane z: odkształceniem plastycznym, wymuszeniem zasady zachowania stałej objętości (warunek nieściśliwości $\text{div}(v)=0$), działaniem sił zewnętrznych na granicach obszaru $\partial\Omega^d$ oraz działaniem sił tarcia na powierzchni $\partial\Omega^p$ kontaktu materiału z narzędziem.

Odształcany materiał stanowi ciało sztywno-lepko-plastyczne, którego równanie konstytutywne określa zależność Nortona-Hoffa [7, 8, 112]:

$$S_{ij} = 2 K (\sqrt{3} \dot{\epsilon}_i)^{m-1} \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (22)$$

w której

$$\dot{\epsilon}_i = \left(\frac{2}{3} \sum_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

wyraża intensywność prędkości odkształcenia. Własności reologiczne odkształcanego materiału ujmuje funkcja $K(\sigma_i, \dots)$ zależna od parametrów technologicznych procesu, określana wzorem:

$$K = \frac{\sigma_i}{(\sqrt{3})^{m+1} \dot{\epsilon}_i^m} \quad (24)$$

Materiał plastyczny stanowi w tym przypadku szczególny przypadek materiału lepko-plastycznego. Charakter własności ośrodka zależy od wartości wykładnika m , który przyjmuje wartości:

- $m = 1$ dla cieczy newtonowskiej o lepkości równej K ,
- $m = 0$ dla ciała sztywno-doskonale-plastycznego spełniającego warunek $\sigma_p = \sqrt{3} K$,
- $0 < m < 1$ dla metali w warunkach odkształcania na gorąco. Dla większości metali wykładnik m przyjmuje wartość z przedziału $(0,1 \div 0,25)$ natomiast dla materiałów nadplastycznych $m = 0,5 \div 0,7$ [8].

W przyjętym rozwiązaniu związek pomiędzy dewiatorem naprężenia a tensorem prędkości odkształcenia opisany jest zgodnie z prawem Levy'ego-Mises:

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_i (\dot{\epsilon}_i)^{-1} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (25)$$

Tarcie w strefie kontaktu narzędzie - odkształcany materiał modelowane jest poprzez nałożenie na obszar strefy kontaktu naprężeń stycznych określonych zależnością [3, 114]:

$$\tau = -\mu K |\Delta v|^{(p-1)} \Delta v \quad (26)$$

Zjawiska cieplne zachodzące w kotlinie odkształcenia, z uwzględnieniem: generowania ciepła w wyniku pracy sił tarcia oraz pracy odkształcenia plastycznego, jak również utraty ciepła w strefie kontaktu metalu z narzędziem i chłodzenia powietrzem, zostały opisane w programie zgodnie z równaniem Fouriera:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k \nabla T) + Q \quad (27)$$

Na granicy rozpatrywanego obszaru występuje złożona wymiana ciepła przez promieniowanie, konwekcję oraz przewodzenie. W użytkowanym programie warunki brzegowe opisują następujące zależności:

- dla wymiany ciepła drogą przewodzenia i konwekcji

$$\Phi_c = \alpha(T - T_0) \quad (28)$$

- dla wymiany ciepła przez promieniowanie

$$\Phi_r = \sigma_B \epsilon (T^4 - T_0^4) \quad (29)$$

- dla ciepła generowanego pracą sił tarcia

$$\Phi_\mu = \frac{b_1}{b_1 + b_2} \mu K \Delta v^{(p-1)} \quad (30)$$

Opis rozwiązania metodą elementów skończonych, czyli wyznaczenia funkcji pola temperatur przy założeniu, że dla małych przyrostów czasu zależność temperatury od czasu jest liniowa, przedstawiony został w pracach [7, 8, 91, 101], natomiast w literaturze polskiej w pracach [92, 94]. Zastosowany w przedstawionym modelu fizycznym program symulujący metodą elementów skończonych schemat płynięcia metalu oraz zjawiska cieplne w strefie odkształcenia tworzy spójny termomechaniczny model symulacji procesu kowarkowego. Zgodnie z przyjętym założeniem, niestacjonarny proces kowarkowy traktowany jest jako quasi-stacjonarny. Pole prędkości obliczane jest dla danego kroku przyrostu czasu w analizowanym obszarze i dla kolejnego kroku aktualizowane jest odpowiednio do zmian siatki podziałowej.

6. PRZYKŁADY ANALIZ ORAZ WERYFIKACJA WYNIKÓW NUMERYCZNEJ SYMULACJI PROCESU KOWARKOWEGO

Przedstawiony sposób modelowania procesu kucia w kowarce pozwala na wyznaczenia charakterystyk rozkładu naprężeń i odkształceń, rozkładu temperatury oraz kinetyki płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, a także zmian wielkości siły nacisku, zarówno podczas pojedynczego uderzenia kowadeł, jak i w kolejnych przepustach. Celem zilustrowania możliwości obliczeniowych opisanej metody oraz wykazania zasadności wykorzystania wyników symulacji w projektowaniu technologii kucia w kowarce, wykonano szereg obliczeń numerycznych dla różnych danych technologicznych, materiałowych oraz zróżnicowanych warunków brzegowych. Wybrane przykłady wyników obliczeń przedstawiono i omówiono w niniejszym rozdziale.

Przyjęte w modelu założenia oraz wprowadzone warunki brzegowe poddane zostały weryfikacji doświadczalnej. Wyniki obliczeń porównano z wynikami prób kucia, które przeprowadzono w warunkach ruchowych Huty Batory. Przemysłowe próby kucia wykonano według standardowych technologii, jakie są stosowane przy kuciu stali narzędziowych. Te same parametry technologiczne zostały wprowadzone do obliczeń symulacyjnych. Wykonane badania ruchowe pozwoliły na weryfikację opracowanego modelu procesu kucia w trzech zasadniczych elementach, a mianowicie: rozkładu odkształceń lokalnych, temperaturowego przebiegu procesu (w zakresie zmian temperatury powierzchni pasma) oraz zmian siły kucia.

6. 1. Parametry technologiczne oraz warunki brzegowe wprowadzone do obliczeń numerycznych

Dane do obliczeń symulacyjnych określono na podstawie parametrów technicznych oraz technologicznych, jakie stosowane są przy kuciu prętów w kowarkach SXL-40 i SXL-16. Modelowanie warunków kucia dotyczyło dyskretyzacji geometrii kotliny odkształcenia, kinematyki ruchu narzędzi i odkształcanego metalu oraz opisu jego reologicznych własności. W obliczeniach uwzględniono również temperatury: wsadu, kowadeł i otaczającego powietrza oraz czasy: transportu pasma z pieca do kowarki, czas kucia oraz czas przebywania danego przekroju pręta poza strefą kucia, które to czasy determinują rozkład temperatury na przekroju pasma przed kolejnym przepustem. W tabelicy 6 zebrano parametry techniczne kowarek ujęte w obliczeniach. Parametry te wprowadzono do obliczeń numerycznych, gdyż geometria kotliny odkształcenia zależna jest zarówno od wymiarów i kształtu wsadu, sposobu podawania materiału (rys. 2), jak i parametrów kucia oraz cech geometrycznych kowadeł.

Dyskretyzacji strefy odkształcenia dokonano stosując elementy trójkątne sześciowzłowe (trzy węzły na wierzchołkach plus trzy na środku boków trójkąta). Na przekroju wydzielano od 200 ÷ 1200 elementów, zależnie od celu i potrzeb obliczeń.

Stosowano również zróżnicowane wielkości elementów w obrębie jednego przekroju celem zagęszczenia siatki w obszarach występowania znacznego gradientu analizowanych wielkości.

Tablica 6
Parametry techniczne kowarek stosowane w obliczeniach numerycznych [17]

Parametr	Oznac.	Jednost.	Typ kowarki	
			SXL-40	SXL-16
Zakres średnic kutyh prętów	d	mm	400 ÷ 90	120 ÷ 35
Maksymalna wielkość gniotu	Δh_{max}	mm	40	30
Gnioty gładzące	Δh	mm	20	20
Maksymalna redukcja średnicy	Δd_{max}	mm	260	100
Maksymalna długość pręta po kuciu	l_{max}	m	10	7,2
Szybkość posuwu manipulatorów	robocza	v_p	mm/s	10 ÷ 100
	transportowa			270
Czas obrotu głowicy manipulatora [39]	t_g	s	6	2,7
Częstość uderzeń jednego bijaka	f_u	s ⁻¹	4,5	9,3
Kąt pochyl. części roboczej kowadła	α_r	grad	8	8
Maksymalna siła kucia	F	MN	6,5	2
Mimośrodowość	e	mm	14	6

Przykłady siatek o zróżnicowanej wielkości elementów, dla przyjętego wskaźnika niejednorodności wielkości elementów $\eta = 1,30 \div 2,0$ w celu zagęszczenia siatki w strefie przypowierzchniowej pręta, przedstawiono na rys. 31. Na rysunku tym podano liczbę elementów oraz liczbę węzłów po odnowieniu siatki (remeshing), na tle zarysu przekroju modelowanego pręta, dla przypadków kucia przy podawaniu materiału ruchem prostym oraz ruchem złożonym.

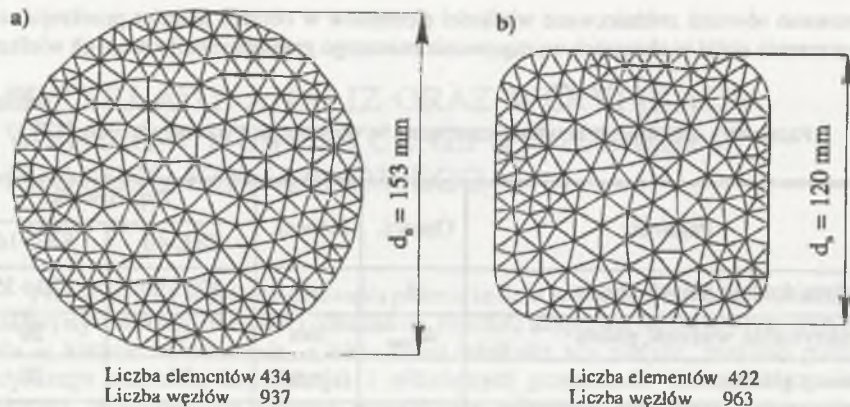
Zmiany naprężenia uplastyczniającego stali, w funkcji parametrów odkształcania, opisano zależnością [125]:

$$\sigma_p = \sigma_{p0} \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m e^{-\beta T} \quad (31)$$

Stałe równania (31) wyznaczono w próbach plastometrycznych [24, 75] i wprowadzono do równania (24) wykorzystując związek:

$$\sigma_p = K \sqrt{3} (e^{-\beta T} \dot{\varepsilon}^n) (\sqrt{3} \dot{\varepsilon})^m \quad (32)$$

W tabelicy 7 zebrano parametry równania krzywej umocnienia oraz zakresy temperatur nagrzewania i kucia gatunków stali, dla których prowadzono obliczenia numeryczne i badania ruchowe.



Rys. 31. Przykłady siatek stosowanych w analizie procesu kucia w kowarce przy podawaniu pręta: a) ruchem złożonym, b) ruchem prostym

Fig. 31. Examples of grids used in the analysis of forging process in a swaging machine, at feeding of a bar with: a) simple movement, b) complex movement

Tablica 7
Stosowane w obliczeniach numerycznych parametry krzywej umocnienia oraz temperatury nagrzewania i kucia dla badanych gatunków stali

Gatunek stali	σ_{Pb}	n	m	β	Temperatura nagrzewania [50]	Zakres temperatur kucia [50]
	MPa	-	-	-	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
H25T	2135	0,144	0,114	0,0029	1080	800 ÷ 1050
SW7M	2850	0,108	0,119	0,0026	1130	900 ÷ 1100
SW18	3510	0,159	0,119	0,0029	1180	950 ÷ 1150
SKC	2940	0,158	0,119	0,0027	1130	900 ÷ 1100
NC10	2520	0,179	0,149	0,0028	1080	850 ÷ 1050

Na podstawie wyników badań przedstawionych w pracy [4], gdzie stwierdzono, że temperatura powierzchni roboczej kowadeł podczas intensywnego kucia w kowarce może osiągać 800°C , a także na podstawie wyników własnych pomiarów, obliczenia numeryczne prowadzono przy założeniu stałej temperatury kowadeł równej $T_k = 400^{\circ}\text{C}$. W obliczeniach przyjęto stałą temperaturę otoczenia kowarki równą $T = 50^{\circ}\text{C}$ oraz współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem równy $\alpha = 5 \div 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K})$, zależnie od chwilowego położenia analizowanego przekroju, w strefie kucia lub poza kotłina odkształcenia [20, 116]. Wielkości charakteryzujące cieplne własności odkształcanych stali (tablica 8) i materiału kowadeł (tablica 9) przyjęto na podstawie danych zawartych w publikacjach [5, 20, 72, 91, 93, 94, 109, 113, 116].

Tablica 8
Własności cieplne dla stali stosowane w obliczeniach numerycznych¹⁾

Material	T	ρ	c_p	k	ϵ	α
	$^{\circ}\text{C}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}\right]$	-	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}\right]$
Stal żaroodporna wysokochromowa (H25T)	800 ÷ 900	7580	875	25,9	0,89	8000
	900 ÷ 1050	7530	770	25,0		
Stale szybko tnące (SW7M, SW18, SKC)	900 ÷ 1000	7960	805	27,5	0,97	
	1000 ÷ 1100	7870	720	26,5		
Stal szybko tnąca wysokochromowa (NC10)	850 ÷ 950	7510	883	24,70	0,94	
	950 ÷ 1050	7480	766	23,03		

Tablica 9
Własności cieplne dla stopu kowadeł, stosowane w obliczeniach numerycznych¹⁾

Material	T	ρ	c_p	k	α
	$^{\circ}\text{C}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}\right]$	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}\right]$
Mat. kowadeł (NIMONIC)	400	810	560	12,7	2000

¹⁾ Własności podane w tablicy 8 i 9 dotyczą średnich wartości dla podanych przedziałów temperatur oraz dla odpowiedników materiałów podanych w nawiasach.

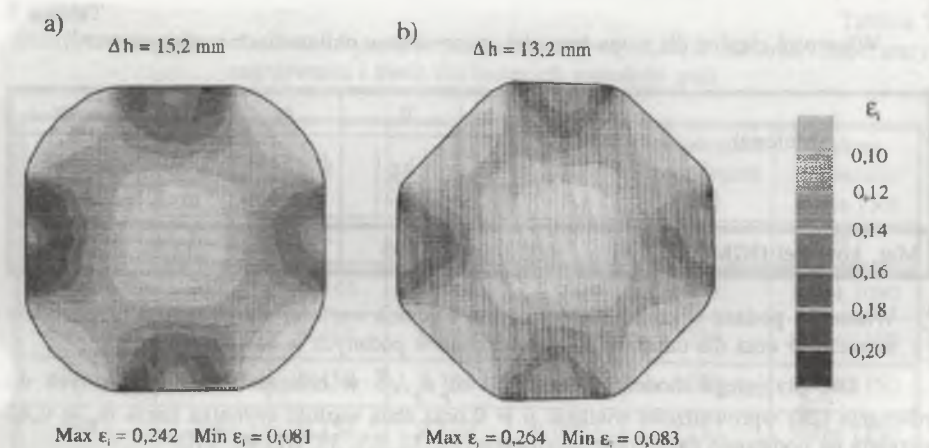
Dla przyjętego modelu tarcia $|\tau| = m_{\mu} \sigma_p / \sqrt{3}$ w obliczeniach numerycznych do równania (26) wprowadzono wielkość $p = 0$ oraz stałą wartość czynnika tarcia $m_{\mu} = 0,45$ przyjętą na podstawie danych literaturowych [19, 51, 55, 59, 67, 90, 110].

6. 2. Wyniki obliczeń oraz ich analiza

Opracowany model procesu kowarkowego poddano analizie przeprowadzając obliczenia testujące wpływ istotności oraz charakter oddziaływania wprowadzanych parametrów na wynik symulacji. W ramach wykonanych obliczeń wyznaczono rozkłady: składowych naprężeń oraz prędkości odkształcenia, naprężenia średniego, wskaźnika stanu naprężenia k_{μ} , intensywności odkształcenia, temperatury, a także kierunki i prędkości przemieszczania węzłów siatki elementów skończonych, na przekrojach poprzecznych pręta wydzielonych wzdłuż kotliny odkształcenia. Obliczenia symulujące proces kucia w kowarce

w jednym przepuszczeniu wykonano dla kalibrowania typu koło → koło, koło → kwadrat, kwadrat → ośmiokąt, kwadrat → koło oraz ośmiokąt → koło. Obliczenia symulujące kucie wieloprzepustowe przeprowadzono dla kalibrowania koło → koło z uwzględnieniem przepustów typu koło → kwadrat → ośmiokąt → koło. Symulowane warianty typów kalibrowania praktycznie wyczerpują zasadnicze schematy przepustów stosowane przy kuciu w kowarkach do wstępnego przerobu. Modelowanie kucia w jednym przepuszczeniu przy podawaniu materiału ruchem prostym, dla kalibrowania typu koło → kwadrat oraz kwadrat → ośmiokąt, przeprowadzono ze względu na możliwość pełnej analizy stanu mechanicznego kotliny odkształcenia, gdyż jedynie dla tego typu przepustów, przy kuciu płaskimi kowadłami wzdłuż kotliny odkształcenia, kąt opasania może się zmieniać od zera aż do kąta pełnego w przypadku zwarcia kowadeł, a także ze względu na możliwość symulowania technologicznie niebezpiecznych przypadków przepelnienia wykroju (rys. 5).

Przykładowe wyniki symulacji procesu kucia w jednym przepuszczeniu według kalibrowania typu koło → kwadrat oraz kwadrat → ośmiokąt dla stali w gatunku SW18 przedstawiono na rys. 32 ÷ 34. Przedstawione na rys. 32 rozkłady intensywności odkształceń lokalnych dla obu typów kalibrowania wykazują pewne cechy podobieństwa. Największy gradient odkształceń występuje pod kowadłami, w polu wyznaczonym przez trójkątną strefę utrudnionego płynięcia w wyniku działania sił tarcia oraz przyległe do boków wierzchołkowych tego trójkąta strefy, gdzie odkształcenia lokalne są największe.



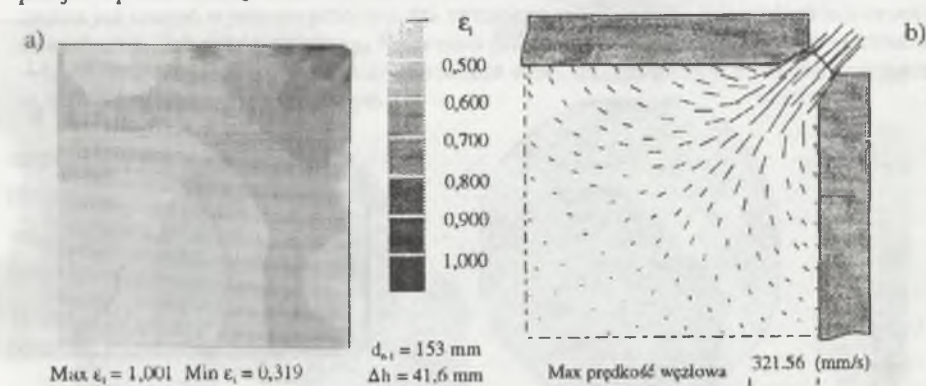
Rys. 32. Rozkład intensywności odkształceń lokalnych na przekroju pręta kutego według kalibrowania: a) koło → kwadrat, b) kwadrat → ośmiokąt ($d_{n-1} = 153 \text{ mm}$)

Fig. 32. The distribution of local strains' intensity on the cross-section of a bar forged according to: a) circle → square, b) square → octagon sizing scheme ($d_{n-1} = 153 \text{ mm}$)

W części swobodnej powierzchni pręta (obszar narożnika kwadratu oraz nie obciążony kowadłem bok ośmiokąta) odkształcenia lokalne są porównywalne z odkształceniami występującymi w strefie środkowej pręta. Ponieważ materiał podawany jest ruchem prostym, poszczególne strefy przekroju pasma pozostają w tym samym położeniu względem kierunku działania kowadeł, co prowadzi do znacznego zróżnicowania odkształceń lokalnych zarówno w kierunku promieniowym, jak i obwodowym.

W końcowej fazie kucia kwadratu dużym gniotem, gdy duży jest kąt opasania materiału kowadłami (całkowity kąt opasania $\Sigma\Theta > 300^\circ$) lub w przypadku kucia kwadratu o ostrych narożach albo przy niewłaściwym technologicznie kuciu z przepelnieniem wykroju, na znacznej części przekroju pręta następuje zmniejszenie zróżnicowania wielkości odkształceń lokalnych, prócz stref narożnika, gdzie odkształcenia lokalne osiągają bardzo duże wartości w porównaniu do reszty przekroju pręta (rys. 33 a). Dla wymienionych przypadków kucia zmiana charakteru płynięcia metalu powoduje, że pasmo w strefie narożnika wykazuje pewne poszerzenie, co w granicznym przypadku prowadzi do powstawania wypływów. Na rys. 33 b przedstawiono prędkości przemieszczania węzłów siatki dla warunków kucia, przy których następuje przepelnienie wykroju, co pokazuje charakter płynięcia metalu w tej strefie przekroju i sposób powstania wady wyrobu nazywanej zakuciem.

Zmiany rozkładów intensywności odkształceń lokalnych przy kuciu z podawaniem materiału ruchem złożonym przedstawiono na rys. 34. Wykresy te przedstawiają skutek pojedynczego uderzenia kowadeł - stan w płaszczyźnie przekroju kotliny odkształcenia leżącej w pobliżu płaszczyzny wejścia oraz efekt kolejnych uderzeń kowadeł - stan w płaszczyźnie przekroju kotliny odkształcenia leżącej w pobliżu płaszczyzny wyjścia. Kumulowanie odkształceń w miejscu działania kowadła oraz w strefach przyległych jest wynikiem działania kolejnych uderzeń kowadeł w następujących po sobie podaniach materiału i w myśl założeń modelu symuluje przyrost odkształcenia, jakiego doznaje wydzielony przekrój, podczas przejścia przez kotlinę odkształcenia.

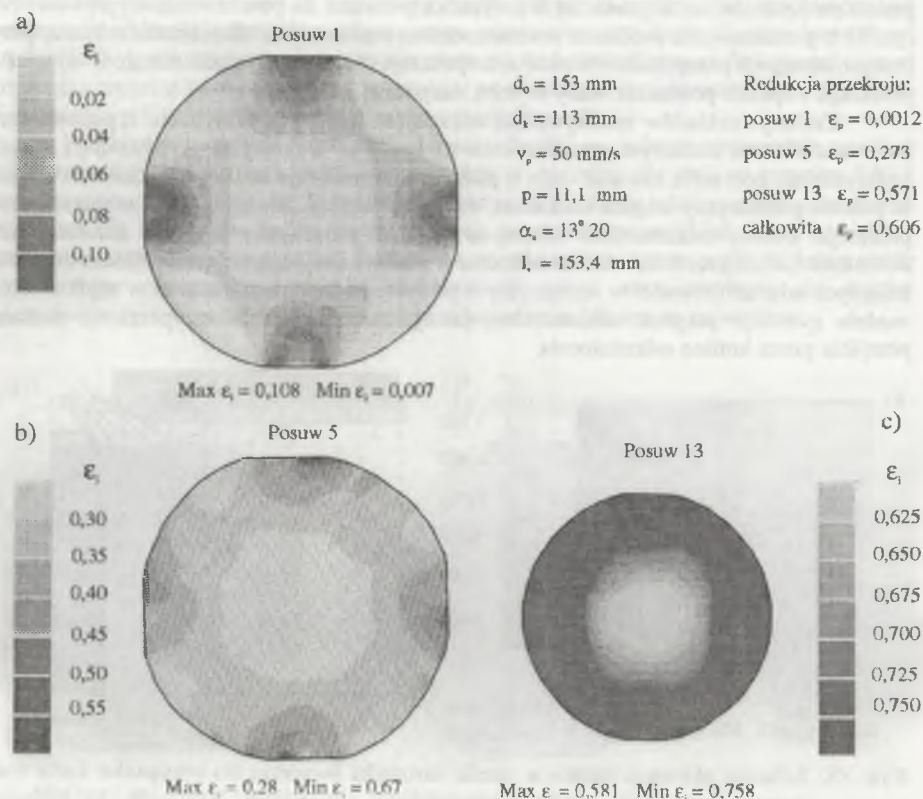


Rys. 33. Schemat płynięcia metalu w strefie narożnika kwadratu dla przypadku kucia tzw. ostrych naroży: a) rozkład intensywności odkształceń lokalnych, b) kierunek przemieszczania metalu w przypadku przepelnienia wykroju

Fig. 33. Diagrams of metal flow in the zone of a square corner for forging of so-called sharp corners: a) the distribution of local strains' intensity, b) the direction of metal movement in the case of an overfill

Zgodnie z oczekiwaniem, wyznaczone rozkłady intensywności odkształceń lokalnych dla kalibrowania koło → kwadrat są różne od rozkładów otrzymanych dla kalibrowania koło → koło. Największa intensywność odkształcenia występuje w promieniowo rozłożonej strefie pod kowadłami, poza strefą bezpośrednio przyległą, gdzie płynięcie materiału hamowane jest działaniem sił tarcia. Jeżeli weźmiemy pod uwagę pojedyncze uderzenie kowadeł, rozkład taki jest wspólny dla kalibrowania koło → kwadrat oraz koło → koło tylko w warstwie przyległej do płaszczyzny wejścia. Dalsze kucie przy podawaniu materiału ruchem złożonym powoduje, że po obrocie największy przyrost odkształcenia w rozpatrywanej warstwie

przypada w miejscu przekroju, gdzie uprzednio znajdowała się strefa swobodna - strefa leżąca poza obszarem działania kowadeł. Zmiana miejsca powierzchni pręta względem kierunku działania kowadeł w kolejnych uderzeniach zapobiega różnicowaniu wielkości odkształceń lokalnych na przekroju pręta w kierunku obwodowym, które z kolei jest charakterystyczne dla prętów kutych przy podawaniu materiału ruchem prostym. Natomiast pręty kute według kalibrowania koło → koło cechuje symetria rozkładu odkształceń na przekrojach poprzecznych względem osi wzdłużnej pręta.

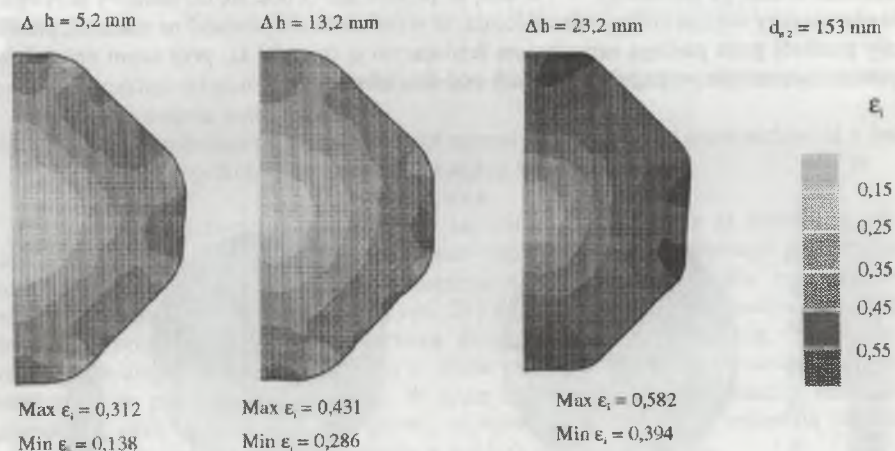


Rys. 34. Rozkład intensywności odkształceń lokalnych na przekroju pręta kutego według kalibrowania koło → koło: a) b) c) dla kolejnych wielkości posuwu

Fig. 34. The distribution of local strains' intensity on the cross-section of a bar forged according to circle → circle sizing scheme: a) b) c) for consecutive feed values

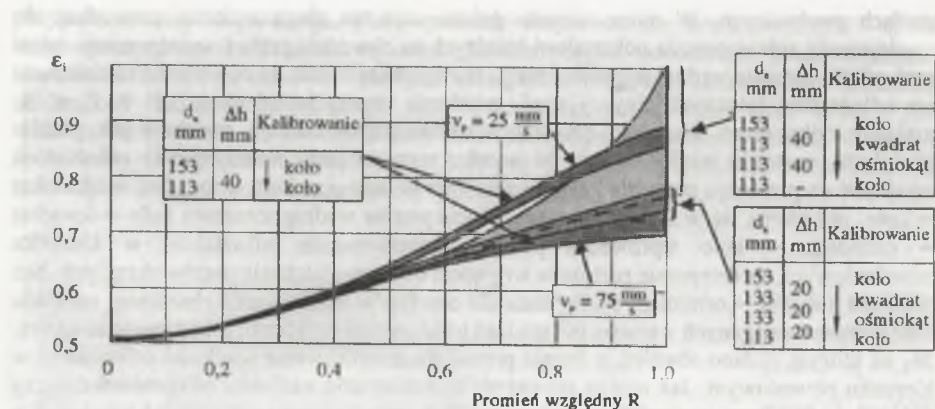
Kolejne rysunki (rys. 35, 36) przedstawiają wyniki symulacji wieloprzepustowego kucia prętów ze stali w gatunku SW7M. W obliczeniach kolejnych przepustów uwzględniany jest skutek odkształcania w przepustach poprzedzających. Dlatego otrzymany przy kuciu pręta według kalibrowania koło → kwadrat → ośmiokąt rozkład sumarycznych odkształceń lokalnych różni się od pokazanego na rys. 32 b. Uwzględniając odkształcenia zadane przy kuciu kwadratu, po obrocie o kąt 45° nacisk kowadeł przypada w miejscu powierzchni pręta, gdzie uprzednio znajdowała się swobodna strefa narożnika. W początkowej fazie kucia ośmiokąta odkształcenia w strefie pod kowadłami są mniejsze od już występujących w

strefach swobodnych. W miarę wzrostu gniotu, stan ten ulega zmianie, prowadząc do zmniejszenia zróżnicowania odkształceń lokalnych na obwodzie pręta i występowania istotnych różnic głównie wzdłuż promienia pręta. Uwzględniając fakt, że obwodowe zróżnicowanie odkształceń lokalnych dotyczy strefy przekroju objętej promieniem $0,8 < R \leq 1$, rozkłady odkształceń lokalnych dla prętów ośmiokątnych cechuje podobnie jak prętów okrągłych, symetria względem osi. W wyniku tego rozkłady intensywności odkształceń lokalnych na przekroju pręta dla kalibrowania koło → koło oraz koło → kwadrat → ośmiokąt → koło, nie różnią się w sposób znaczący. Kucie prętów według schematu koło → kwadrat → ośmiokąt → koło wprowadza podobne zróżnicowanie odkształceń w kierunku promieniowym, symetrycznie rozłożone względem osi pręta, jak kucie prętów okrągłych, bez przejścia kwadrat → ośmiokąt. Porównanie dla obu typów kalibrowania charakteru rozkładu oraz poziomu osiąganych wartości odkształceń lokalnych na promieniu przedstawiono na rys. 36, na którym podano również w formie przedziału zróżnicowanie wielkości odkształceń w kierunku obwodowym. Jak można zauważyć, zróżnicowanie wielkości odkształceń dotyczy głównie warstw powierzchniowych pręta. Duże zróżnicowanie odkształceń lokalnych w kierunku obwodowym dla omawianych typów kalibrowania, występuje przy kuciu kwadratu o ostrych narożach [28, 79], względnie przy przepelnieniu wykroju. W wyniku płynięcia materiału według schematu przedstawionego na rys. 35, wielkości odkształceń lokalnych w strefie narożnika kwadratu oraz w strefie promienia $R > 0,9$, dla prętów ośmiokątnych mogą się na obwodzie różnić nawet dwukrotnie. W kolejnym przepuszczeniu ośmiokąt → koło nie można już usunąć w jednym przejściu, tak znacznego zróżnicowania odkształceń w kierunku obwodowym, jak pokazany na rys. 36 (granica przedziału przy kalibrowaniu koło → kwadrat → ośmiokąt, dla gniotu $\Delta h = 40 \text{ mm}$), zwłaszcza wówczas, gdy gniot w przepuszczeniu ośmiokąt → koło jest gniotem wygładzającym.



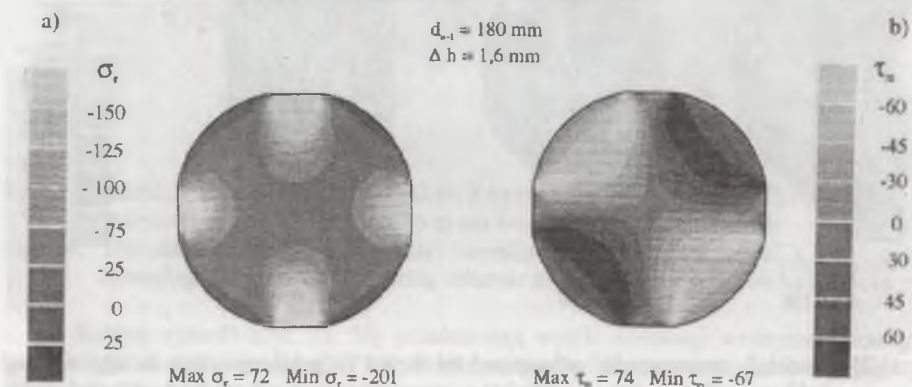
Rys. 35. Rozkład intensywności odkształceń lokalnych na przekroju pręta kutego według kalibrowania kwadrat → ośmiokąt z uwzględnieniem odkształceń zadanych przy kuciu kwadratu

Fig. 35. The distribution of local strains' intensity on the cross-section of a bar forged according to square → octagon sizing scheme including deformations imposed at forging a square



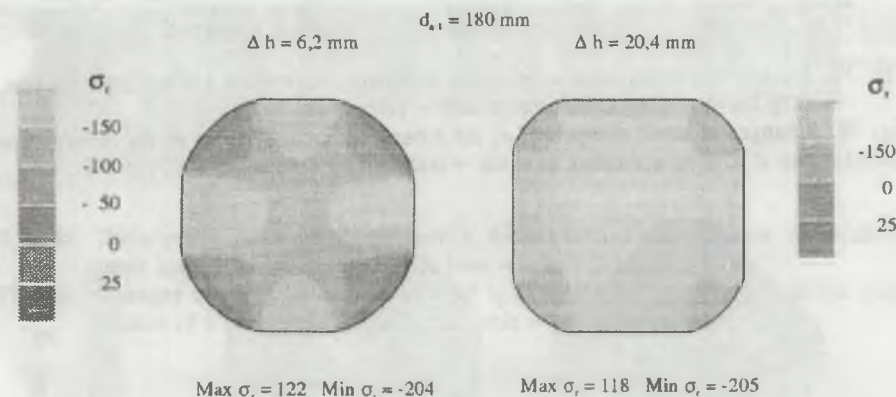
Rys. 36. Porównanie odkształceń lokalnych na promieniu prętów okrągłych kutych z zastosowaniem kalibrowania koło → koło oraz koło → kwadrat → ośmiokąt → koło
 Fig. 36. Comparison of local strains on the radius of round bars forged according to circle → circle and circle → square → octagon → circle sizing scheme

Interesujących danych dostarcza analiza naprężeń. Przedstawione na rys. 37+42 wyniki symulacji kucia wykonano dla stali w gatunku NC10. Na rys. 37 przedstawiono zmiany na przekroju poprzecznym pręta, składowej naprężenia σ_r oraz τ_{rz} w początkowej fazie kucia pręta okrągłego $d_{n,1} = 180$ mm. Przedstawiony na tym rysunku przekrój przedstawia stan po gnioście $\Delta h = 1,6$ mm, co praktycznie odnosi się do warstwy przyległej do płaszczyzny wejścia kotliny odkształcenia. W wyniku nacisku kowadzi na materiał, prawie cały przekrój pręta podlega naprężeniom ściskającym σ_r (rys. 37 a), przy czym największe wartości naprężenia występują w strefach pod kowadzlami.



Rys. 37. Rozkład składowej naprężenia: a) normalnego σ_r oraz b) naprężenia stycznego τ_{rz} na przekroju, w początkowej fazie kucia pręta okrągłego
 Fig. 37. The distribution of a component of: a) normal stress σ_r and b) tangential stress τ_{rz} on the cross-section in the initial phase of forging a round bar

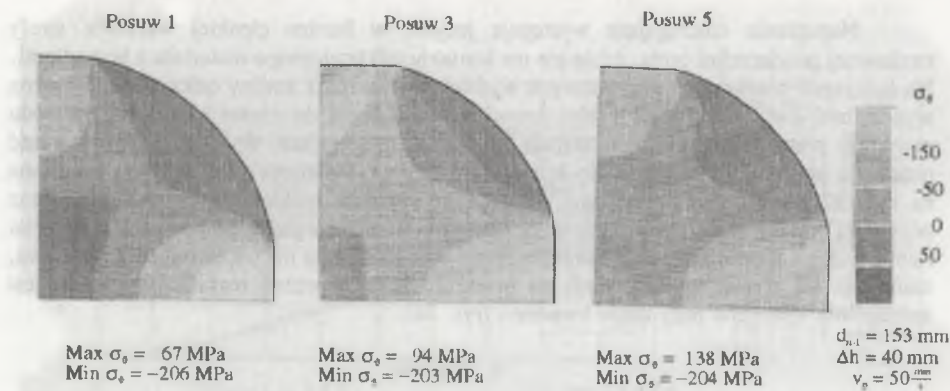
Naprężenia rozciągające występują jedynie w bardzo cienkiej warstwie strefy swobodnej powierzchni pręta, gdzie nie ma kontaktu odkształcanego materiału z kowadzlami. Na kolejnych przekrojach poprzecznych wydzielonych wzdłuż kotliny odkształcenia można wyodrębnić dwie zasadnicze strefy: pierwsza to przyległa do części swobodnej obwodu przekroju pręta, gdzie zawsze występują naprężenia rozciągające, druga to pozostała część przekroju podlegająca naprężeniom ściskającym (σ_r, σ_z). Składowa naprężenia τ_{rz} pokazana na rys. 37 b, jak tego oczekiwano, cechuje się symetrią rozkładu pod kowadzlami oraz oczywistą zmianą znaku naprężenia w osi kowadzi. W miarę wgłębiania kowadzi w materiał i zmniejszania się długości stref swobodnych powierzchni pręta nie obciążonych kowadzlami, zmniejsza się obszar występowania na przekroju pręta naprężeń rozciągających, co jest szczególnie widoczne przy kuciu kwadratu (rys. 38).



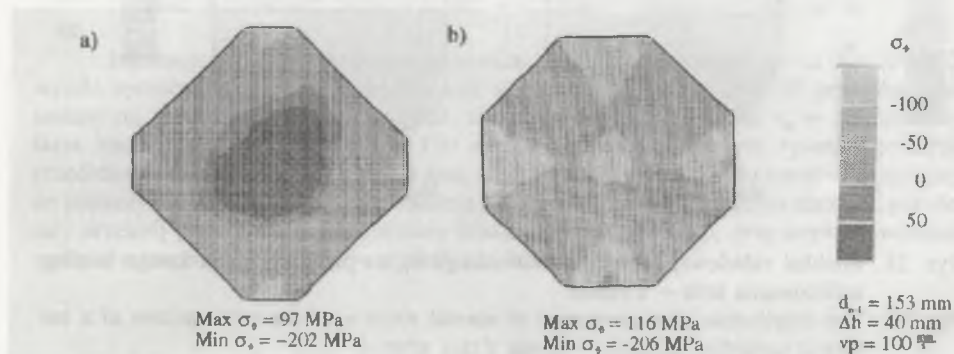
Rys. 38. Rozkład składowej naprężenia normalnego σ_r na przekroju pręta kutego według kalibrowania koło → kwadrat
 Fig. 38. The distribution of a component of normal stress σ_r on the cross-section of a bar forged according to circle → square sizing scheme

Z technologicznego punktu widzenia najbardziej niebezpieczne są naprężenia rozciągające występujące w strefach pręta w niewielkim stopniu przerobionego plastycznie. Rozkład na przekroju pręta składowej naprężenia σ_r dla kolejnych warstw modelowanej kotliny odkształcenia przedstawiono na rys. 39. Zgodnie z założeniem modelu, kierunek obwodowy opisuje naprężenie w kierunku długości kotliny odkształcenia. Naprężenia rozciągające dla tej składowej występują w strefie rdzenia pręta oraz w obszarze przekroju przyległym do powierzchni swobodnej. W miarę zwiększania się kąta opasania materiału kowadzlami, czyli wraz ze wzrostem gniołu, naprężenia w rdzeniu pręta zmieniają znak na ściskające. Rozciągające pozostają jedynie w strefach swobodnych pręta.

Przedstawiony charakter zmian składowej naprężenia σ_r w pobliżu płaszczyzny wejścia jest niezależny od typu kalibrowania. Potwierdzają to mapy przedstawione na rys. 40. Naprężenia ściskające występują jedynie w strefach pod kowadzlami, natomiast rdzeniowa część przekroju pręta podlega wzdłużnemu rozciąganiu (rys. 40 a). W miarę wzrostu kąta opasania stan ten ulega zmianie. Strefa naprężeń ściskających ulega powiększeniu obejmując również strefę rdzenia pręta (rys. 40 b). Dla tej fazy nacisku kowadzi poziom naprężeń ściskających w rdzeniu osiąga poziom naprężeń występujących w strefach pod kowadzlami.



Rys. 39. Zmiany składowej naprężenia σ_θ dla kolejnych przekrojów kotliny odkształcenia, przy kuciu według kalibrowania koło \rightarrow koło
 Fig. 39. Changes of stress component σ_θ for subsequent cross-sections of the deformation gap at forging according to circle \rightarrow circle sizing scheme

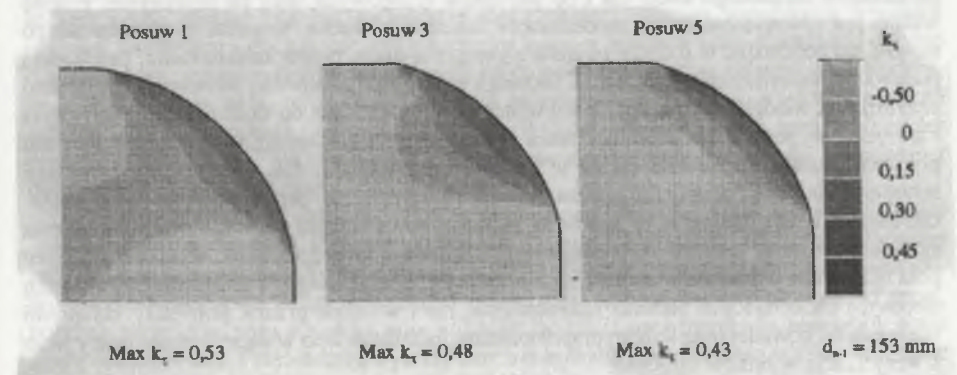


Rys. 40. Rozkład składowej naprężenia σ_θ , przy kuciu według kalibrowania kwadrat \rightarrow ośmiokąt: a) gniot $\Delta h = 5,2 \text{ mm}$, b) gniot $\Delta h = 13,2 \text{ mm}$
 Fig. 40. Distribution of stress component σ_θ at forging according to the square \rightarrow octagon sizing scheme: a) draft $\Delta h = 5.2 \text{ mm}$, b) draft $\Delta h = 13.2 \text{ mm}$

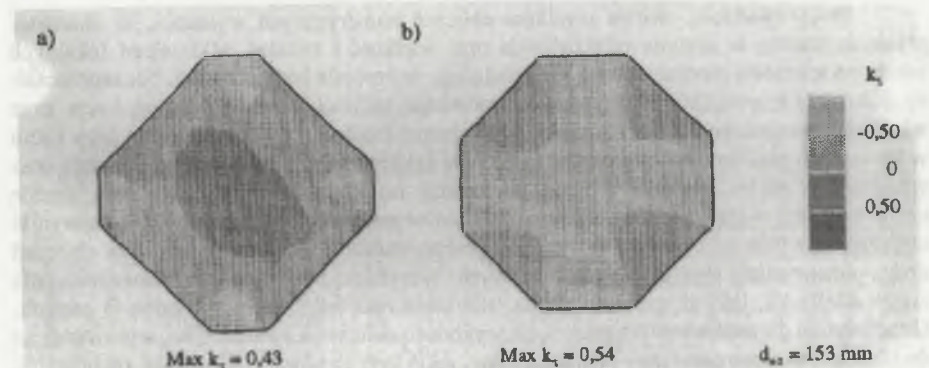
Ogólne wnioski wynikające z tych badań wskazują, że niebezpieczna jest przy kuciu płaskimi kowadłami początkowa faza wgniatania kowadeł w materiał przy kuciu według kalibrowania koło \rightarrow koło. Naprężenia rozciągające w osi pręta przy podawaniu materiału ruchem złożonym występują na całej długości kotliny odkształcenia. Pewne zagrożenie z technologicznego punktu widzenia stanowi również faza kucia dla małych wielkości kąta opasania materiału kowadłami, przy podawaniu materiału ruchem prostym, co jednakże dotyczy jedynie warstwy przyległej do płaszczyzny wejścia kotliny odkształcenia. Dla tych przypadków zarówno w strefie osi, jak i strefach poza obszarem objętym kowadłami stan naprężenia sprzyja powstawaniu pęknięć materiału.

Korzystną z punktu widzenia realizacji procesu kucia zmianę stanu naprężenia wzdłuż kotliny odkształcenia potwierdzają przedstawione na rys. 41, dla kalibrowania koło \rightarrow koło oraz na rys. 42 dla kalibrowania kwadrat \rightarrow ośmiokąt, rozkłady wskaźnika stanu naprężeń

k_r , wyrażającego wpływ stanu naprężeń na zdolność materiału do odkształceń plastycznych bez utraty spójności. Dodatkowo wartości wskaźnika k_r występują jedynie w pobliżu płaszczyzny wejścia, gdy kąt opasania materiału kowadłami jest mały. Przy większym gniocie proces realizowany jest przy technologicznie korzystnych - ujemnych wartościach wskaźnika k_r .



Rys. 41. Zmiany wskaźnika stanu naprężenia k_r wzdłuż kotliny odkształcenia, na przekroju pręta kutego według kalibrowania koło \rightarrow koło
 Fig. 41. Changes of the stress state coefficient k_r along the deformation gap on the cross-section of a bar forged according to circle \rightarrow circle sizing scheme



Rys. 42. Rozkład wskaźnika stanu naprężenia k_r , przy kuciu według kalibrowania kwadrat \rightarrow ośmiokąt: a) gniot $\Delta h = 5,2 \text{ mm}$, b) gniot $\Delta h = 13,2 \text{ mm}$
 Fig. 42. Distribution of the stress state coefficient k_r at forging according to square \rightarrow octagon sizing scheme: a) draft $\Delta h = 5.2 \text{ mm}$, b) draft $\Delta h = 13.2 \text{ mm}$

Opisane schematy naprężenia oraz schematy odkształcenia występujące przy kuciu w kowarce stanowią podstawę doboru parametrów technologii oraz dają możliwość wyjaśniania zjawisk występujących w kotlinie odkształcenia. Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników obliczeń, których część przedstawiono również w publikacjach [28, 36, 46, 76,

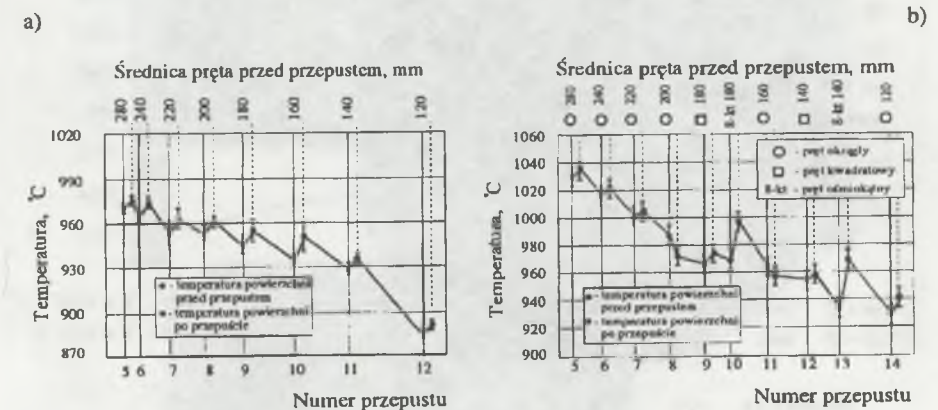
78÷81, 85], należy stwierdzić, że opracowany sposób modelowania procesu kucia w kowarce pozwala na symulację płynięcia metalu w strefie odkształcenia dla stosowanych w praktyce przemysłowej, technologicznych warunków kucia. Przeprowadzone dla różnych danych początkowych obliczenia wykazały, że wynik modelowania zależy zarówno od parametrów technologii kucia jak i od warunków brzegowych, lecz co istotniejsze, równie ważne jest uwzględnienie w modelowaniu kinematyki ruchu narzędzi i odkształcanego metalu, co pozostając w ścisłym związku z geometrią pręta, typem kalibrowania, prędkością podawania materiału oraz prędkością jałowego ruchu manipulatorów, odzwierciedla stopień przybliżenia modelu do obiektu rzeczywistego. Wprowadzane do obliczeń charakterystyki materiału, w postaci funkcji umocnienia oraz własności cieplnych, wpływają na schemat płynięcia metalu i stan naprężenia w kotlinie odkształcenia. Całość wyników symulacji termomechanicznej podporządkowana jest temperaturowemu przebiegowi procesu kucia. Określenie zmian temperatury pasma w procesie kowarkowym wymaga przeprowadzenia symulacji procesu, nie zaś wybranego jego fragmentu. Dlatego analizę wyników obliczeń pola temperatury pasma dla konkretnego procesu technologicznego, z uwzględnieniem zmian cieplnych zachodzących podczas odkształcania, jak i w czasie przerw pomiędzy kolejnymi uderzeniami kowadeł oraz kolejnymi przepustami, przedstawiono w dalszej części pracy wraz z weryfikacją wyników obliczeń.

6. 3. Weryfikacja wyników obliczeń numerycznych

Przeprowadzona analiza wyników obliczeń numerycznych wykazała, iż charakter płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia oraz wielkość i rozkład odkształceń lokalnych zależą od schematu mechanicznego występującego w procesie kowarkowym. Niezaprzeczalny jest wpływ warunków brzegowych, warunków technologicznych procesu kucia oraz własności odkształcanego metalu. Natomiast schemat mechaniczny odkształcania przy kuciu w kowarkach płaskimi kowadłami zależy od typu kalibrowania, wielkości kąta opasania oraz wzajemnego ruchu kowadeł i ruchu podawania materiału. Przy tak znacznej liczbie czynników wpływających na wynik symulacji istotne jest określenie, na ile różnią się wyniki obliczeń od wyników pomiaru. W tym celu przeprowadzono weryfikację wyników obliczeń drogą porównania z wynikami prób ruchowych. Weryfikację wyników przeprowadzono dla takich wielkości, jak: temperatura pasma, siła kucia oraz odkształcenia lokalne w prętach. Odpowiednio do prowadzonych prób kucia wykonano obliczenia symulacyjne, wprowadzając do obliczeń te same parametry technologiczne, jakie były stosowane w próbach ruchowych. Próby kucia przeprowadzono w kowarce, której standardowe wyposażenie pomiarowe stanowią wskaźniki nastawy rozwarości kowadeł oraz mocy silników głównych. Na czas badań kowarka została wyposażona w dodatkowe przyrządy kontrolno-pomiarowe oraz rejestrujące. Zainstalowano impulsowe mierniki drogi oraz mierniki prędkości posuwu obu manipulatorów, a także pirometry całkowitego promieniowania, umieszczone w pobliżu wejścia i wyjścia pasma ze strefy kucia. Na śrubach nastawczych naklejono tensometry oporowe. Dla wyznaczenia zależności pomiędzy siłą kucia oraz mierzoną siłą wzdłużną w śrubach nastawczych określono rozkład sił dla mechanizmu nastawy i wyważenia kowadeł przy uwzględnieniu sił wstępnego sprężenia oraz sił grawitacji. Zastosowanie wielokanałowego rejestratora pozwoliło na zapis w trakcie każdego przepustu: naprężenia w śrubach nastawczych, drogi i prędkości posuwu oraz temperatury pasma w strefach bezpośrednio przed i za kotliną odkształcenia.

Jednym z elementów współdecydujących o poprawności wyników termomechanicznej symulacji procesu jest modelowanie zmian temperatury. Wykorzystując opracowany model procesu kowarkowego, obliczono rozkłady temperatur w przekrojach poprzecznych pręta z uwzględnieniem położenia analizowanego przekroju na długości pasma. Weryfikacja wyników obliczeń rozkładu temperatury w przecie jest możliwa jedynie drogą bezpośrednich pomiarów termoparami wprowadzonymi w różne miejsca objętości kutego pasma. Dla procesu kowarkowego pomiar taki jest technicznie niewykonalny. Dlatego weryfikację wyników obliczeń temperatury dla poszczególnych etapów kucia w kowarce przeprowadzono jedynie dla pomiarów pirometrycznych odnoszących się do powierzchni pręta przyjmując założenie, że jeśli obliczenia w tej tylko części wyników są zgodne z pomiarami, a wynikają z tego samego spójnego modelu, to trudno przyjąć, iż model dla pozostałej części wyników symulacji termicznej daje złe wyniki, biorąc nawet pod uwagę trudności związane z poprawnym określeniem warunków brzegowych.

Kucie wlewków ze stali narzędziowych przeprowadzono dla zróżnicowanych wielkości prędkości podawania oraz wielkości gniotu w przepuscie (wg tablicy 7), przy całkowitej redukcji średnicy pręta w zakresie 320 ÷ 120 mm. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wyznaczono zależności zmian temperatury powierzchni wybranych stref na długości pręta, podczas stygnięcia poza kowarką oraz w czasie przejścia analizowanego przekroju przez strefę odkształcenia. Przykładowe wykresy zmian temperatury powierzchni prętów otrzymane przy kuciu wlewków ze stali w gatunkach NC10 oraz SW7M, dla różnych systemów kalibrowania, przedstawiono na rys. 43. Usytuowanie kolejnych przepustów na omawianych wykresach uwzględnia czas kucia oraz czas przebywania danego przekroju poza strefą odkształcenia. Na wykresach nie przedstawiono wyników pomiaru temperatury w pierwszych czterech przepustach, z których zrezygnowano ze względu na zbyt małą długość pręta i brak możliwości przeprowadzenia dokładnego pomiaru.

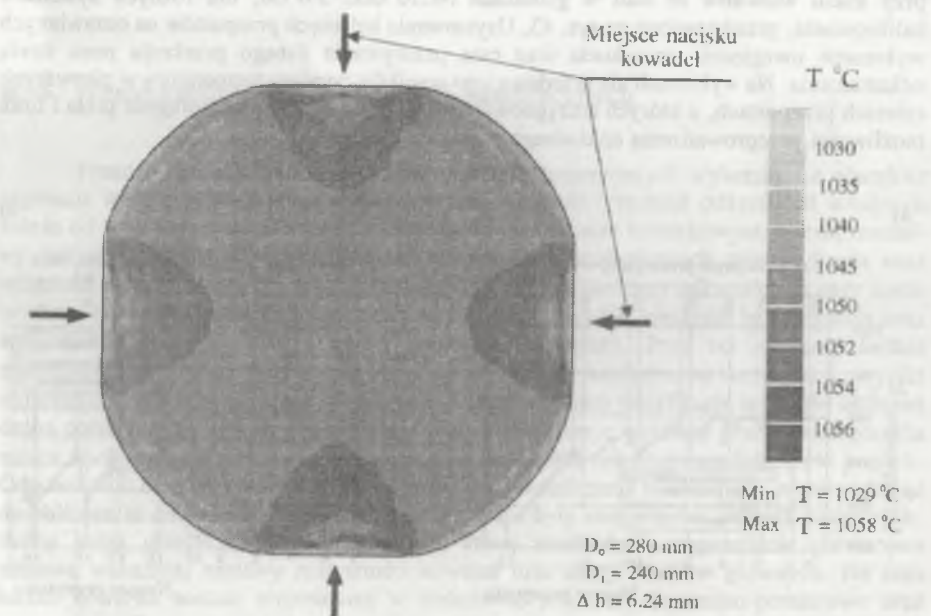


Rys. 43. Zmiany temperatury pręta przy kuciu według kalibrowania: a) koło → koło (stal NC10), b) koło → kwadrat → ośmiokąt → koło (stal SW7M)

Fig. 43. A bar temperature changes at forging according to: a) circle → circle (steel NC10), b) circle → square → octagon → circle sizing schemes (steel SW7M)

Dla wszystkich prób kucia przeprowadzonych według kalibrowania koło → koło, zarejestrowano wzrost temperatury powierzchni pręta podczas przejścia przez strefę odkształcenia. Stwierdzono również wzrost temperatury powierzchni pasma przy kuciu według kalibrowania kwadrat → ośmiokąt oraz ośmiokąt → koło. Natomiast podczas kucia według kalibrowania koło → kwadrat stwierdzono obniżenie temperatury powierzchni pasma podczas przejścia przez strefę odkształcenia. Ponadto dla przepustów kwadrat → ośmiokąt wzrost temperatury jest porównywalny do przyrostów osiąganych podczas kucia według kalibrowania koło → koło, pomimo zwiększonej przy kuciu ośmiokąta prędkości podawania do 100 mm/s, która dla pozostałych systemów kalibrowania wynosiła 50 mm/s.

Odpowiednio do przeprowadzonych prób kucia wykonano obliczenia symulacyjne, w których wyznaczono zmiany rozkładów temperatury na przekroju pręta w czasie kolejnych przepustów. W obliczeniach uwzględniono stygnięcie pasma podczas transportu z pieca do kowarki oraz w czasie pomiędzy wyjściem a kolejnym wejściem analizowanego przekroju pręta w strefę kucia. Przedstawiony na rys. 44 rozkład temperatury na przekroju poprzecznym pręta, który wydzielono w pobliżu płaszczyzny wyjścia kotłiny odkształcenia, odzwierciedla wynik bilansu cieplnego, wywołany ujętymi w obliczeniach symulacyjnych procesami generowania oraz złożonej wymiany ciepła.

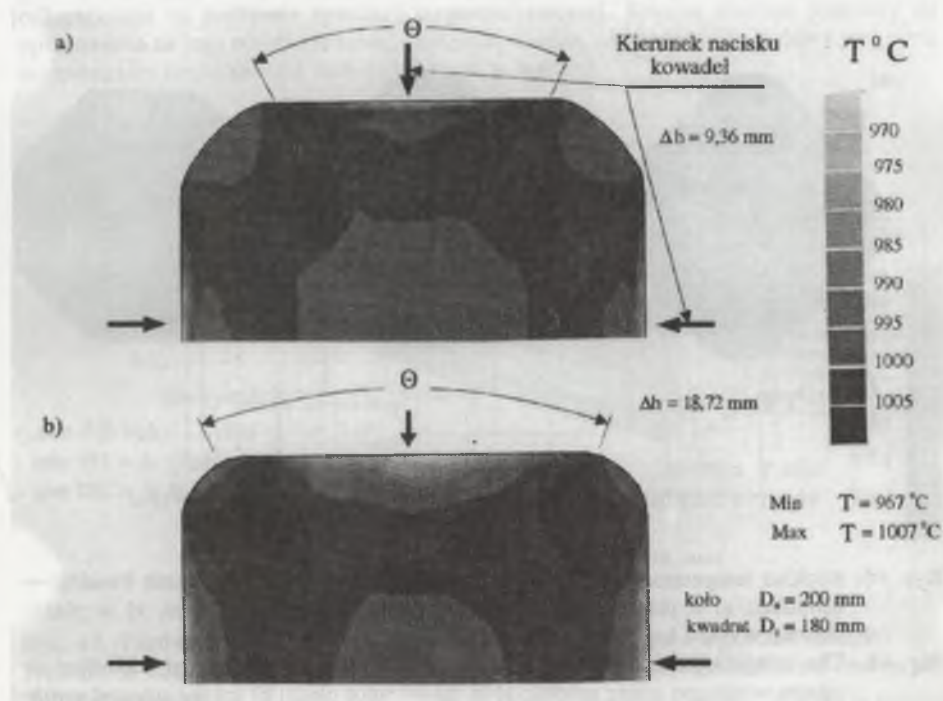


Rys. 44. Symulowany rozkład temperatury na przekroju pręta kutego według kalibrowania koło → koło (stal SW18)

Fig. 44. A simulated temperature distribution on the cross-section of a bar forged according to circle → circle sizing scheme (steel SW18)

Efektom zachodzących procesów jest obniżenie temperatury powierzchni pręta i warstw przyległych wskutek wymiany ciepła z otaczającym powietrzem oraz kowadłami, a także podwyższenie temperatury materiału w strefach intensywnego płynięcia plastycznego. Analiza wyników obliczeń wykazała, że przy podawaniu materiału ruchem złożonym, czyli kuciu prętów okrągłych, zróżnicowanie temperatury na przekroju pasma w kierunku obwodowym, występuje jedynie w przekrojach leżących w pobliżu płaszczyzny wejścia kotłiny odkształcenia. W płaszczyźnie wyjścia zróżnicowanie temperatury zarówno na powierzchni pręta, jak i w strefach wewnętrznych, w kierunku obwodowym przekroju jest pomijalnie małe. Równocześnie w czasie pomiędzy wyjściem a ponownym wejściem w strefę odkształcenia prócz obniżenia temperatury powierzchni pręta następuje naturalne wyrównanie temperatury w strefach wewnętrznych. W przypadku kucia prętów okrągłych prowadzi to do zaniku zróżnicowania temperatury w tych przekrojach w kierunku obwodowym. Istotne zróżnicowanie temperatury widoczne jest jedynie w kierunku promieniowym.

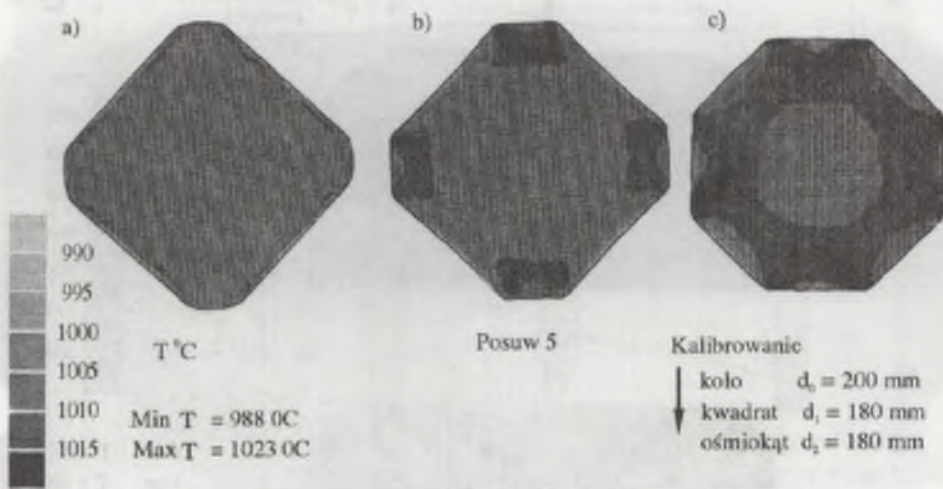
W przypadku kucia prętów kwadratowych charakter rozkładu temperatury na przekroju pręta ulega zmianie zależnie od relacji wielkości gniotu do wymiaru boku kwadratu, co jednoznacznie określa wielkość kąta opasania materiału kowadłami. Dla małych wielkości tego kąta narożniki tworzącego się kwadratu, pomijając samą powierzchnię, wykazują tę samą temperaturę, co strefa rdzeniowa (rys. 45 a).



Rys. 45. Rozkład temperatury na przekroju pręta kutego według kalibrowania koło → kwadrat dla: a) małej oraz b) dużej wielkości kąta opasania Θ (stal SW7M)

Fig. 45. The temperature distribution on the cross-section of a bar forged according to circle → square sizing scheme for: a) small and b) large magnitude of the wrapping angle Θ (steel SW7M)

W miarę zwiększania się kąta opasania zmienia się położenie na przekroju pręta miejsce występowania największej intensywności prędkości odkształcenia, przemieszczając się w stronę narożników. Skutkiem tego w płaszczyźnie wyjścia (rys. 45 b) strefy te wykazują najwyższe temperatury na przekroju. Przedział zmian temperatury jest jednakże niewielki i wynosi $\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, a pomijając najbardziej ochłodzone warstwy powierzchniowe, różnica temperatury pomiędzy strefą rdzenia a warstwami najbardziej nagrzanymi odkształceniem wynosi kilkanaście stopni. Na rys. 46 przedstawiono wyniki symulacji rozkładu temperatury na przekroju pręta kutego według kalibrowania kwadrat \rightarrow ośmiokąt. Przedstawiony na rys. 46 a rozkład temperatury na przekroju pręta kwadratowego uległ zmianie, w porównaniu do pokazanego na rys. 45 b, w wyniku procesu wyrównywania temperatury w warstwach wewnętrznych w czasie pomiędzy wyjściem a ponownym wejściem w strefę odkształcenia. Na przedstawionym rozkładzie temperatury widoczny jest również efekt wcześniejszego kucia, tzn. chłodniejsza w stosunku do warstw wewnętrznych powierzchnia oraz warstwy przypowierzchniowe zwłaszcza w środku strefy nacisku kowadeł. Skuwanie narożników kwadratu przy dalszym kuciu ośmiokąta prowadzi do zróżnicowania temperatury pręta głównie w strefie pod kowadłami (rys. 46 b). Przedstawione na rys. 46 c izotermy dla pręta ośmiokątnego w chwili jego wyjścia ze strefy odkształcenia wykazują różnice temperatury między powierzchnią a strefą rdzenia wynoszące $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Natomiast zróżnicowanie temperatury warstw wewnętrznych nie przekracza $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.



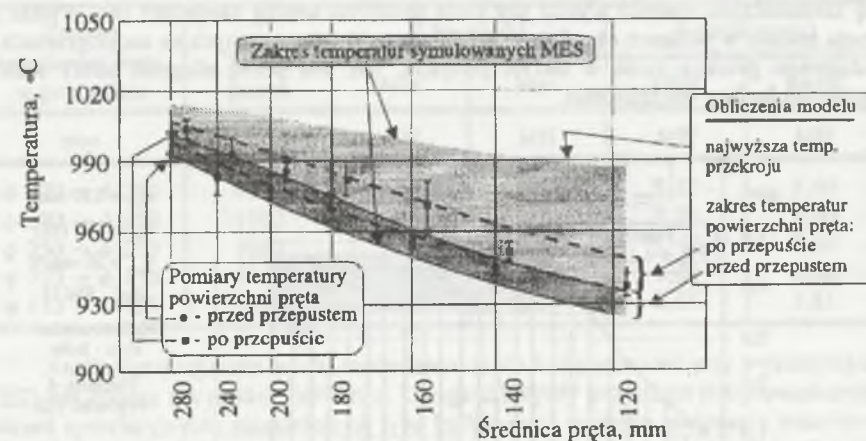
Rys. 46. Rozkład temperatury na przekroju pręta kutego według kalibrowania kwadrat \rightarrow ośmiokąt: a) w płaszczyźnie wejścia, b) dla wybranego przekroju, c) w płaszczyźnie wyjścia (stal SW7M)

Fig. 46. The temperature distribution on the cross-section of a bar forged according to square \rightarrow octagon sizing scheme: a) in the entrance plane, b) for the selected cross-section, c) in the exit plane (steel SW7M)

Przedstawione wyniki obliczeń symulacji pola temperatury na przekroju prętów kutych w kowarce wybrano jako przykładowe, charakteryzujące istotne cechy procesu zmienności temperatury prętów kutych w kowarce, zarówno podczas odkształcenia jak i w czasie przerw między kolejnymi przepustami. Na podstawie obliczonych rozkładów temperatury w analizo-

wanych przekrojach wyznaczono temperatury powierzchniowe, które porównano z wynikami pomiarów. Przykładowy wykres porównania temperatur zmierzonych i obliczonych dla przypadku kucia wlewka ze stali w gatunku SW18, w dwunastu przepustach, według kalibrowania koło \rightarrow koło, przedstawiono na rys. 47. Rozmieszczenie kolejnych przepustów na omawianym wykresie, podobnie jak na rys. 43, wynika z upływu czasu pomiędzy wyjściem a ponownym wejściem analizowanego przekroju w strefę odkształcenia.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że temperatury zmierzone mieszczą się w przedziale zmienności temperatur obliczonych. Obliczenia symulujące pozwalają zatem na wyznaczenie temperatur powierzchni pręta zgodnych z wynikami pomiarów z wystarczającą dla praktyki dokładnością, określaną przez dokładność pomiarów pirometrycznych. Otrzymana dla powierzchni pręta duża zgodność temperatur obliczonych ze zmierzonymi pozwala z kolei przypuszczać, że symulowane rozkłady temperatur na przekroju pręta odpowiadają rozkładom rzeczywistym. Na tej podstawie przyjęto wniosek, że opracowany sposób symulacji kucia w kowarce pozwala na wyznaczenie rozkładów temperatur zgodnych z obiektem rzeczywistym, zarówno w przypadku wzrostu temperatury wskutek wydzielenia ciepła w danym miejscu pręta, jak i w przypadku gdy bilans cieplny procesu prowadzi do lokalnego obniżenia temperatury. Stwierdzenie poprawności działania modelu procesu kowarkowego w części termicznej uzasadnia jego zastosowanie do analizy w części mechanicznej i określenie płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia na podstawie symulacji termomechanicznej. Stwarza również podstawy do opracowania na jego podstawie modelu temperaturowego, niezbędnego do budowy programu wspomaganego projektowania technologii kucia w kowarce.

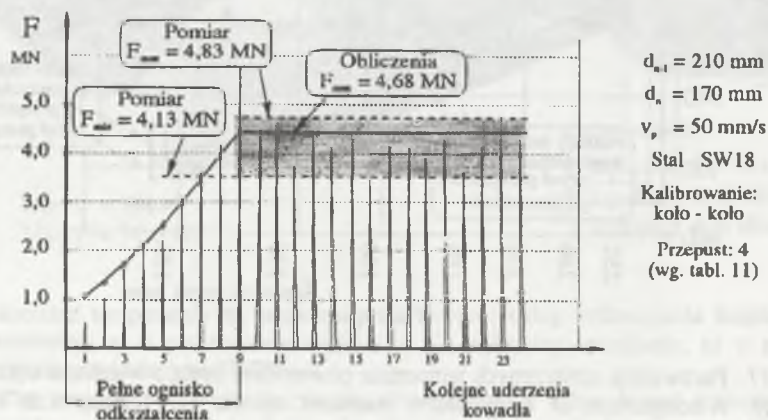


Rys. 47. Porównanie zmierzonych temperatur powierzchni pręta z wynikami obliczeń
Fig. 47. A comparison of temperatures measured on the bar surface with results of calculations

Przeprowadzone obliczenia symulacji procesu kowarkowego oprócz wyznaczenia charakterystyki rozkładu naprężeń i odkształceń oraz rozkładu temperatury pozwoliły na określenie wielkości siły kucia, jako jeden z szeregu wyników numerycznej symulacji. Odniesienie wyników siły kucia, obliczonej na podstawie symulacji bieżącego zarysu przekroju kutego pręta oraz zmiany siły nacisku kowadeł, do wyników pomiaru, przyjęto

jako kolejny element weryfikacji opracowanego modelu procesu kowarkowego. W zakresie obliczeń symulujących wyznaczono geometrię kotliny odkształcenia oraz zmiany nacisku kowadeł w zależności od fazy procesu wglębiania w materiał. Całkowitą siłę kucia obliczono jako sumę nacisków maksymalnych, przypadających na wydzielone wzdłuż kotliny odkształcenia warstwy o skończonej grubości równej $\Delta\delta$ (rys. 29). W obliczeniach przyjęto, iż grubość warstwy jest równa wielkości posuwu $\Delta\delta = p$.

Na rys. 48 przedstawiono wyniki obliczeń siły kucia na tle przykładowego oscylogramu, zarejestrowanego podczas badań ruchowych. Obliczona siła kucia jest zgodna z wynikami pomiarów. Zgodność ta, co oczywiste, zależy od parametrów krzywej umocnienia, a zwłaszcza od wielkości σ_p (31), która może ulegać istotnym zmianom dla danego gatunku stali, nawet w ramach różnic składu chemicznego [24, 82, 75]. Warunkiem otrzymania zgodnych z pomiarami wyników obliczeń jest także stosowanie w obliczeniach symulujących parametrów odzwierciedlających rzeczywisty proces w zakresie modelowania warunków generowania i wymiany ciepła. Modelując kolejne warianty procesu kucia w kowarce stwierdzono [75, 86], że wynik symulacji pierwszego przepustu istotnie zależy od poprawnego określenia: temperatury kowadeł, czasu podania materiału z pieca do kowarki, czasu przebywania pasma poza strefą odkształcenia. W kolejnych przepustach znaczenia nabiera rozkład temperatury na przekroju pasma determinowany zróżnicowanym generowaniem ciepła, zależnym z kolei od wielkości lokalnych odkształceń plastycznych. Dla wybranych stali narzędziowych, w tablicy 10, przedstawiono porównanie wyników obliczeń i pomiarów siły kucia przy podawaniu materiału ruchem prostym. Natomiast w tablicy 11 zebrano wyniki odpowiadające typowej technologii kucia stali SW18 według kalibrowania koło \rightarrow koło, przy zastosowaniu dużego gniotu oraz dużej prędkości podawania. W tablicy tej zamieszczono również wyniki siły kucia obliczone według zależności (9). Wyniki siły kucia podane w tablicach określają przedział wartości rejestrowanych na oscylogramach dla ustalonego procesu kucia w danym przejściu, tzn. dla pełnej długości strefy redukcji przekroju kotliny odkształcenia.



Rys. 48. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów siły kucia dla początkowej fazy wprowadzania pręta między kowadła oraz ustalonego procesu kucia

Fig. 48. A comparison of results of calculations and measurements of the forging force for the initial phase of introducing the bar between anvils and a fixed forging process

Tablica 10
Porównanie wyników siły kucia zmierzonej oraz obliczonej przy podawaniu materiału ruchem prostym $v_p = 100$ mm/s

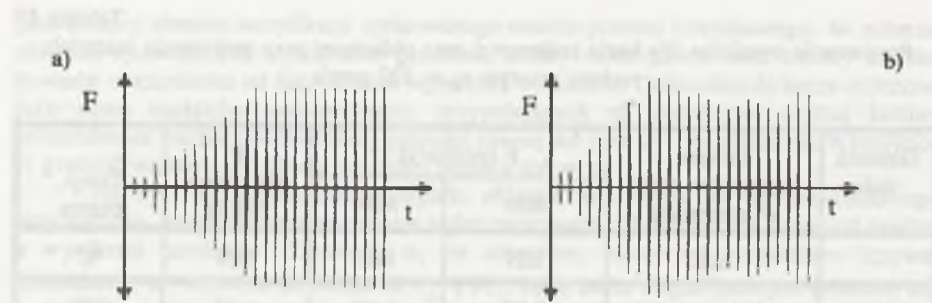
Gatunek stali	Zmiana wymiarów pręta w przepuście	F (pomiar)		F (obliczenia MES)	Temp. pasma
		Min	Max		
-	mm	MN	MN	MN	°C
NC10	$\phi 155 \rightarrow \square 130$	3,97	4,07	4,05	1050
SW7M	$\phi 180 \rightarrow \square 160$	3,21	3,28	3,24	1050
SW18	$\phi 220 \rightarrow \square 200$	4,12	4,32	4,23	1080
	$\square 200 \rightarrow \text{oś. } 180$	2,88	2,96	2,91	1060

Oznaczenia kształtu przekroju prętów: ϕ - okrąg, \square - kwadrat, oś. - ośmiokąt.

Tablica 11
Porównanie wyników siły kucia zmierzonej oraz obliczonej przy podawaniu materiału ruchem złożonym $v_p = 50$ mm/s, dla stali w gatunku SW18

Zmiana wymiarów pręta w przepuście	Temp. pasma	F (pomiar)		F (obliczenia)	
		Min	Max	MES	wg(9)
mm	°C	MN	MN	MN	MN
$\phi 320 \rightarrow \phi 290$	1120	5,11	5,45	5,32	5,60
$\phi 290 \rightarrow \phi 250$	1100	5,46	5,70	5,52	6,00
$\phi 250 \rightarrow \phi 210$	1080	5,06	5,51	5,18	5,67
$\phi 210 \rightarrow \phi 170$	1060	4,13	4,83	4,68	4,86
$\phi 170 \rightarrow \phi 155$	1020	2,95	3,52	3,01	3,81

Analizując otrzymane wyniki stwierdzono, iż siła kucia obliczona przy wykorzystaniu (MES) jest zgodna z wynikami pomiarów. Uwaga ta dotyczy wszystkich przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych, niezależnie od typu kalibrowania (sposobu podawania materiału). Stwierdzono również, że przy kuciu według kalibrowania koło \rightarrow koło przedział zmian wyników zmierzonych jest większy w porównaniu do otrzymanego przy podawaniu materiału ruchem prostym. Dlatego też większe są różnice pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń dla tego typu kalibrowania. Stwierdzone w procesie ustalonym zmiany siły kucia w kolejnych uderzeniach kowadeł prawdopodobnie spowodowane są zmianami geometrii kotliny odkształcenia wskutek podawania materiału z obrotem, gdyż przy kuciu według kalibrowania koło \rightarrow kwadrat oraz koło \rightarrow ośmiokąt zmiany takie nie występują. Efekt oscylacji przedziału zmian siły kucia w trakcie przepustu jest bardziej widoczny przy kuciu według kalibrowania ośmiokąt \rightarrow koło, a szczególnie silnie występuje w nie zalecanych przepustach typu kwadrat \rightarrow koło, co zarejestrowano w trakcie pomiarów (rys. 49).



Rys. 49. Przykłady oscylogramów siły nacisku dla współpracującej pary kowadeł, przy kalibrowaniu: a) koło → kwadrat, b) kwadrat → koło

Fig. 49. Examples of oscillograms of thrust force for a mating pair of anvils, at: a) circle → square, b) square → circle sizing schemes

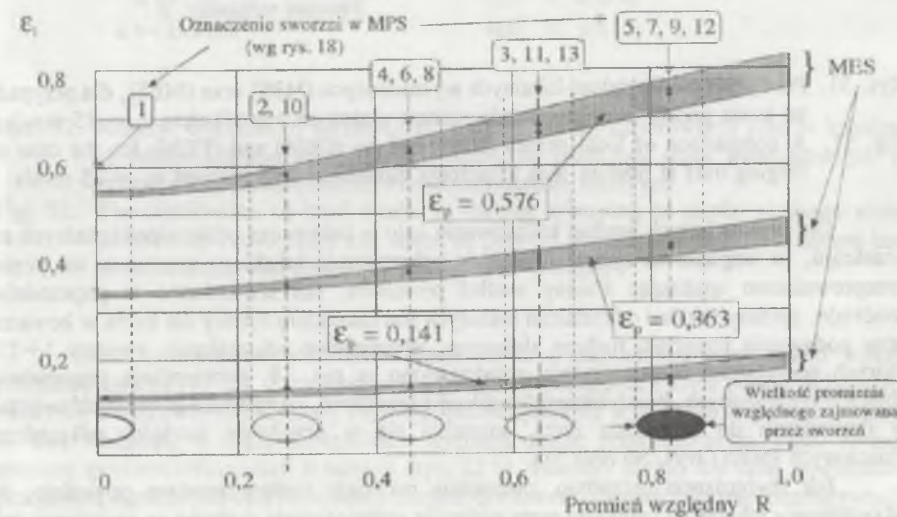
Należy również stwierdzić, że porównywalne z wynikami pomiarów są wyniki siły kucia obliczone za pomocą wzoru (9). Jednakże wzór ten można stosować jedynie dla kalibrowania koło → koło, gdyż jak stwierdzono dla innych typów kalibrowania, różnice pomiędzy wartością obliczoną a pomiarem sięgały nawet 50% wartości mierzonej. Tak znaczne różnice siły kucia obliczonej i zmierzonej są związane z problemem poprawnego obliczenia wartości naprężenia uplastyczniającego w przepuszczeniu, a ściślej, określeniem reprezentatywnych - uśrednionych dla przepustu wartości parametrów technologicznych, tzn. wielkości odkształcenia, prędkości odkształcenia oraz temperatury. Przedstawione w tabelicy 11 wyniki obliczeń siły kucia według wzoru (9) wyznaczono dla temperatury powierzchni pasma (zmierzonej), średniego odkształcenia dla pojedynczego uderzenia kowadeł obliczonego według wzoru (1.7 tablica 1) oraz średniej prędkości odkształcenia wyznaczonej zgodnie z zależnością (2.2 tablica 2).

Doświadczenia zebrane w próbach dotyczących weryfikacji wyników obliczeń siły kucia wykazały, że otrzymane wyniki obliczeń istotnie zależą od poprawnego określenia parametrów procesu technologicznego, szczególnej zaś staranności wymaga określenie: współczynników funkcji umocnienia, czynnika tarcia oraz współczynników wymiany ciepła. Spełnienie wymienionych warunków pozwala wyznaczyć na tyle dokładne wartości siły kucia, że można je stosować do projektowania technologii kucia, z określonym stopniem obciążenia układu napędowego, jak również do projektowania przepustów, w których istotne jest kucie z maksymalną wielkością gniotu oraz posuwu bez obawy przekroczenia dopuszczalnego obciążenia kowarki.

Weryfikacji poddano również wynik numerycznej symulacji płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia. Wyznaczone metodą elementów skończonych (MES) rozkłady odkształceń lokalnych porównano z wielkościami odkształceń wyznaczonymi przy użyciu metody prętów składanych (MPS). Przy ocenie wyników obliczeń numerycznych wykorzystano wyniki badań przedstawione w pracach [14, 22, 39, 41, 43÷45, 47]. Pręty składane były wykonane z preciska ze stali w gatunku 35 wstępnie przekutego z wlewka, w którym osadzono równoległe do osi wzdłużnej sworznie ze stali w gatunku H25T. Liczbe sworzni oraz sposób ich rozmieszczenia na przekroju prętów przedstawiono na kolejnych rysunkach prezentujących poszczególne wyniki badań. Stosowana w badaniach ruchowych metodyka: przygotowania prętów składanych i prowadzenia prób kucia, pobierania tarcz i wykonywania pomiarów oraz sposobu obliczania odkształceń przedstawiona została w pracach [39, 41]. W obliczeniach odkształceń lokalnych przeprowadzonych na podstawie

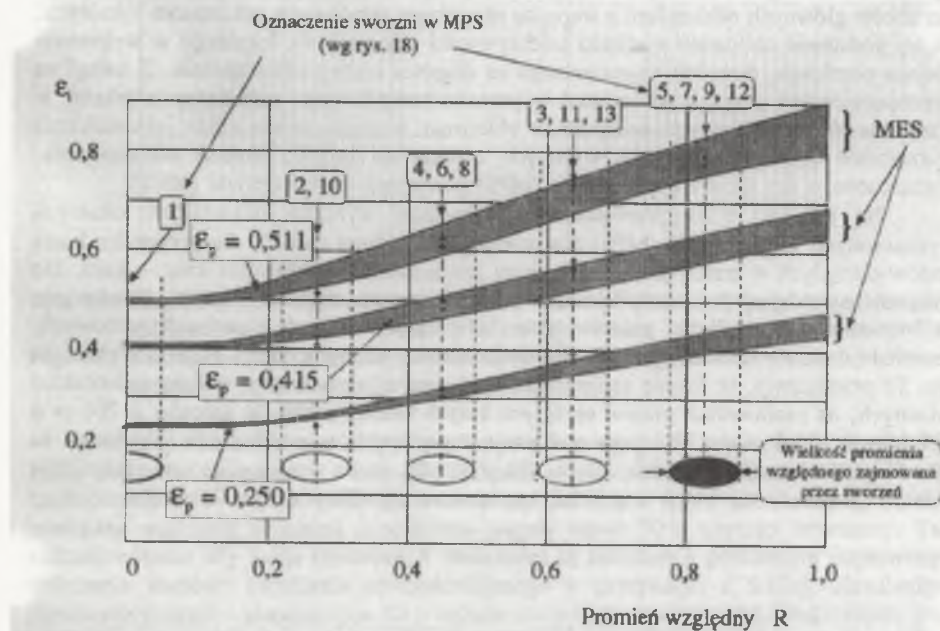
zebranych w pracach [43÷45] wyników pomiarów średnic przekrojów sworzni w tarczach wyciętych na długości kotliny odkształcenia zastosowano iteracyjną metodę wyznaczania kierunków głównych odkształceń z warunku ekstremum składowych odkształceń lokalnych. Na tej podstawie obliczono wielkości intensywności odkształcenia lokalnego w wybranym miejscu przekroju, dowolnie usytuowanego na długości kotliny odkształcenia. Z uwagi na nieproporcjonalny przyrost odkształceń w procesie kowarkowym, odkształcenia lokalne w przejściu oraz w kolejnych przepustach obliczono sumując odpowiednie odkształcenia wyznaczone dla kolejnych tarcz wyciętych z pręta na długości kotliny odkształcenia. Wyznaczone w ten sposób odkształcenia (MPS) porównano z obliczonymi (MES).

Na rys. 50 i 51 przedstawiono porównanie wyników odkształceń lokalnych wyznaczonych w pracy [39] (MPS) z wynikami obliczonymi (MES), dla przypadku kucia prętów okrągłych w trzech przepustach, przy zastosowaniu kalibrowania koło → koło. Do obliczeń symulujących wprowadzono: wielkości geometryczne prętów składanych, kalibrowanie oraz wielkości gniotów takie, jakie były stosowane w próbach ruchowych. Pozostałe dane do obliczeń przyjęto odpowiednio dla stali w gatunku H25T. Wykres na rys. 50 przedstawia, w formie zaciemnionych obszarów, symulowane zmiany odkształceń lokalnych, na promieniach prętów okrągłych kutych według schematu gniotów $\phi 201 \rightarrow \phi 187,3 \rightarrow \phi 156,2 \rightarrow \phi 117,1$ przy podawaniu z prędkością $v_p = 50$ mm/s. Natomiast na rys. 51 porównano odkształcenia lokalne dla przypadku kucia według schematu przepustów $\phi 202 \rightarrow \phi 178,3 \rightarrow \phi 144,9 \rightarrow \phi 112,2$ i podawaniu z prędkością $v_p = 25$ mm/s.



Rys. 50. Porównanie odkształceń lokalnych wyznaczonych (MPS) oraz (MES), dla przypadku kucia prętów przy podawaniu z prędkością $v_p = 50$ mm/s

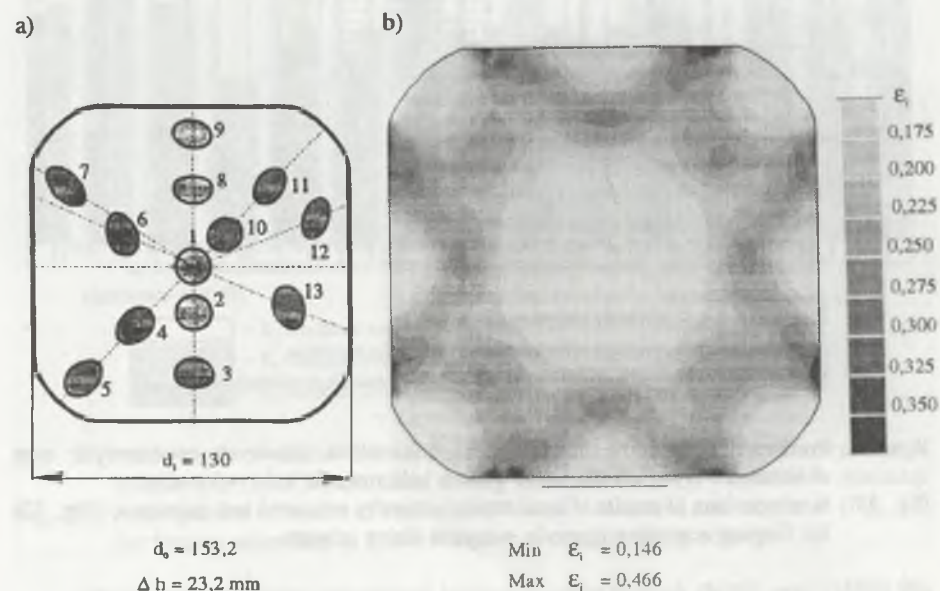
Fig. 50. A comparison of local strains determined by the Composed Bars Method (CBM) and (FEM) for the case of forging bars at feeding with a speed $v_p = 50$ mm/s



Rys. 51. Porównanie odkształceń lokalnych wyznaczonych (MPS) oraz (MES), dla przypadku kucia prętów przy podawaniu ruchem złożonym z prędkością $v_p = 25$ mm/s
 Fig. 51. A comparison of local strains determined by (CBM) and (FEM) for the case of forging bars at feeding with a complex movement with a speed $v_p = 25$ mm/s

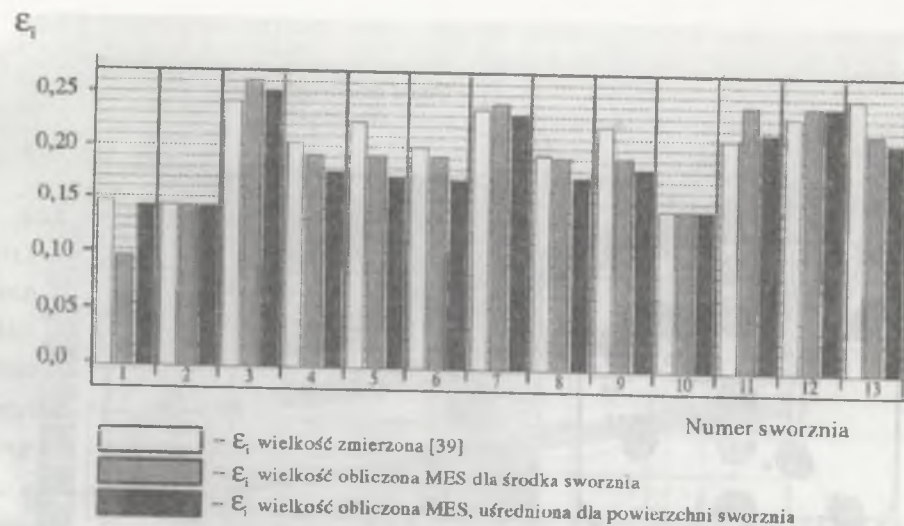
Dla prętów kutych według kalibrowania koło → koło ocenę odkształceń lokalnych na przekroju, ze względu na symetrię rozkładu odkształcenia lokalnego względem osi pręta, przeprowadzono analizując zmiany wzdłuż promienia. Jak stwierdzono w poprzednim rozdziale, opisany rozkład odkształceń lokalnych jest charakterystyczny dla kucia w kowarcie przy podawaniu materiału ruchem złożonym. Wyznaczone odkształcenia sworzni 1÷13, których początkowe rozmieszczenie przedstawiono na rys. 18, potwierdzają poprawność obliczeń symulujących. Praktycznie odkształcenia zmierzone, uwzględniając wielkość sworzni w odniesieniu do promienia pręta, mieszczą się w przedziale wartości odkształceń obliczonych (MES) (rys. 50 oraz 51).

Jak stwierdzono uprzednio, podawanie materiału ruchem prostym powoduje, że odkształcenia lokalne na przekroju pręta wykazują zróżnicowanie zarówno na promieniu, jak i w kierunku obwodu. Celem sprawdzenia wyników obliczeń przy podawaniu materiału ruchem prostym, przeprowadzono odpowiednie próby weryfikujące. Rozkład intensywności odkształceń lokalnych, obliczony w wyniku symulacji kucia pręta w jednym przepuszczeniu według kalibrowania koło → kwadrat, przedstawiono na rys. 52. Na rys. 52 a przedstawiono rozmieszczenie oraz kształt sworzni na przekroju pręta o początkowej średnicy $\phi 153,2$ mm po kuciu gniosem $\Delta h = 23,2$ mm. Symulowany charakter płynięcia metalu przedstawiony na rys. 52 b zdają się potwierdzać otrzymane w próbach kucia prętów składanych [39] zróżnicowane, zależne od miejsca położenia na przekroju pręta, kształty przekrojów sworzni.

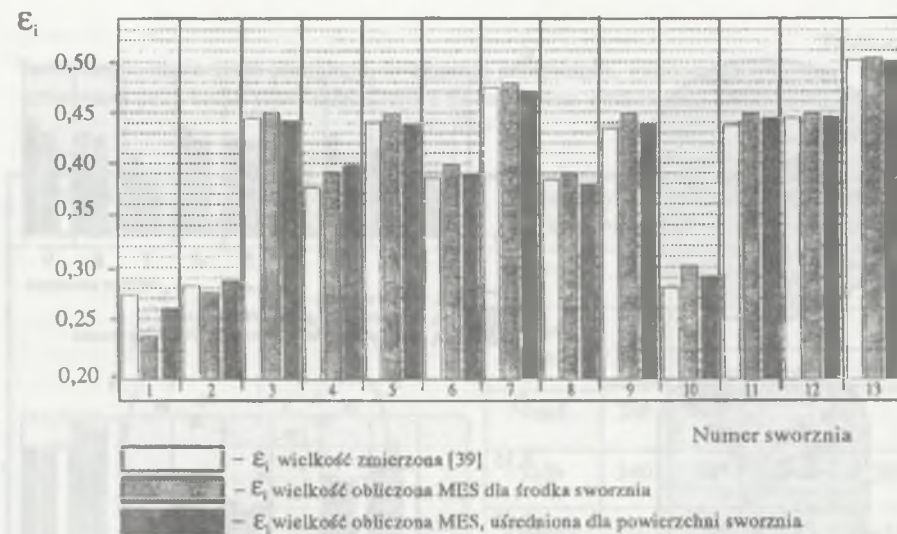


Rys. 52. Rozkład odkształceń lokalnych przy kuciu według kalibrowania koło → kwadrat:
 a) rozmieszczenie oraz kształt sworzni na przekroju pręta kwadratowego, b) symulowany rozkład intensywności odkształceń lokalnych
 Fig. 52. The distribution of local strains at forging according to circle → square sizing scheme: a) the location and shape of pins on the cross-section of a square bar, b) a simulated distribution of local strains' intensity

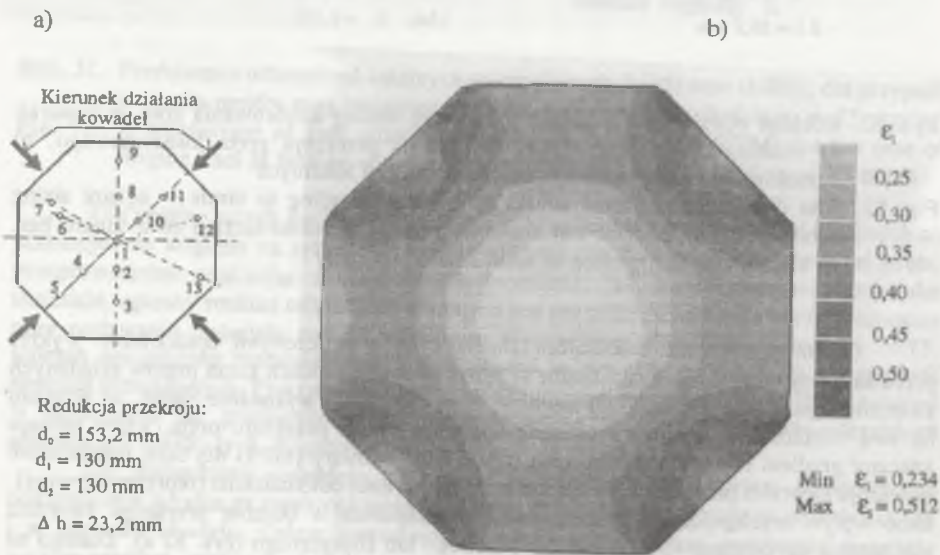
Celem porównania odkształceń zmierzonych z obliczonymi opracowano wykres przedstawiony na rys. 53. Zastosowane w przemysłowych próbach kucia prętów składanych sworznie o możliwie najmniejszej średnicy, pozwalającej na wykonanie badań, ze względu na swą wielkość, w wielu przypadkach obejmują obszar przekroju pręta, który cechuje znaczny gradient odkształceń lokalnych (rys. 52 b). Pomiary (MPS) dla całej powierzchni przekroju sworzni pozwalają na wyznaczenie jednej wartości odkształcenia (reprezentatywnej), choć wpływ występującego zróżnicowania odkształcenia w obrębie przekroju sworzni uwidacznia się odstępstwem od kształtu kołowego lub eliptycznego (rys. 52 a). Dlatego na wykresie (rys. 52) wraz z wynikami pomiarów, dla wartości wyznaczonych (MES) podano odkształcenia dla współrzędnych środka sworzni oraz średnią wartość odkształcenia dla powierzchni zajmowanej przez sworznie. Odpowiednie wykresy dotyczące weryfikacji wyników symulacji procesu kucia w kolejno po sobie następujących przepustach przy podawaniu tylko ruchem prostym przedstawiono na rys. 54 oraz 55.



Rys. 53. Porównanie wyników intensywności odkształceń lokalnych zmierzonych oraz obliczonych (rys. 52) dla kucia według kalibrowania koło → kwadrat
 Fig. 53. A comparison of results of local strains' intensity measured and calculated (Fig. 52) for forging according to circle → square sizing scheme



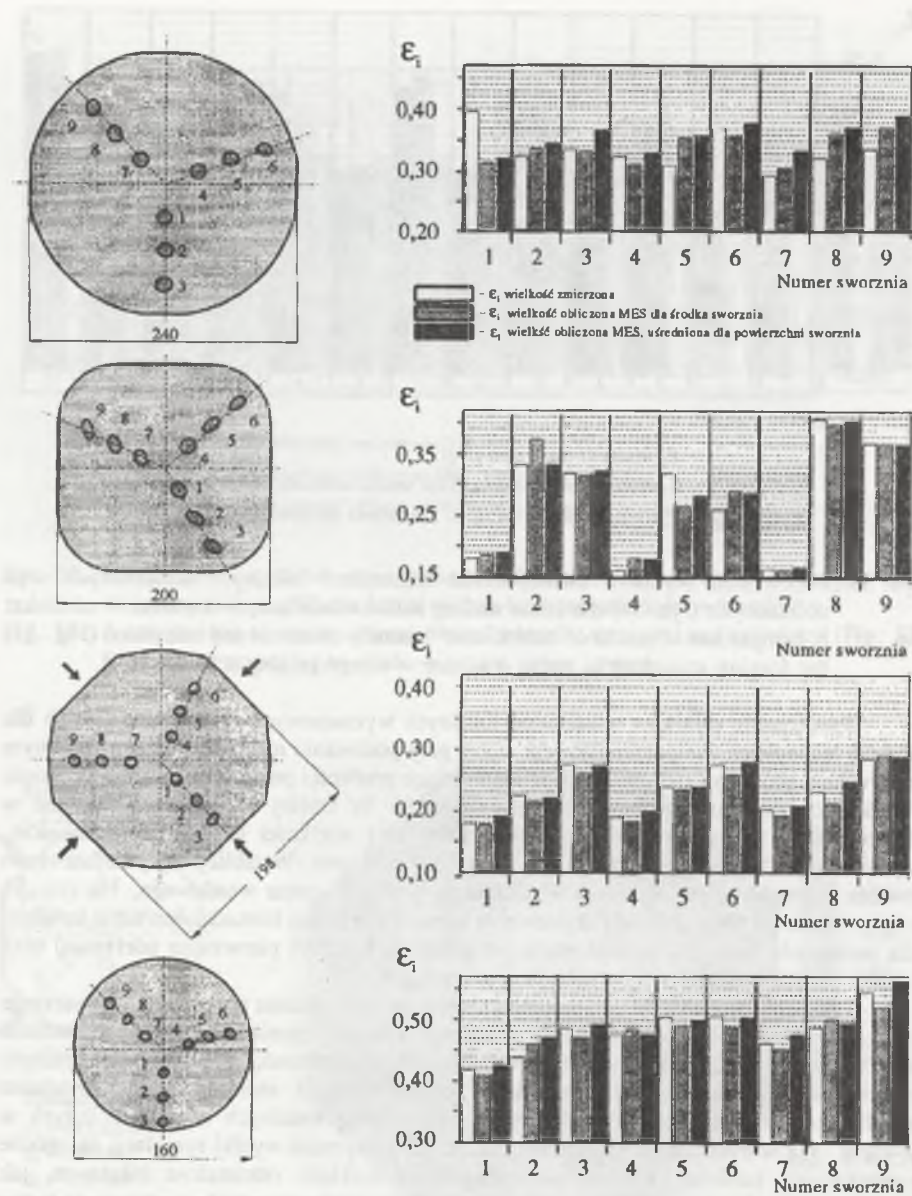
Rys. 55. Porównanie wyników intensywności odkształceń lokalnych zmierzonych oraz obliczonych (rys. 54) dla kucia według kalibrowania koło → kwadrat → ośmiokąt
 Fig. 55. A comparison of results of local strains' intensity measured and calculated (Fig. 54) for forging according to circle → square → octagon sizing scheme



Rys. 54. Rozkład odkształceń lokalnych przy kuciu według kalibrowania koło → kwadrat → ośmiokąt: a) rozmieszczenie sworzni na przekroju pręta po kuciu, b) symulowany rozkład intensywności odkształceń lokalnych
 Fig. 54. The distribution of local strains at forging according to circle → square → octagon sizing scheme: a) the location of pins on the cross-section of the bar after forging, b) a simulated distribution of local strains' intensity

Porównanie wyników odkształceń lokalnych wyznaczonych (MPS) oraz (MES) dla typowej technologii wieloprzepustowego kucia przy podawaniu materiału ruchem złożonym oraz ruchem prostym i zróżnicowanych wielkościach prędkości podawania i wielkości gniotu w kolejnych przepustach przedstawiono na rys. 56. W tablicy 12 podano stosowane w obliczeniach i próbach ruchowych kalibrowanie oraz wielkości gniotów w przepuście, odpowiadające typowej technologii kucia stali narzędziowej. W tablicy tej przedstawiono również początkowe rozmieszczenie sworzni na przekroju pręta wsadowego. Na rys. 55 kolejne przekroje pręta pokazują usytuowanie sworzni względem kierunku uderzenia kowadeł (dla podawania materiału ruchem złożonym pokazano kierunek pierwszego uderzenia) oraz kształty przekrojów sworzni po kolejnych przepustach.

Zastosowany sposób termomechanicznej symulacji procesu pozwala na wyznaczenie w skali makro lokalnych wartości charakteryzujących płynięcie metalu w kotlinie odkształcenia. W analizowanych przypadkach nie stwierdzono, istotnych dla praktyki inżynierskiej, różnic pomiędzy wynikami pomiarów oraz obliczeń. Przeprowadzona weryfikacja potwierdza poprawność symulacji odkształceń lokalnych w prętach kutyh w kowarce. We wszystkich badaniach weryfikujących otrzymane wyniki symulacji są zgodne z pomiarami, zarówno pod względem charakteru rozkładu odkształceń lokalnych, jak i samych wielkości odkształcenia lokalnego. Wynik ten pozwala sądzić, iż obliczenia będąc zgodne w badanych przekrojach w obszarze samych sworzni, są również zgodne z obiektem rzeczywistym w całej kotlinie odkształcenia. Na podstawie pozytywnych rezultatów porównania wyników obliczeń z wynikami pomiarów odkształceń lokalnych określonych metodą prętów składanych można sformułować wniosek, że termomechaniczna symulacja (MES) procesu kucia w kowarce do wstępnego przerobu, na bazie opracowanego modelu, pozwala na poprawne określenie schematu płynięcia metalu dla stosowanych w praktyce przemysłowej technologicznych warunków realizacji procesu.



Rys. 56. Porównanie wielkości odkształceń lokalnych zmierzonych (MPS) [41, 43÷45] oraz obliczonych (MES) dla typowej technologii kucia stali narzędziowych, według kalibrowania koło → kwadrat → ośmiokąt → koło

Fig. 56. A comparison of local strains' magnitude measured (CBM) [41, 43÷45] and calculated (FEM) for a typical technology of tool-steels forging, according to circle → square → octagon → circle sizing scheme

Tablica 12

Technologia kucia pręta okrągłego, w czterech przepustach, gniotem $\Delta h=40$ mm, stosowana przy kuciu pręta składanego z dziewięcioma wzdłużnymi sworzniami [41, 43÷45]

Początkowe rozmieszczenie sworzni na przekroju pręta składanego	Parametry kucia według kalibrowania koło → kwadrat → ośmiokąt → koło				
	$\Delta h=40$	d	v_p	ϵ_p	$\Sigma \epsilon_p$
	Kalibrowanie	mm	$\frac{\text{mm}}{\text{s}}$	-	-
	wsad	280			
	koło	240	50	0,308	0,308
	kwadrat	200	100	0,173	0,481
	ośmiokąt	200	100	0,138	0,619
koło	160	50	0,500	1,119	

7. PRAKTYCZNE MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA WYNIKÓW SYMULACJI W PROJEKTOWANIU TECHNOLOGII PROCESU KOWARKOWEGO

Przedstawiona koncepcja zastosowania metody elementów skończonych dla zagadnień osiowosymetrycznych, do modelowania kucia w kowarce przy podawaniu materiału ruchem prostym oraz ruchem złożonym, pozwala na wyznaczenie podstawowych charakterystyk rozkładu naprężenia, prędkości odkształcenia, intensywności odkształceń lokalnych, prędkości przemieszczeń metalu oraz temperatury pasma. Należy jednak pamiętać, iż jest to pewne przybliżenie stanu rzeczywistego. Opracowana metoda nie daje możliwości wyznaczenia położenia płaszczyzny podziałowej w kotlinie odkształcenia i wyznaczenia związanych z tym różnic stanu naprężenia po obu stronach tej płaszczyzny. Uproszczona jest również analiza stanu mechanicznego w płaszczyznach wejścia oraz wyjścia kotliny odkształcenia, gdyż nie uwzględnia wpływu swobodnych końców pręta, w tym strefy kalibrującej. Wyznaczona w obliczeniach numerycznych charakterystyka stanu mechanicznego, choć zawiera wymienione uproszczenia, pozwala analizować występujące w kotlinie odkształcenia zmiany, stwarzając podstawy racjonalnego doboru technologii kucia z uwzględnieniem:

- założonego rozkładu odkształceń lokalnych, celem takiego oddziaływania na strukturę materiału, aby otrzymać produkt o szczególnej jakości,
- analizy naprężeń, celem zaprojektowania procesu technologicznie bezpiecznego.

Wymienione zagadnienia sprowadzają się do określenia relacji stan mechaniczny kotliny odkształcenia - technologiczne parametry kucia. Mając na względzie wymienione potrzeby w zakresie projektowania procesu kowarkowego, w niniejszym rozdziale przedstawiono praktyczne wykorzystanie wyników termomechanicznej symulacji do budowy programu komputerowego wspomagania projektowania technologii kucia. W tym zakresie symulacja i analiza procesu kowarkowego mogą być prowadzone w celu zaprojektowania technologii kucia, jak i w celu budowy prostych modeli empiryczno-teoretycznych, do wykorzystania podczas szybkich obliczeń projektowych i zaprojektowania technologii bez długotrwałych obliczeń termomechanicznej symulacji (MES).

7.1. Sterowanie rozkładem odkształceń lokalnych w odkutych prętach

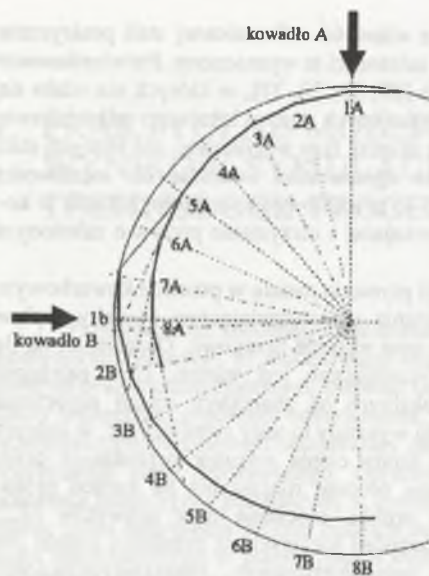
Symulacja procesu kucia (MES) na bazie opracowanego modelu procesu kowarkowego daje możliwości prowadzenia badań, których ze względów technicznych, a także ekonomicznych nie można przeprowadzić na obiekcie rzeczywistym. Podstawowym przykładem są badania wpływu parametrów technologicznych procesu kowarkowego na kinetykę płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, celem określenia naprężeniowych oraz odkształceniowych warunków kształtowania struktury kutej pręta. Prowadzenie tego typu analiz technologicznych na bazie uniwersalnych zależności empirycznych wyznaczonych (MPS) jest

ograniczone głównie, z uwagi na charakterystykę własności odkształcanej stali praktycznie do warunków kucia oraz gatunku stali dla których zależności te wyznaczono. Potwierdzeniem tego są wnioski z badań zawartych w publikacjach [29, 31, 32, 37], w których nie udało się stwierdzić słuszności związków (13) oraz (14), opisujących wpływ lokalnego odkształcenia na zmianę wielkości pojedynczych węglików oraz skupisk fazy węglkowej, dla różnych stali narzędziowych. Z faktu tego wynikają również ograniczenia odnośnie do możliwości wykorzystania empirycznych związków (1) ÷ (3) do projektowania technologii kucia w kowarce, dającej produkt o szczególnej jakości, wynikającej z otrzymania prętów o założonym rozkładzie odkształceń lokalnych na przekroju.

Przedstawione w rozdz. 6 wyniki symulacji płynięcia metalu w procesie kowarkowym wykazały, że na wynik obliczeń prócz naprężenia uplastyczniającego znaczny wpływ wywierają warunki kinematyczne, geometryczne oraz warunki brzegowe. Określenie, na ile istotny jest wpływ samego naprężenia uplastyczniającego jest trudne, choć zależność wielkości i charakteru rozkładu odkształceń lokalnych od charakteru zmian naprężenia uplastyczniającego jest niezaprzeczalna. Pośrednio wykazały to testy symulacyjne, w których celem eliminacji wpływu tarcia oraz wpływu utraty ciepła wskutek ochładzania przez powietrze i narzędzia przeprowadzono symulację procesu rozciągania na gorąco próbki okrągłej, przy założeniu równości temperatur próbki, otoczenia oraz uchwytów [82]. Otrzymane zróżnicowanie temperatury oraz odkształceń lokalnych na przekroju próbki jest w tym wypadku skutkiem zmian naprężenia uplastyczniającego, charakteryzującego odkształcany materiał i wynika z równania konstytutywnego przyjętego modelu umocnienia. Innymi słowy, zróżnicowanie odkształceń, pomijając geometryczną przyczynę, jest wynikiem eksponowania zmian naprężenia uplastyczniającego, którego charakter zmian determinują zmiany wywołane umocnieniem odkształceniowym i procesami usuwania jego skutków, natomiast intensywność zmian zależy od warunków technologicznych procesu. Przy kuciu w kowarce owa przyczyna wynikająca z warunków geometrycznych i kinematycznych określa specyfikę tego procesu, jednoznacznie wpływając na schemat naprężenia w kotlinie odkształcenia i rozkłady odkształceń lokalnych w odkutych prętach. Jednocześnie końcowe zróżnicowanie odkształceń na przekroju prętów kutej w kowarce jest wynikiem kumulowania skutków kolejno po sobie następujących uderzeń kowadeł.

Przy podawaniu materiału ruchem prostym, ponieważ stałą jest orientacja pręta względem kowadeł, wzdłuż kotliny odkształcenia zmienia się jedynie kąt opasania materiału kowadłami. W kolejnych pojedynczych uderzeniach wielkość gniotu jest stała, równomierna na szerokości w danym przekroju, co powoduje, iż wzdłuż kotliny odkształcenia wzrasta wielkość redukcji przekroju proporcjonalnie do szerokości ogniska odkształcenia, jak pokazano na wykresie rys. 30 b. Końcowy rozkład odkształceń lokalnych, pokazany na rys. 32, 35, 52, 54, jest właśnie wynikiem omówionego sposobu narastania odkształcenia.

Przy podawaniu materiału ruchem złożonym wskutek obrotu pręta w kolejnych podaniach, zmianie ulega zarówno orientacja poszczególnych punktów przekroju kutej pręta względem kowadeł, jak i wielkość redukcji analizowanego przekroju. Pomijając pierwsze uderzenie kowadeł, gniot pojedynczy jest ponadto nierównomierny na szerokości. Odpowiednio do wymienionych przyczyn, zmianie ulega wielkość redukcji kolejnych przekrojów wzdłuż kotliny odkształcenia, jak pokazano na wykresie rys. 29. Celem określenia sposobu narastania odkształceń lokalnych w prętach okrągłych, pomiędzy stanem w płaszczyźnie wejścia pokazanym na rys. 34 a a rozkładem w płaszczyźnie wyjścia pokazanym na rys. 34 c, przeprowadzono analizę wyników symulacji kucia przy podawaniu materiału ruchem złożonym. Ponieważ dla tego typu kalibrowania końcowy rozkład odkształceń lokalnych jest symetryczny względem osi pręta, szczegółowej analizie poddano zmiany występujące wzdłuż wybranego promienia na przekroju pręta, w trakcie przejścia przez kotlinę odkształcenia.

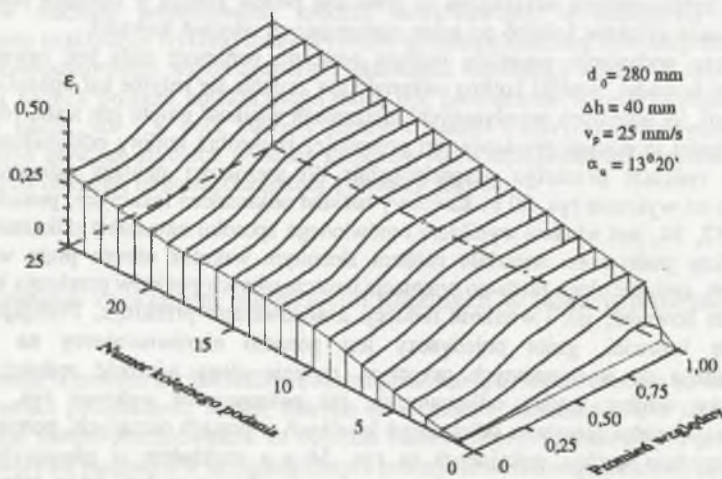


Orientację wybranego promienia względem dwóch kowadła A i B, w kolejnych uderzeniach, do momentu gdy kowadło kolejne trafia na ślad kowadła poprzedzającego przedstawiono, schematycznie na rys. 57.

Rys. 57. Położenia analizowanego promienia względem kowadła A i B w kolejnych podaniach materiału

Fig. 57. The situation of the analysed radius in respect to anvils A and B in consecutive feeds of the material

Narastanie odkształceń wzdłuż wybranego promienia podczas przejścia analizowanego przekroju przez kotłinę odkształcenia przedstawiono na rys. 58. W obliczeniach symulujących zastosowano małą prędkość podawania $v_p = 25$ mm/s celem pokazania sposobu narastania odkształceń w poszczególnych punktach przekroju, gdy sposób kucia prowadzi do uzyskania znacznego zróżnicowania odkształceń pomiędzy rdzeniem a warstwami zewnętrznymi pręta.



Rys. 58. Zmiany rozkładu odkształceń lokalnych wzdłuż analizowanego promienia w kolejnych podaniach materiału

Fig. 58. Changes of local strains' distribution along the analysed radius in consecutive feeds of the material

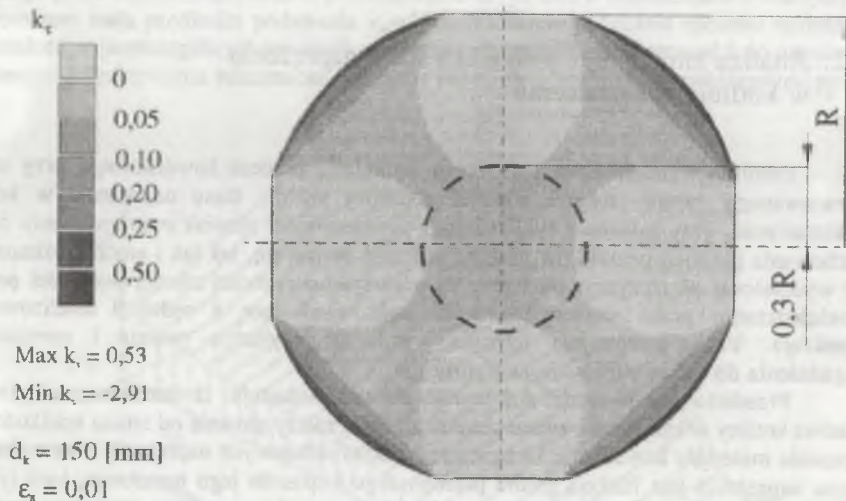
Pokazane na rys. 58 zmiany odkształceń lokalnych w poszczególnych podaniach pręta są wynikiem kompleksowego ujęcia wpływu warunków obliczeń wprowadzonych do modelu procesu kowarkowego. Wynik symulacji wskazuje ponadto, jak poprzez dobór parametrów kucia możliwe jest osiągnięcie zamierzonych rozkładów odkształceń lokalnych, co daje podstawy do sterowania jakością struktury i dalej poziomem własności wyrobu. Wzmacnia również tezę pracy w części dotyczącej możliwości modelowania związków pomiędzy wielkością i rozkładem odkształceń lokalnych, schematem mechanicznym odkształcania, warunkami technologicznymi procesu kucia w kowarce oraz charakterystyką odkształcanego metalu. Z badań tych należy również wyciągnąć wniosek odnośnie do konieczności wprowadzania do obliczeń rzeczywistej charakterystyki materiału, opisującej jego zachowanie podczas procesu. Dobór funkcji umocnienia wymaga szczególnej staranności, ze względu na badania zmian lokalnych, których wynikiem jest zarówno nierównomierność odkształceń, jak i zróżnicowanie temperatury pasma w strefie odkształcenia. Dlatego nowego spojrzenia wymaga również interpretacja wyników badań plastometrycznych, właśnie w aspekcie lokalnego zróżnicowania rzeczywistych parametrów testu. Jest to warunek poprawnego projektowania technologii procesu z uwzględnieniem zjawisk lokalnych. Wykorzystując wnioski wynikające z przeprowadzonej analizy, do programu projektowania wprowadzono opcje pozwalające przy wyznaczaniu możliwych wariantów odkształcania analizować powstawanie założonych rozkładów odkształceń lokalnych. Jednakże przy każdej tego typu analizie należy pamiętać, że jakość opisu obiektu rzeczywistego, w tym opisu własności reologicznych odkształcanego materiału, zależy od wprowadzonych do bazy danych parametrów oraz funkcji opisujących obiekt symulowany.

7.2. Analiza zmienności wskaźnika stanu naprężenia w kotłinie odkształcenia

Pomimo wymienionych uproszczeń, symulacja procesu kowarkowego przy użyciu opracowanego modelu stwarza również podstawy analizy stanu naprężenia w kotłinie odkształcenia. Przy założonej cykliczności i powtarzalności zjawisk oraz spełnieniu zasady zachowania płaskich przekrojów, analiza naprężeń odnosi się, tak jak i analiza odkształceń, do wydzielonej płaszczyzny, utożsamianej z warstwą o grubości równej wielkości posuwu powiększonego przez elementarne wydłużenie wynikające z redukcji analizowanego przekroju. Taka interpretacja fizyczna wynika z przyjętego modelu i uproszczenia zagadnienia do zadania osiowoosymetrycznego.

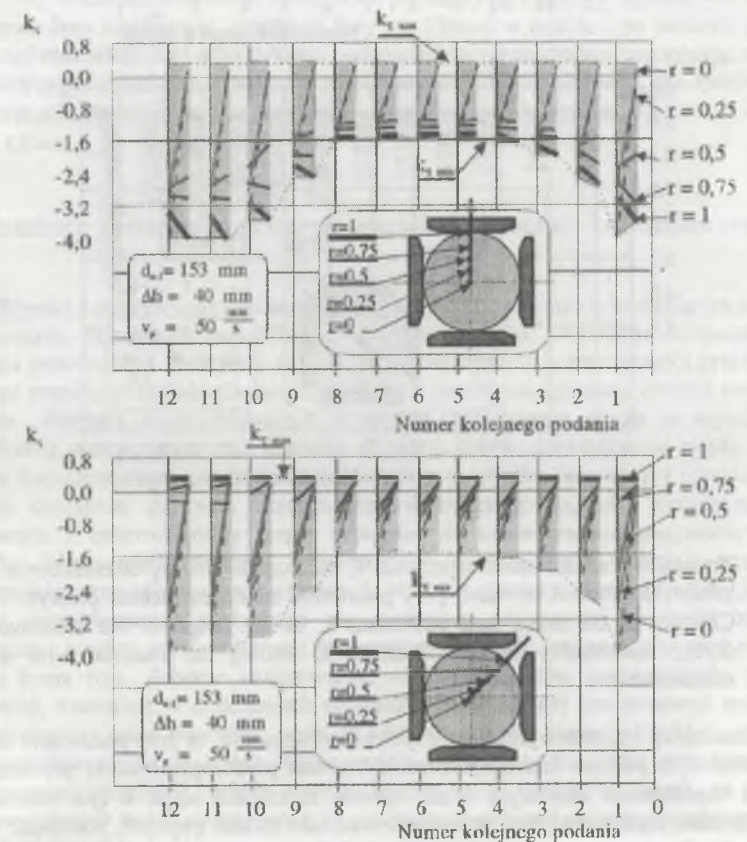
Przedstawione w rozdz. 6.2 wyniki obliczeń wskazują, iż charakter zachodzących wzdłuż kotłiny odkształcenia zmian stanu naprężenia zależy głównie od zmian wielkości kąta opasania materiału kowadłami. Oczywiście, rozkład składowych naprężeń oraz wskaźnika stanu naprężenia jest funkcją gniotu pojedynczego i sposobu jego narastania, lecz tylko w ramach pojedynczego uderzenia kowadła. W płaszczyźnie wejścia omawiane rozkłady zarówno przy podawaniu materiału ruchem prostym, jak i złożonym są takie same. Wzrost kąta opasania prowadzi do korzystnych z technologicznego punktu widzenia zmian schematu naprężenia, co potwierdzają wyniki zmian wskaźnika stanu naprężenia przedstawione na rys. 41 oraz 42. Jak już stwierdzono, przy podawaniu materiału ruchem prostym wzdłuż kotłiny odkształcenia kąt opasania wzrasta, zaś gniot pojedynczy jest równomierny na szerokości kowadła w kolejnych przekrojach - podaniach. W trakcie realizacji gniotu pojedynczego, prócz warstw w pobliżu płaszczyzny wejścia, nie ma fazy wgniatania kowadła w materiał przy małym kącie opasania, wywołującej naprężenia, jak pokazano na rys. 37 a,

przy niekorzystnym rozkładzie wskaźnika stanu naprężenia, jak pokazano na rys. 41 a oraz 42 a. Przy podawaniu materiału ruchem prostym można zatem przyjąć stwierdzenie, iż im dalej od płaszczyzny wejścia znajduje się w kotlinie odkształcenia analizowany przekrój, tym odkształcenie jest realizowane w bardziej korzystnym z technologicznego punktu widzenia stanie naprężeń. Występujące w kotlinie odkształcenia rozkłady wskaźnika stanu naprężenia są względem kowadeł symetryczne i można je analizować rozpatrując ósmą część przekroju pręta zawartą pomiędzy promieniem leżącym w osi działania kowadła oraz promieniem położonym symetrycznie pomiędzy kowadłami. Analizując kolejne wyniki symulacji procesu kucia przy podawaniu materiału ruchem prostym stwierdzono, że w płaszczyznach wydzielonych wzdłuż kotliny odkształcenia wskaźnik stanu naprężenia zmienia się od przedstawionego na rys. 41 dla posuwu 1 do pokazanego na tym samym rysunku dla posuwu 5, który można uznać za technologicznie bezpieczny. Podobne zmiany rozkładu wskaźnika stanu naprężenia, charakteryzujące zmiany wzdłuż kotliny odkształcenia, występują przy podawaniu materiału ruchem złożonym, z tym że szerokość strefy odkształcania (rys. 27) nie jest stale rosnąca, jak przy podawaniu materiału ruchem prostym. Ponadto gniot na szerokości jest nierównomierny i zależy od położenia analizowanego przekroju na długości kotliny odkształcenia (rys. 29), a jednocześnie każdy pojedynczy gniot obejmuje fazę punktowego styku kowadeł z materiałem i narastanie kąta opasania materiału kowadłami od zera (rys. 7). Z wymienionych powodów schematy naprężenia kotliny odkształcenia dla omawianych sposobów podawania materiału są odmienne. Jedynie wspólny dla obu sposobów podawania materiału jest rozkład wskaźnika stanu naprężenia w początkowej fazie wgniatania kowadeł w materiał, co pokazuje schemat na rys. 59.

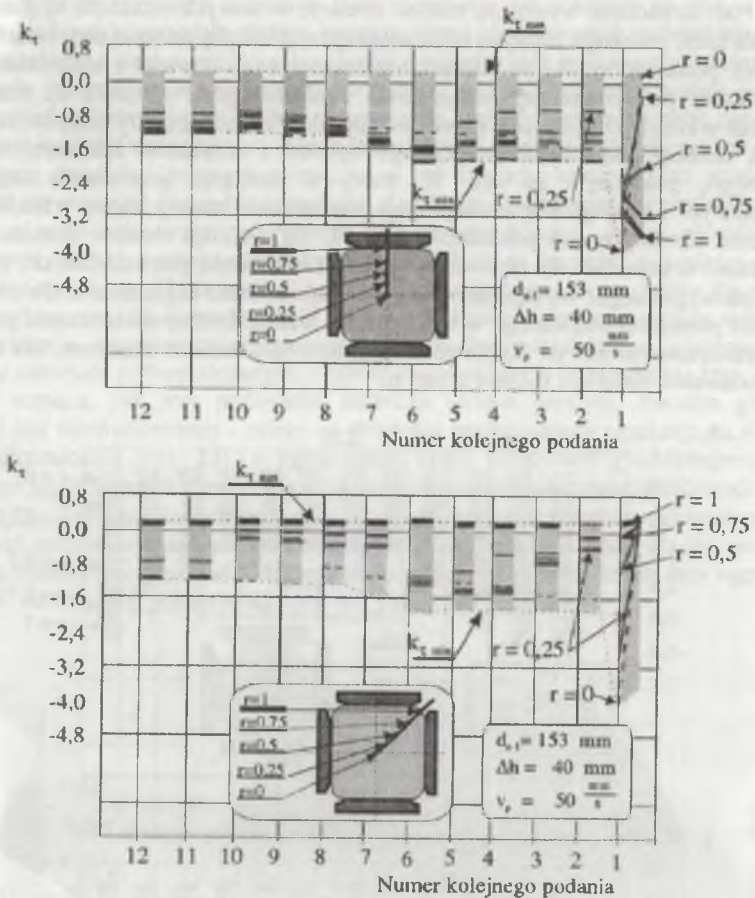


Rys. 59. Rozkład wskaźnika stanu naprężenia występujący w przekrojach wydzielonych wzdłuż kotliny odkształcenia przy kalibrowaniu koła → koło oraz w przekrojach leżących w pobliżu płaszczyzny wejścia przy podawaniu materiału ruchem prostym
Fig. 59. The distribution of stress state coefficient existing on cross-sections separated along the deformation gap at circle → circle sizing scheme and on cross-sections situated close to the entrance plane at feeding with a simple movement

Pod kowadłami występują zawsze obszary, w których wskaźnik k_t jest ujemny. Pozostała część przekroju pręta jest odkształcana przy dodatniej wartości tego wskaźnika. Dla kolejnych podań materiału, ze wzrostem szerokości styku kowadeł z materiałem wzrasta obszar strefy pod kowadłem, maleje strefa swobodna gdzie wskaźnik k_t jest dodatni. Natomiast w kolejnych podaniach z obrotem, uprzednio swobodne strefy przypowierzchniowe zajmują obszary pod kowadłami. Dlatego zgodnie z rozkładem składowej naprężenia wzdłużnego, pokazanym na rys. 39, strefy te podlegają przemiennie naprężeniom rozciągającym i ściskającym, co wywołuje odpowiednie zmiany znaku wskaźnika stanu naprężenia. Zmiany te, jak pokazano na rys. 59, nie obejmują obszaru rdzenia, który jak stwierdzono w badaniach dla stosowanych w analizie wielkości geometrycznych, wynosi 0,3 promienia względnego. Występujące zmiany wskaźnika stanu naprężenia k_t dla określonych wielkości promienia względnego w wydzielonych wzdłuż kotliny odkształcenia przekrojach pręta przedstawiono na rys. 60 dla podawania materiału ruchem złożonym, zaś na rys. 61 przy podawaniu materiału ruchem prostym.



Rys. 60. Zmiany wskaźnika stanu naprężenia k_t na długości kotliny odkształcenia podczas kolejnych uderzeń kowadeł, przy podawaniu materiału ruchem złożonym
Fig. 60. Changes of the stress state coefficient k_t on the length of the deformation gap during consecutive strokes of anvils at feeding the material with a complex movement



Rys. 61. Zmiany wskaźnika stanu naprężenia k_t na długości kotłiny odkształcenia podczas kolejnych uderzeń kowadeł, przy podawaniu materiału ruchem prostym

Fig. 61. Changes of the stress state coefficient k_t on the length of the deformation gap during consecutive strokes of anvils at feeding the material with a simple movement

Zasadniczy wniosek wynikający z tych badań wskazuje, że przy podawaniu materiału ruchem złożonym podczas każdego uderzenia kowadeł poszczególne strefy przekroju pręta podlegają naprężeniom zmiennym w taki sposób, że zmianie ulega w tych strefach znak wskaźnika stanu naprężenia. Przy podawaniu materiału ruchem prostym, pomijając warstwę przyległą do płaszczyzny wejścia, dodatni wskaźnik stanu naprężenia występuje jedynie w strefach przypowierzchniowej części swobodnej przekroju pręta, nie objętej kowadłami. Wynik ten uzasadnia wniosek o korzystnym wpływie tzw. przekuwania przez kwadrat na zamykanie wewnętrznych nieciągłości materiału. Podstawowym jednak typem kalibrowania przy kuciu prętów okrągłych są przepusty koło → koło i ten typ kalibrowania określa warunki kształtowania struktury odkutych prętów.

Przedstawione w pracach [33, 47, 117, 118] badania metalograficzne przeprowadzone dla kutek na gorąco prętów ze stali SW7MŻ i SNb2 wykazały bardzo duży wpływ stanu naprężenia, wyrażonego wskaźnikiem k_t , na przebieg rozdrobnienia fazy węglkowej w trakcie narastania odkształcenia plastycznego. Stwierdzono, że ze wzrostem odkształcenia lokalnego następuje istotne rozdrobnienie węglków oraz zmniejszenie wielkości ich skupisk w obydwu stalach, z tym że proces ten jest tym intensywniejszy, im większa jest początkowa wielkość węglków i ich skupisk oraz większa wartość wskaźnika stanu naprężenia. Opierając się na analizie rozkładu odkształceń oraz charakterystyce odpowiadających im stanów naprężenia wykonanej przy użyciu opracowanego modelu procesu kucia w kowarce opracowano [37, 47] zależności funkcyjne wyrażające wpływ odkształcenia i początkowej wielkości węglków oraz skupisk węglków na wielkość pojedynczych węglków i ich skupisk dla stref przekroju pręta różniących się znacznie schematem stanu naprężenia. Model wpływu odkształcenia na przebieg fragmentacji i ujednorodnienia fazy węglkowej został wykorzystany przy budowie programu wspomagania projektowania technologii kucia w kowarce [23, 25, 38]. Ustalenie ilościowych zależności pomiędzy parametrami opisującymi wielkość początkowej fazy węglkowej, wielkości fazy węglkowej w trakcie i po procesie przeróbki plastycznej oraz wielkością odkształcenia i odpowiadającym mu stanem naprężenia, stworzyło nową możliwość programu w zakresie projektowania technologii kucia, dla kolejnych stali szybkochnących zawierających w "miękkiej" osnowie "twarde" cząsteczki.

7.3. Przebieg zmian temperatury materiału w procesie kowarkowym

Wyniki numerycznej symulacji kucia wykorzystano również w budowanym programie projektowania technologii do oszacowania obciążenia oraz określenia temperatury w czasie przebiegu procesu [72]. Jednym z modeli współdecydujących o poprawności projektowania przebiegu procesu przeróbki plastycznej na gorąco jest model opisujący zmiany temperatury materiału. Podczas kucia równolegle występuje generowanie ciepła w wyniku pracy odkształcenia plastycznego oraz działania sił tarcia, jak i odprowadzanie ciepła w strefie kontaktu kształtowanego metalu z narzędziem oraz w wyniku konwekcji i promieniowania ciepła do otoczenia. Zarówno nierównomierność odkształcenia, jak i zmiany warunków generowania i odprowadzania ciepła prowadzą do zróżnicowania temperatury kutego materiału. Wyznaczenie rozkładu temperatury w odkształcanym materiale wiąże się z koniecznością prowadzenia czasochłonnych obliczeń numerycznych. Trudno jednak w procesie projektowania, posługiwać się szeregiem zmiennych w czasie rozkładów temperatury. Analiza zmienności pola temperatury materiału jest pomocna przy określaniu sposobu kucia (tzn. doborze kalibrowania, wielkości gniotów pojedynczych, prędkości podawania), natomiast w obliczeniach projektowych wygodniej jest stosować temperaturę reprezentatywną, jedną dla całego pręta. W obliczeniach siły kucia i określaniu naprężenia uplastyczniającego jest to wręcz koniecznością. W celu wyznaczenia przydatnego przy projektowaniu technologii kucia w kowarce modelu zmian temperatury pręta, na podstawie przeprowadzonych badań ruchowych oraz wykonanych obliczeń symulacyjnych opracowano następujące wnioski:

- przy kuciu prętów według kalibrowania koło → koło, kwadrat → ośmiokąt oraz ośmiokąt → koło, temperatura powierzchni materiału w strefie odkształcenia wzrasta, natomiast przy kuciu według kalibrowania koło → kwadrat ulega zmniejszeniu,
- największy przyrost temperatury (do 30 °C) występuje przy kuciu według kalibrowania kwadrat → ośmiokąt, dla pozostałych przypadków przyrost ten wynosi około 10 ± 15 °C,

- zmniejszenie temperatury powierzchni pręta przy kuciu według kalibrowania koło → kwadrat wynosi około $10 \div 15 \text{ }^\circ\text{C}$ na jeden przepust,
- różnice temperatury pomiędzy końcami tego samego pręta, pomijalnie małe dla początkowych przepustów, sięgają $15 \div 20 \text{ }^\circ\text{C}$ w przepustach końcowych,
- zróżnicowanie temperatury prętów kutyh według tej samej technologii wynosi od $0 \div 20 \text{ }^\circ\text{C}$ i nie wykazuje określonej zależności od parametrów kucia,
- porównanie temperatury prętów kutyh według kalibrowania koło → koło, z temperaturą prętów okrągłych kutyh z zastosowaniem kalibrowania koło → kwadrat → ośmiokąt → koło wykazuje, że wielkość obniżenia temperatury pasma podczas kucia od wlewka do końcowej średnicy 120 mm jest dla obu wariantów kucia porównywalna, ponieważ znaczne obniżenie temperatury powierzchni pręta po przepuście koło → kwadrat rekompensowane jest zwiększonym przyrostem temperatury w następnym przepuście, który zawsze jest realizowany według kalibrowania kwadrat → ośmiokąt,
- obniżenie temperatury pręta podczas swobodnego stygnięcia pomiędzy kolejnymi przepustami zależy od czasu przebywania danej części poza strefą kucia i jest zależne od średnicy oraz długości pręta,
- zwiększenie gniotu lub prędkości odkształcenia prowadzi do zwiększenia przyrostu temperatury pasma w strefie kucia, podobne oddziaływanie wykazuje zwiększenie prędkości podawania, które równocześnie powoduje skrócenie czasu swobodnego stygnięcia pręta pomiędzy kolejnymi przepustami,
- przeprowadzone pomiary nie wykazały różnic charakterystyki zmian temperatury powierzchni prętów pomiędzy badanymi gatunkami stali,
- dla stosowanych przy kuciu warunków technologicznych obniżenie temperatury pręta podczas redukcji przekroju od wlewka do pręta średnicy 120 mm wynosi $120 \div 140 \text{ }^\circ\text{C}$,
- dla stosowanych w obliczeniach warunków technologicznych zmiany temperatury na przekroju poprzecznym pręta mieszczą się w przedziale $70 \text{ }^\circ\text{C}$, pomijając zaś powierzchnię pręta i najbardziej zachłodzone warstwy przypowierzchniowe, nie przekraczają $20 \text{ }^\circ\text{C}$,
- największe zróżnicowanie temperatury warstw wewnętrznych występuje po kuciu według kalibrowania kwadrat → ośmiokąt, najmniejsze po kuciu według schematu koło → koło,
- zachodzący podczas stygnięcia materiału między kolejnymi przepustami proces wymiany ciepła prowadzi do zmniejszenia zróżnicowania temperatury na obwodzie oraz wyrównania temperatury stref wewnętrznych objętych promieniem wynoszącym do 0,9 promienia względnego,
- różnica temperatur między powierzchnią a strefą rdzenia pręta, wynosząca dla początkowych przepustów do $40 \text{ }^\circ\text{C}$, w przepustach końcowych (przy kuciu prętów o średnicy 120 mm) wzrasta do $80 \text{ }^\circ\text{C}$, równocześnie pogrubieniu ulega warstwa przypowierzchniowa o największym gradiencie temperatury.

Wnioski te pozwoliły na przyjęcie następujących założeń istotnych dla budowy modelu zmian temperatury materiału w procesie kowarkowym:

- temperatura pasma jest to temperatura stref wewnętrznych pręta przed przepustem,
- granice przedziału zmian tej temperatury określa zakres symulowany (MES), zawarty pomiędzy najwyższą temperaturą na przekroju i najniższą na powierzchni pręta,
- dla przepustu pierwszego temperatura pasma odpowiada górnej granicy przedziału nagrzania wsadu, zaś dolną granicę przedziału stanowi temperatura powierzchni wlewka obniżona wskutek studzenia w czasie transportu z pieca do kowarki,
- dla przepustów kolejnych temperatura pasma jest obliczana na podstawie temperatury przepustu poprzedniego, powiększona o przyrost temperatury w strefie odkształcenia i pomniejszona o spadek temperatury wskutek studzenia między przepustami,

- zmiana temperatury w kotlinie odkształcenia zależy od systemu kalibrowania, wielkości gniotu w przepuście, prędkości podawania oraz od średnicy i temperatury pręta przed przepustem,
- spadek temperatury pasma wskutek studzenia między przepustami zależy od średnicy i długości pręta oraz od wielkości gniotu i prędkości podawania w przepuście poprzedzającym, które to wielkości określają czasy rozpoczęcia kolejnych przepustów,
- model dostosowany jest do określania temperatury kucia prętów okrągłych ze stali narzędziowych, według kalibrowania koło → kwadrat → ośmiokąt → koło oraz koło → koło,
- model nie uwzględnia zmian temperatury kowadeł i temperatury otoczenia.

Przedstawiona charakterystyka i założenia modelu zmian temperatury pasma określone zostały z uwzględnieniem parametrów technicznych kowarki typu SXL-40. Opracowany model temperaturowy [71, 72], oparty na funkcjach tablicowych, uzależnia zmiany temperatury reprezentatywnej od parametrów technologii kucia, tzn. temperatury nagrzewania, liczby przepustów, typu kalibrowania, wielkości gniotu w przepuście oraz długości początkowej pasma. Wprowadzony do programu projektowania model służy do wyznaczenia temperatury stosowanej w obliczeniach siły kucia oraz obliczania temperatur granicznych, służących do kontroli zakresu dopuszczalnych temperatur kucia.

8. PRZYJĘTE ZASADY OPRACOWANIA PROGRAMU WSPOMAGANIA PROJEKTOWANIA TECHNOLOGII KUCIA W KOWARCE

Zastosowanie komputerowego wspomaganie projektowania procesów technologicznych staje się powszechne i obejmuje coraz więcej dziedzin przemysłu i technologii. Warunkiem niezbędnym dla opracowania poprawnego programu komputerowego jest posiadanie matematycznego modelu opisującego zjawiska zachodzące podczas procesu w funkcji parametrów technologicznych. Poprawność matematycznego opisu zależy od zgodności przyjętych modeli z obiektem rzeczywistym i decyduje o jakości procesu modelowania. Stopień poprawności odwzorowania obiektu rzeczywistego zależy w głównej mierze od:

- przyjętej funkcji celu,
- stopnia poznania praw rządzących analizowanym procesem,
- możliwości otrzymania zadowalających rozwiązań dla sterowalnych parametrów procesu,
- możliwości przeprowadzenia weryfikacji obliczeń i optymalizacji rozwiązań przy użyciu danych wzorcowych (pomiarów).

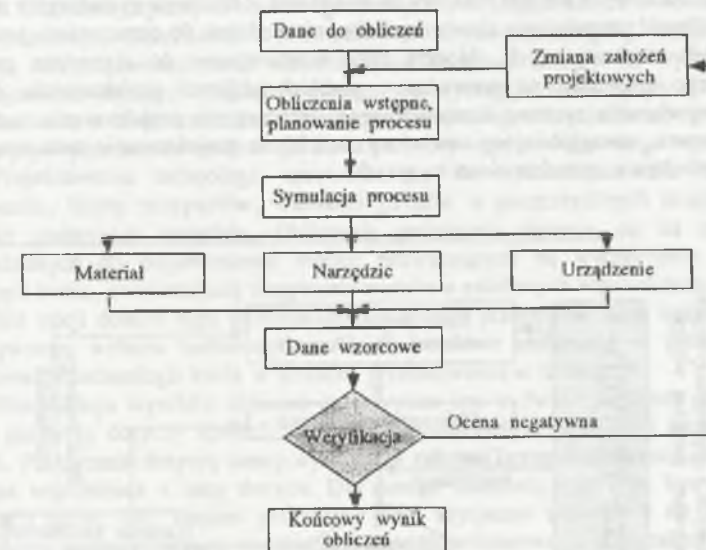
Prowadzenie weryfikacji obliczeń jest konieczne ze względu na występujące ograniczenia w procesach rzeczywistych oraz niedoskonałość uproszczonych rozwiązań modelowych.

W publikacjach [49, 111, 124] prezentowany jest pogląd, że dowolny proces przeróbki plastycznej należy rozpatrywać w aspekcie:

- przerabianego materiału,
- odkształcającego narzędzia,
- maszyny realizującej odkształcenia.

Podział ten porządkuje kryteria obliczeń projektowych i określa zakres weryfikacji wyników. Wyznacza również tok obliczeń oraz schemat programu projektowania technologii. Przyjęty dla programu projektowania podstawowy schemat przebiegu obliczeń przedstawiono na rys. 62. Schemat ten jest wielotorowy, zaś poszczególne tory obliczeń w algorytmie obliczeń projektowych mogą być stosowane wielokrotnie.

W procesach przeróbki plastycznej szereg zjawisk występuje równocześnie. Istotnego znaczenia nabiera czynnik czasu, zwłaszcza wówczas, gdy modelowany proces ma charakter niestacjonarny. W przypadku uproszczenia problemu do rozwiązań stacjonarnych, wpływ czasu uwzględniany jest jako czynnik chronologizacji obliczeń na tle ciągu procesu technologicznego [56]. Wielkości wejściowe oraz wielkości wyjściowe nie są funkcjami czasu, lecz odnoszą się do zmiennych w tej samej chwili [9]. Weryfikacja obliczeń stanowi w takim ujęciu próbę nadania rozwiązaniu statycznemu właściwości samodoskonalenia i przywracania właściwości modelu dynamicznego poprzez wprowadzenie do równań współczynników będących funkcjami czasu lub posiadających zdolność dostosowywania do aktualnego stanu procesu. Przyjęcie rozwiązania quasi-stacjonarnego oraz wprowadzenie możliwości samodoskonalenia procesu projektowania daje pozytywne rezultaty wówczas, gdy równolegle prowadzona jest analiza zjawisk występujących równocześnie oraz gdy uwzględniane są ewentualne wzajemne oddziaływania czynników aktywujących te zjawiska.



Rys. 62. Schemat komputerowego projektowania procesu technologicznego
Fig. 62. A diagram of computer designing of a technological process

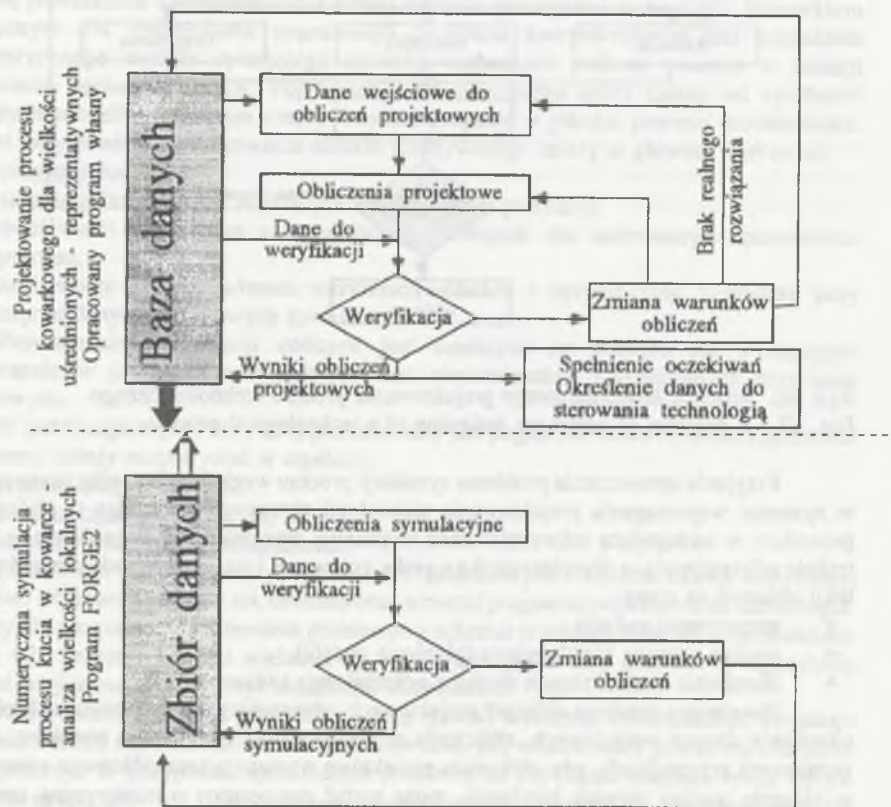
Przyjęcie uproszczenia problemu symulacji procesu względem czynnika czasu pozwala w systemie wspomaganie projektowania technologii zgrupować niezbędne w obliczeniach procedury w następującą sekwencję: dane wyjściowe oraz założenia początkowe → stan w trakcie odkształcenia → charakterystyka wyrobu gotowego, i na tej podstawie przyjąć podział toku obliczeń na etapy:

- rozpoznanie zadania,
- analiza procesu kształtowania (płynięcia metalu),
- określenie strukturalnych skutków odkształcenia (własności).

Zasadniczy przebieg obliczeń projektowych, obejmujący trzy podstawowe kroki, tzn.: określenie danych wejściowych, obliczenia projektowe oraz weryfikację wyników, w uzasadnionych przypadkach, gdy obliczenia projektowe wymagają szczegółowego rozwiązania w zakresie analizy zjawisk lokalnych, może zostać rozszerzony o numeryczną symulację procesu. Jest to sytuacja wyjątkowa, zaś jednym z czynników decydujących o konieczności przeprowadzenia takiej symulacji może być między innymi problem wyznaczania rozkładów: odkształceń lokalnych, naprężeń oraz temperatury na przekroju poprzecznym pręta, niezbędnych dla programu symulacji zmian struktury stali [22, 31, 43, 45, 78]. Dla tego typu obliczeń projektowych należy przeprowadzić termomechaniczną symulację procesu kowarkowego według przedstawionej metody.

W praktyce przemysłowej, dla ustalonego asortymentu, potrzeba prowadzenia obliczeń symulacyjnych w przypadku projektowania technologii procesu kowarkowego występuje sporadycznie, natomiast na etapie opracowywania programu projektowania oraz w procesie jego doskonalenia obliczenia takie są niezbędne, gdyż poza efektami ekonomicznymi wyini-

kającymi z prowadzenia badań symulacyjnych z pominięciem obiektu rzeczywistego, stwarzają często jedyną możliwość analizy procesu w zakresie, który w badaniach doświadczalnych oraz ruchowych nie jest możliwy do wykonania. Obliczenia symulacyjne stwarzają również możliwość uzupełnienia zbioru wyników, niezbędnych do opracowania prostych w formie modeli stochastycznych. Modele takie wprowadzone do algorytmu programu komputerowego pozwalają na prowadzenie szybkich obliczeń projektowych. Schemat przyjętego rozwiązania systemu komputerowego wspomaganie projektowania technologii kucia w kowarce, uwzględniający omówiony podział na projektowanie technologii oraz obliczenia symulujące, przedstawiono na rys. 63.



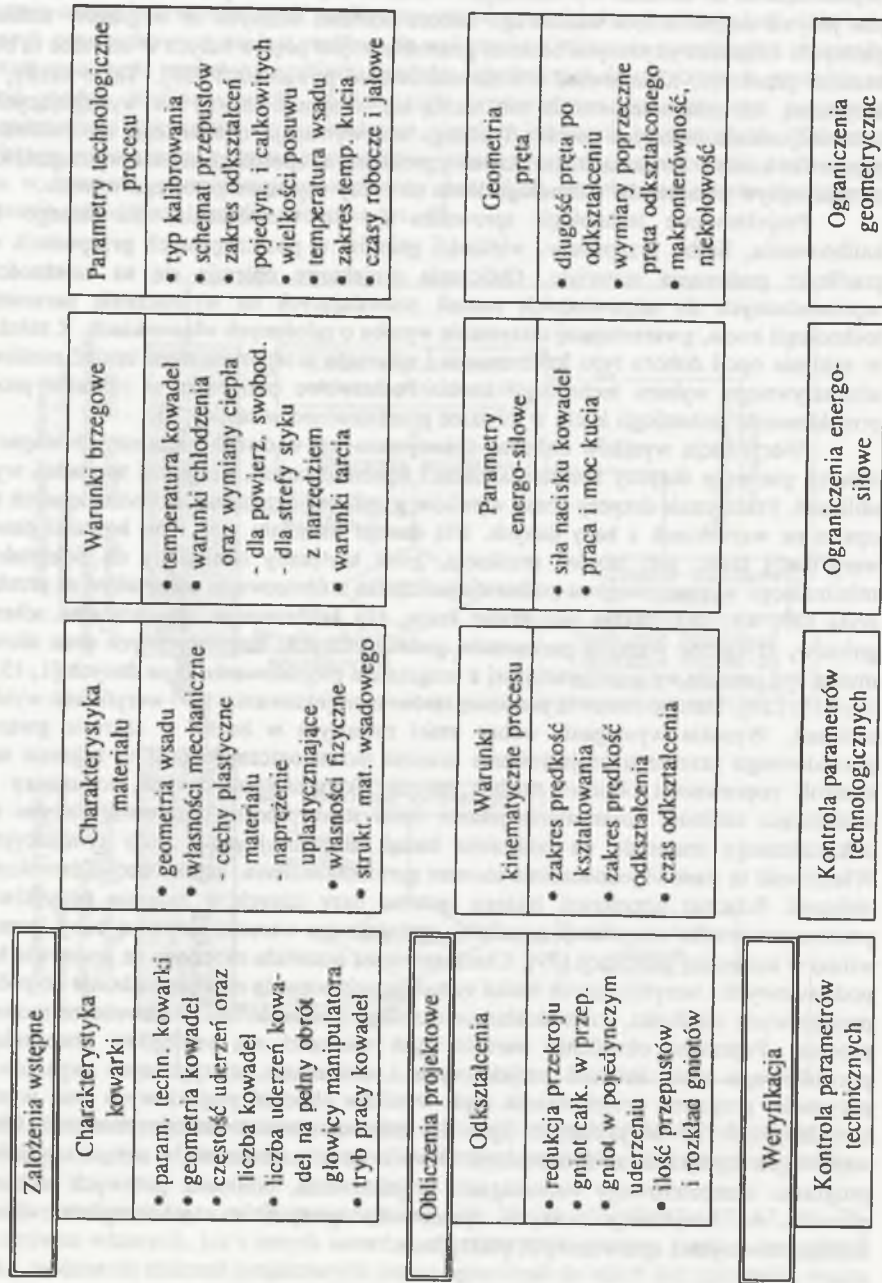
Rys. 63. Schemat projektowania oraz procesu symulacji technologii kucia w kowarce
Fig. 63. A diagram of designing process of the forging technology in a swaging machine

Z przedstawianej w wielu opracowaniach [26, 27, 34, 39, 40, 42÷45, 47, 66, 76, 79], zarówno własnych, jak i innych autorów, charakterystyki procesu kucia w kowarkach wynika, że dane do obliczeń projektowych można ograniczyć do takich jak: geometria wsadu i wyrobu, charakterystyka technologiczna odkształcanego materiału, wymagane własności oraz cechy użytkowe wyrobu. Niezbędne jest również określenie typu kowarki oraz typu kowadeł, co pozwala wprowadzić do obliczeń projektowych (na podstawie danych z bazy) niezbędne parametry techniczne urządzenia oraz wielkości geometryczne używanych kowadeł.

Wprowadzenie do obliczeń wymienionych wielkości nie stanowi problemu obliczeniowego, jest jedynie zagadnieniem właściwego doboru wartości realnych ze względów technologicznych. Charakterystycznymi cechami geometrycznymi prętów kutyh w kowarce są błędy kształtu przekroju, niekolowość i makronierówność powierzchni [39]. Takie cechy, jak krzywizna lub mikronierówność nie różnią się w sposób istotny od występujących w konwencjonalnie odkutych prętach i dlatego nie wymagają odmiennego ujmowania dla przypadku kucia w kowarkach. Podstawowy problem - to sposób określenia wymagań, które ujmują wpływ parametrów technologii kucia na cechy użytkowe gotowego wyrobu.

Projektowanie technologii sprowadza się do wyznaczenia, dla danego typu kalibrowania, liczby przepustów, wielkości gniotów w poszczególnych przepustach oraz prędkości podawania materiału. Obliczenia projektowe opierają się na zależnościach wprowadzonych do odpowiednich modeli pozwalających na wyznaczenie parametrów technologii kucia, gwarantującej otrzymanie wyrobu o założonych własnościach. Z założenia w zakresie opcji doboru typu kalibrowania i schematu przepustów musi istnieć możliwość alternatywnego wyboru technologii kucia. Podstawowe obliczenia w zakresie procesu projektowania technologii kucia w kowarce przedstawiono w tablicy 13.

Weryfikacja wyników obliczeń dokonywana jest w dwóch niezależnych etapach, z których pierwszy dotyczy kontroli wielkości wprowadzonych, drugi zaś sprawdza wyniki obliczeń. Praktycznie dotyczy oceny wyników w zakresie ograniczeń technologicznych i jest oparta na wartościach z bazy danych. Dla danego materiału oraz typu kowarki dane do weryfikacji takie, jak: stopień przekucia, gniot krytyczny odniesiony do odkształcenia minimalnego wyznaczonego na podstawie wskaźnika zróżnicowania odkształceń na przekroju pręta [39, 45, 78], zakres temperatur kucia, typ kalibrowania, dopuszczalne schematy gniotów, krytyczne wartości parametrów geometrycznych, kinematycznych oraz siłowych muszą być zawarte we współpracującej z programem projektowania bazie danych [1, 15, 18, 19, 115, 124]. Dane te stanowią podstawę zarówno projektowania, jak i weryfikacji wyników obliczeń. Wysokie wymagania wobec treści zawartych w bazie, w zakresie gwarancji prawidłowego przebiegu projektowania procesu technologicznego oraz w zakresie samokontroli poprawności obliczeń spełnia jedynie aktywna baza danych, to znaczy baza posiadająca zdolność doskonalenia jakości opisu stanu procesu oraz opisu danymi stanu odkształcanego materiału na podstawie badań laboratoryjnych i prób symulacyjnych. Właściwość ta stanowi jednocześnie element samodoskonalenia, autokorekcji i samokontroli obliczeń. Schemat organizacji takiego systemu bazy danych w zakresie pozyskiwania, przetwarzania oraz weryfikacji wyników, spełniającego warunki aktywnej bazy, przedstawiono w autorskiej publikacji [79]. Charakterystyka materiału określona na podstawie badań podstawowych i weryfikujących badań symulujących pozwala na wprowadzanie do obliczeń projektowych wielkości, które dokładnie określają stan materiału w dowolnym momencie procesu. Poprawne określenie wartości tych wielkości ma szczególne znaczenie dla prawidłowego toku obliczeń projektowych i otrzymania wiarygodnych wyników. W przypadku programu projektowania zapis wyników obliczeń projektowych oraz wyników symulacyjnych do bazy danych (rys. 63) stanowi element samodoskonalenia systemu wspomaganie projektowania technologii. Utworzenie w bazie danych, w okresie użytkowania programu komputerowego wspomaganie projektowania, biblioteki gotowych technologii pozwala na weryfikację nowych opracowań, opartych na technologiach wcześniej zaprojektowanych i sprawdzonych praktycznie.



9. PROGRAM PROJEKTOWANIA TECHNOLOGII KUCIA W KOWARCE

Elementem kompleksowej weryfikacji poprawności opracowanych modeli oraz założeń dokonanych przy ich budowie jest program komputerowego wspomaganie projektowania technologii. Opierając się na przyjętych założeniach metodologicznych (rozdz. 8), opracowano algorytm obliczeń projektowych i zbudowano program komputerowy. Do programu obliczeń projektowych wprowadzono zależności aproksymujące wyniki symulacji komputerowych procesu kowarkowego przeprowadzone przy użyciu przedstawionej metody. Poprzez takie rozwiązanie skracające czas obliczeń projektowych, program w obliczeniach uwzględnia wpływ parametrów procesu na cechy charakteryzujące kotlinę odkształcenia, lokalne parametry stanu naprężenia i odkształcenia, zmiany temperatury pasma, geometrie wyrobu oraz strukturę materiału. Podstawą programu wspomaganie projektowania technologii kucia w kowarce są dane przechowywane w bazie danych programu. Zawartość bazy danych ulega powiększaniu w miarę użytkowania programu i wprowadzania nowych danych przy projektowaniu kolejnych technologii.

Tok obliczeń projektowych obejmuje:

- wprowadzenie danych,
- weryfikację wprowadzonych i przyjętych wielkości,
- projektowanie technologii przy użyciu przyjętych modeli oraz przyjętych zależności opisujących proces,
- weryfikację parametrów technologii kucia,

Obliczenia projektowe, oprócz zależności wprowadzonych do odpowiednich modeli, wykorzystują różnego typu dane wprowadzone do bazy danych. Wśród typu danych wyróżniono:

- parametry, wskaźniki, współczynniki - o charakterze wielkości stałych,
- dane bieżące - wartości chwilowe, zmienne w trakcie projektowania,
- biblioteki gotowych technologii, które jako sprawdzone praktycznie pozwalają na weryfikację technologii nowo projektowanych.

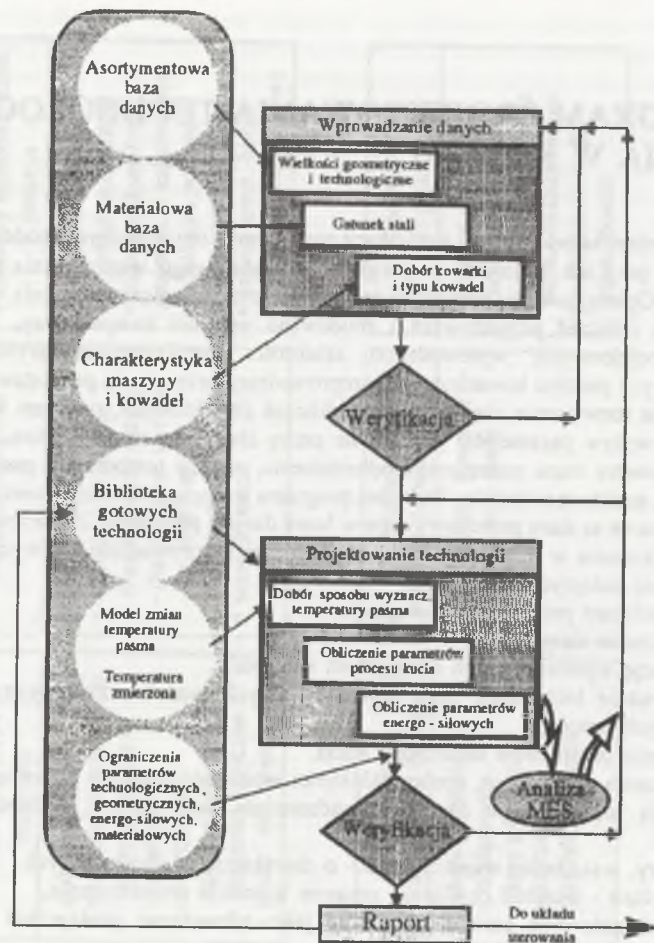
Schemat algorytmu obliczeń projektowych przedstawiono na rys. 64.

Zastosowane w programie komputerowego wspomaganie projektowania modele ujmują wpływ zadanych parametrów procesu na przebieg i efekt procesu. Wśród parametrów zadawanych wydzielono grupę parametrów stałych, takich jak:

- 1) częstość uderzeń kowadła,
- 2) czas pełnego obrotu głowicy manipulatora,
- 3) cechy geometryczne roboczej powierzchni kowadła,
 - kąt pochylenia roboczej części kowadła,
 - promień krzywizny powierzchni kalibrującej,
 - długość części kalibrującej kowadła,

oraz grupę parametrów regulowanych, obejmującą:

- 1) wielkość gniotu w przepuście,
- 2) prędkość podawania materiału,
- 3) sposób podawania materiału (ruch prosty lub złożony),
- 4) sposób kalibrowania (koło → koło, koło → kwadrat → ośmiokąt → koło).



Rys. 64. Schemat algorytmu programu projektowania technologii kucia w kowarce
 Fig. 64. A diagram of a software algorithm for designing the forging technology in a swaging machine

W trakcie obliczeń stan bieżący oraz przebieg i efekty kucia prętów w kowarce kontrolowany jest chwilowymi wielkościami charakteryzującymi:

- geometryczne i kinematyczne cechy kotliny odkształcenia,
- rozkład lokalnych odkształceń w kutyim pręcie,
- zmienność temperatury prętów,
- siłę i moc kucia,
- zmiany wewnętrznych nieciągłości materiału,
- wpływ odkształcenia na strukturę materiału,
- geometrię odkształconych prętów,
- ograniczenie procesu kucia ze względu na dopuszczalne parametry geometryczne, energo-siłowe, kinematyczne oraz temperaturę pręta.

Wzory do obliczania parametrów charakteryzujących geometryczne i kinematyczne cechy kotliny odkształcenia, takie jak:

- wielkość podania materiału między kolejnymi uderzeniami,
- kąt obrotu między kolejnymi uderzeniami kowadeł,
- stopień przylegania,
- długość i szerokość strefy odkształcenia oraz kąt pochylenia powierzchni roboczych kowadła,
- geometria wsadu i wyrobu,
- gniot wywołany pojedynczym uderzeniem kowadeł oraz całkowity gniot w przepuście, podano w tablicach 1 ÷ 3.

Rozkład lokalnych odkształceń w gotowym pręcie okrągłym w programie projektowania opisują zależności (1) ÷ (3). Zależności te są stosowane zarówno w przypadku kalibrowania jedynie według schematu koło → koło jak i koło → kwadrat → ośmiokąt → koło. Założenie to przyjęto na podstawie analizy wyników płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, otrzymanych przy symulacji typowych technologii kucia (rozdz. 7.2). Natomiast dla końcowych przepustów według kalibrowania koło → kwadrat i kwadrat → ośmiokąt, zwłaszcza kucia kwadratu o ostrych narożach, rozkład lokalnych odkształceń, w programie projektowania, opisany jest funkcją:

$$\varepsilon_{(r, \vartheta)} = a_0 + a_1 r + a_2 \vartheta + a_3 r^2 + a_4 \vartheta^2 + a_5 r^3 + a_6 \vartheta^3 + a_7 r \cdot \vartheta \quad (33)$$

wyznaczoną na podstawie badań eksperymentalnych [39]. Współczynniki zawarte w empirycznych zależnościach (1 ÷ 3, 33) określone są na podstawie pomiarów rozkładów odkształceń metodą prętów składanych [39] oraz wyników symulacji numerycznej procesu płynięcia metalu metodą elementów skończonych. Wartości tych współczynników ujęte są w bazie danych. W przypadku gdy obliczenia projektowe wymagają szczegółowych rozwiązań w zakresie przebiegu odkształcenia w funkcji warunków technologicznych kucia lub gdy brak jest informacji dla danej stali w bazie danych, należy przeprowadzić obliczenia przy użyciu opracowanego modelu symulacji procesu kowarkowego.

Temperatura kutech prętów obliczana jest na podstawie modelu temperaturowego. W obliczeniach projektowych stosowana jest temperatura reprezentatywna, średnia dla całego pasma. Mając na uwadze niedoskonałość metody określania temperatury pasma, w programie przewidziano możliwość wprowadzenia temperatury skorygowanej na podstawie: wartości z biblioteki technologii zawartych w bazie danych, informacji z praktyki przemysłowej lub też pomiaru. Podobnie jak w przypadku obliczeń rozkładów odkształceń lokalnych w kutech prętach, wyznaczenie rozkładów temperatury w dowolnych przekrojach pasma wymaga wykonania pełnej symulacji procesu metodą elementów skończonych przy użyciu opracowanego modelu procesu kowarkowego.

Siła i moc kucia dla przypadków kształtowania prętów okrągłych, płaskimi kowadłami obliczana jest w programie projektowania technologii według zależności (9, 11), przy stosowaniu w obliczeniach naprężenia uplastyczniającego określonego w badaniach plastometrycznych (baza danych), z uwzględnieniem występującej w procesie technologicznym średniej temperatury pręta (model temperaturowy) oraz odkształcenia obliczonego według zależności podanych w tabelicy 1 i średniej prędkości odkształcenia wyznaczonej wzorem podanym w tabelicy 2. Dla przypadku podawaniu materiału ruchem prostym we wzorach (10, 11) stosowane są zastępcze średnice pręta, obliczone z zasady równości pól powierzchni przekroju pręta kutego (kwadratu lub ośmiokąta) i okrągłego pręta zastępczego. Siła kucia opracowywanej technologii weryfikowana jest wynikami obliczeń numerycznych, w przypadku gdy są one przeprowadzane lub gdy dane takie zawiera baza danych.

Możliwość zasklepiania wewnętrznych nieciągłości ujęta jest w programie projektowania technologii na podstawie doświadczalnie określonego wpływu sposobu kucia na intensywność zamykania nieciągłości zlokalizowanej w osi kutego pręta [14, 48] (rys. 17). Program proponuje najskuteczniejszy przebieg przepustów dla odpowiedniego etapu kucia, uwzględniający wpływ sposobu kucia, tzn. wielkości gniotu i typu kalibrowania.

Wpływ odkształcenia na strukturę materiału, jako efekt niejednorodności struktury wejściowej materiału (np. struktury wlewka) oraz oddziaływania lokalnego odkształcenia, w budowanym programie został opracowany dla stali narzędziowych w gatunku SKC, SW7M, SW7MŻ oraz SNb2. W przypadku stali SKC wpływ odkształcenia na zmianę wielkości pojedynczych węglików i skupisk węglików ujmują wzory (13, 14). Na rys. 23 przedstawiono zmiany wartości współczynników równania dla poszczególnych przedziałów zróżnicowania początkowej wielkości węglików i ich skupisk ujęte w przedziały od I ÷ IV. Natomiast dla stali SW7MŻ oraz SNb2 do programu projektowania wprowadzono zależności podane w publikacji [37], opracowane dla procesu kucia w kowarce zgodnie z analizą rozkładu odkształceń i charakterystyką odpowiadających im stanów naprężenia wykonaną przy użyciu MES. Rozwiązanie takie jest konieczne, gdyż jak już stwierdzono (rozdz. 8), nie udało się opracować podobnej jak dla stali SKC, uniwersalnej funkcji wiążącej jedynie z odkształceniem lokalnym przebieg fragmentacji i ujednorodnienia fazy węglkowej, bez uwzględnienia oddziaływania stanu naprężenia.

Geometryczne cechy odkutych prętów obejmuje charakterystyka takich wielkości, jak błędy kształtu, odchyłki wymiarowe, stan powierzchni wyrobu, które to wielkości nie różnią się istotnie dla prętów wytworzonych w różnych procesach przeróbki plastycznej i nie są kontrolowane obliczeniami projektowymi. Uwzględniane są natomiast w projektowych obliczeniach, jako składnik błędu kształtu, takie cechy kołowych prętów odkutych w kowarce, jak makronierówność i niekołowość. Wielkość makronierówności oraz niekołowości obliczana jest według wzorów podanych w tablicy 4.

Warunki geometryczne ograniczające proces kucia. Przez ograniczenia geometryczne rozumiane są graniczne wartości wymiarów odkuwek oraz wielkości gniotów w przepustach wynikające z cech geometrycznych narzędzi. Dla wszystkich rodzajów kalibrowania warunki geometryczne ograniczające proces kucia podano w tablicy 5.

Opis programu projektowania, przygotowany dla komputerów typu PC, przedstawiono w cyklu publikacji [23, 25, 35, 38]. Zadaniem programu jest wyznaczenie parametrów kucia dla wybranego typu kalibrowania i schematu przepustów. W tym zakresie program pozwala na określenie trzech typów technologii:

- według założonego rozkładu odkształceń lokalnych na przekroju odkutych prętów - rozkład odkształceń określany jest w programie przez podanie wartości wskaźnika niejednorodności odkształcenia zgodnie z wzorem (15),
- technologia specjalna - uzależniająca parametry kucia od przyjętego stopnia obciążenia kowarki, określanego przez podanie w procentach maksymalnej siły kucia w odniesieniu do siły dopuszczalnej,
- technologia własna - operator określa przebieg technologii kucia korzystając jedynie z możliwości obliczeniowych programu.

Operator w systemie relacji baza danych ↔ obliczenia dokonuje:

- wyboru typu kowarki oraz podstawowych parametrów pracy,
- określa typ kalibrowania i schemat przepustów,
- uwzględnia własności kutego wlewka,
- przyjmuje sposób określania temperatury pasma.

Uruchomienie określonej procedury programu wspomagania projektowania następuje poprzez wybór kursorem odpowiedniego pola na planszy (rys. 65), która pojawia się na ekranie monitora po uruchomieniu programu komputerowego.

ZALOŻENIA	KOWARKA	MATERIAŁ	TECHNOLOGIA	RAPORT
Wybór danych z bazy				
Uzupełnienie bazy danych				
Zmiana danych w bazie				
SXL - 40	D ₁ = 280 mm	z = 1,7	Δh = 40 mm	T = 1050 °C
SW7M	d ₁ = 120 mm	L. przep. 7	v ₁ = 55 mm/s	F _{max} = 4,7 MN

Rys. 65. Plansza programu komputerowego wspomagania projektowania procesu kucia w kowarce

Fig. 65. A computer screen of the programme assisting the forging process in a swaging machine

Obsługa programu polega na wypełnieniu odpowiedniego pola, w którym należy zaakceptować oferowaną wartość lub wprowadzić nową. Program w zakresie opcji doboru parametrów daje możliwość alternatywnego wyboru danych. Operator może wprowadzić własne wartości lub przyjąć propozycje sugerowane przez program na podstawie danych zawartych w bazie. Wypełnienie pól dialogowych następuje sukcesywnie w trakcie wprowadzania i doboru danych projektowych. Uruchomienie kolejnych obliczeń jest niemożliwe bez wprowadzenia niezbędnych informacji, dlatego należy uaktywniać poszczególne procedury projektowe począwszy od strony lewej (ZALOŻENIA) i dalej poprzez wprowadzenie charakterystyki urządzenia (KOWARKA) oraz charakterystyki stali (MATERIAŁ) przejść do obliczeń projektowych (TECHNOLOGIA). Obliczenia kończy (RAPORT) drukowany lub wyświetlany na monitorze.

Wyznaczenie relacji parametry technologiczne procesu - skutek ich działania oraz określenie ograniczeń technologicznych zabezpieczających realność wykonania procesu stanowią podstawę działania programu projektowania. Program praktycznie dokonuje porównania wartości obliczonych z wartościami granicznymi zawartymi w bazie oraz uaktywnia odpowiedni strumień dalszych obliczeń, zależnie od wyniku pozytywny - negatywny. Rozpoznanie przyczyny negatywnego wyniku weryfikacji oraz pomoc w ustaleniu nowych warunków lub danych stanowi główny cel systemu wspomagania projektowania technologii.

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki obliczeń numerycznych oraz badań testowych i weryfikujących potwierdziły przyjętą tezę pracy, dając zarazem podstawę do wykorzystania symulacji komputerowej przy budowie programu wspomagania projektowania technologii kucia w kowarce. Opracowany program stanowi próbę rozwiązania problemu projektowania technologii procesu kowarkowego z uwzględnieniem zjawisk lokalnych, zaś uzyskiwane wyniki laboratoryjnej i przemysłowej weryfikacji potwierdzają jego przydatność.

Rezultatem przeprowadzonych badań są następujące wnioski:

1. Opracowany model procesu kowarkowego przy użyciu metody elementów skończonych dla zagadnień osiowosymetrycznych pozwala na wyznaczenie podstawowych charakterystyk rozkładu naprężenia, prędkości odkształcenia, intensywności odkształceń lokalnych, prędkości przemieszczeń metalu oraz rozkładów temperatury w wydzielonych przekrojach odkształcanego pasma z uwzględnieniem specyfiki oraz charakterystycznych cech modelowanego procesu.
2. Testy modelu wykazały, że uzyskiwane w procesie symulacji zmiany schematu mechanicznego kotliny odkształcenia wykazują, zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami dla procesu kowarkowego, zależność od typu kalibrowania, kształtu powierzchni kowadeł, wielkości kąta opasania materiału kowadłami, sposobu ruchu kowadeł i sposobu podawania materiału oraz warunków technologicznych procesu i charakterystyki odkształcanego metalu.
3. Przeprowadzona analiza wyników obliczeń numerycznych wykazała, iż symulowany charakter płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, w tym również wielkość i rozkład odkształceń lokalnych, jest zgodny z publikowanymi wynikami opracowań innych autorów oraz wynikami badań własnych, otrzymanymi na drodze badań analitycznych lub laboratoryjnych.
4. Przyjęte w modelu założenia poddane zostały weryfikacji doświadczalnej. Otrzymane wyniki obliczeń porównano z wynikami prób kucia w warunkach ruchowych. W zakresie rozkładów odkształceń dokonano porównania wyników obliczeń z wynikami pomiarów odkształceń lokalnych określonych metodą prętów składanych. Weryfikacji poddano również otrzymane rozkłady temperatur na przekroju pasma, porównując je z wynikami pirometrycznych pomiarów temperatury powierzchni prętów. Uzyskane wyniki pomiarów wykazały zgodność z wynikami symulacji.
5. Opracowany sposób analizy procesu kowarkowego, oparty na metodzie torusa, pozwala uzyskać na tyle poprawny opis stanu mechanicznego kotliny odkształcenia, że możliwe jest obliczenie siły kucia dla różnych typów kalibrowania, z dokładnością większą aniżeli umożliwiają to wzory wyprowadzone teoretycznie.
6. Warunkiem otrzymania zgodnych z praktycznymi pomiarami wyników obliczeń jest staranne określenie parametrów odzwierciedlających symulowany proces, tzn. dobór funkcji umocnienia, opis warunków tarcia oraz wymiany ciepła, a także warunków technicznych procesu, co umożliwia kompleksowe modelowanie i przenoszenie historii odkształcenia dla kolejnych etapów kształtowania w następujących po sobie przypustach.

7. Wyznaczona charakterystyka stanu mechanicznego, w powiązaniu z przedstawioną w pracach [40, 107] metodą oceny struktury stali narzędziowych kutych w kowarkach, stwarza podstawę do analizy wpływu technologii na strukturę stopów narzędziowych i opracowania dla kolejnych gatunków stali zależności funkcyjnych, które pozwolą na prognozowanie lokalnych własności materiału w funkcji parametrów procesu technologicznego i stanu struktury materiału wsadowego.
8. Symulacja procesu kowarkowego przeprowadzona na podstawie warstwowo modelowanej kotliny odkształcenia stwarza podstawy racjonalnego doboru technologii kucia, z uwzględnieniem bezpieczeństwa technologicznego procesu oraz wymagań co do własności wyrobu.

LITERATURA

1. Arfmann G., Dahl W., Kopp R., Twickler M.: Einsatz eines Mini-Supercomputers zur Optimierung von Umformprozessen und Werkstoffinsatz, *Stahl und Eisen*, t. 108, 1988, 5, s. 225-230.
2. Bertrand-Corsini C., David C. Montmitonnet P., Chenot J-L.: Numerical Modelling of Hot Flat Rolling and Hot Shape Rolling, *La Revue de Métallurgie - CIT*, 1988, 10, p. 771-781.
3. Bin F., Luo Z-J.: Finite Element Simulation of the Friction Mechanism in Plastic-working Technology, *Wear*, 1988, 121, p. 41-51.
4. Bykowski T., Tomczyk M.: Zwiększenie żywotności narzędzi kuźniczych, *Opracowanie Działu Badawczego Huty Batory* (niepublikowane).
5. Bielacki M.: Charakterystyka stali, *Seria F Stale narzędziowe*, Śląsk, Katowice 1978.
6. Chenot J.L.: Finite Element Modelling of Metal Forming: Recent Achievements and Future Challenges, *Proc. Int. Conf. Comp. Plasticity-Fund. and Applic.*, eds., D.R.J. Owen, E. Onate, E. Hinton, Barcelona '92, p. 1019-1036.
7. Chenot J-L., Coupez T., Fourment L.: Recent Progresses in Finite Element Simulation of the Forging Process, *Proc. Int. Conf. Comp. Plasticity-Fund. and Applic.*, eds., D.R.J. Owen, E. Onate, E. Hinton, Barcelona '92, p. 1321-1341.
8. Chenot J.L., Bellet M.: The Viscoplastic Approach for the Finite Element Modelling of Metal Forming Processes, part 8, eds., Hartley P., Pillinger I., Sturgess C., *Numerical Modelling of Deformation Processes*, Springer-Verlag, London, 1992.
9. Ciepela A., Kozioł R.: Automatyka kompleksowa procesów przemysłowych na przykładzie walcowni. *WNT*, Warszawa 1978.
10. Cwajna J., Richter J., Szala J.: Stereological Parameters of Carbide Particles and Properties of Conventional and Nonledeburitic High-Speed Steels, *Acta Stereol.*, t. 10, 1991, 1, p. 63-71.
11. Cwajna J., Maliński M., Szala J.: The Effect of Processing on Carbides Segregation in High-Speed Steel, *Acta Stereol.*, t. 8, 1989, 2, p. 281-286.
12. Cwajna J., Myalska-Olszówka A., Szala J.: Stereological Parameters of Carbide Particles and Properties of Economical High-Speed Steels of Elevated Hardness, *Acta Stereol.*, t. 11, 1992, suppl. 1, p. 431-438.
13. Cwajna J.: Ilościowy opis struktury stopów narzędziowych i jego zastosowanie, *Praca hab. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Hutnictwo*, z. 39, Gliwice 1991.
14. Cwajna J., Onderka J., Pustówka E.: Opracowanie podstaw do optymalizacji technologii wytwarzania prętów o dużym przekroju ze stali szybkoznacnych, *Rozprawa doktorska, Wydział Metalurgiczny Politechniki Śląskiej, Katowice 1978* (niepublikowane).
15. Dahl W., Hagen M., Kopp R., Mauro de Suoza M.: Optimierung des termomechanischen Walzens von Profilen durch Simulation der Finite -Elemente - Methode, *Stahl und Eisen*, t. 109, 1989, 20, s. 977-982.
16. Dobyczin I.A., Rywkin M.W.: Oprzedzielenie deformowanego sostożania krugloj zgotowki w procesie protjażki na radialno-kowocznoj maszynie, *Izw. Wyzow. Maszynostrojenje*, 1986, 3, c. 108-112.
17. Dokumentacja techniczna kowarek SXL - 40 oraz SXL - 16 firmy GFM, materiały Huty Batory (niepublikowane).
18. Finckenstein E., Greve A., Schilling R.: Datenbankunterstützte Bereitstellung von Materialdaten für die Simulation von Umformprozessen, *Workshop des Gemeinschaftsprojekts Prozeßsimulation Umformtechnik PSU*, Hannover, 5 - 6 Dezember, 1991, s. 25-34.
19. Gerhard J., Lange K.: Dreidimensionale gekoppelte mechnische und thermische Simulation in der Kalt- und Warmmassivumformung, *Steel Research*, t. 60, 1989, 10, p. 451-459.
20. Ginzburg V.B., Kaplan N. M., James K. L. Zickefoose W. F.: Application of Off-line Computer Model MILLMAX at Weirton Steel's Hot Strip Mill, *Iron and Steel Engineer*, 1988, 6, p. 24-33.
21. Głowacki M.: Thermal-Mechanical Model of Rolling of Shapes in 4-roll Grooves, *Metalurgia i Odlewnictwo*, 1990, 16, s. 159-175.
22. Grosman F., Piela A., Ćwierk P.: Korelacja między odkształceniem, strukturą i własnościami dla stali narzędziowej przerabianej plastycznie na kowarkach. Zadanie 5.6.5. Opracowanie modelu rozkładu odkształceń w prętach kutych na kowarce z zastosowaniem metody elementów skończonych. *Spr NB-240/RM-2/90*, Politechnika Śląska (zlec.), PAN, Inst. Podstaw Metalurgii, Kraków (niepublikowane).
23. Grosman F., Piela A.: Komputerowe wspomaganie projektowania procesu kucia w kowarce, *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, t. 62, 1995, 9, s. 316-325.
24. Grosman F., Hetmańczyk M., Piela A., Hadasik G., Cwajna J., Szala J.: Opracowanie eksperymentalnych metod wyznaczania naprężeń uplastyczniających i zmian struktury materiału w procesach przeróbki plastycznej, *Sprawozd. KMiTPP*, Politechnika Śląska, do zlec. KBN nr GR-637/RM-2/91 (niepublikowane).
25. Grosman F., Piela A.: Komputerowe wspomaganie projektowania procesu kucia na kowarce, *Obróbka Plastyczna Metali*, t. VI, 1995, 5, s. 25-38.
26. Grosman F., Pustówka E.: Kowarki w przetwórstwie hutniczym, *Wiadomości Hutnicze*, t. 33, 1977, 8-9, s. 291-298.
27. Grosman F., Pustówka E.: Kotlina odkształcenia i przebieg odkształcenia w procesie kucia w kowarkach, *Hutnik*, t. 46, 1979, 7, s. 290-297.
28. Grosman F., Piela A.: Metal Flow in the Deformation Gap at Primary Swaging, *Proc. Int. Conf. Advances in Materials and Processing Technologies*, ed., M.S.J. Hashmi, Dublin City University, vol. II, p. 1427-1434.
29. Grosman F., Piela A.: Introduction of the Structural Model in the Program for the Design of the Swing Forging Process of Tool Steels, *Proc. 6th Inter. Conf. Formability '94*, ed., J. Barteček, Ostrava, 1994, p. 248-253.
30. Grosman F., Piela A., Cwajna J.: Wprowadzenie modelu strukturalnego do programu projektowania technologii kucia stali narzędziowych w kowarkach, *I Konferencja Zastosowanie komputerów w zakładach przetwórstwa metali*, edycja Pietrzyk M., Piela A., 16-17 listopad 1993, Kraków, s. 61-71.
31. Grosman F., Piela A.: Komputerowa symulacja procesu kucia w kowarce z uwzględnieniem modelu strukturalnego, *Hutnik - Wiadomości Hutnicze*, t. 61, 1994, 8-9, s. 254-259.
32. Grosman F., Piela A.: Implementation of a Structural Model into the Designig Programme for Tool-Steel Swaging Technology, *Archiwum Hutnictwa*, t. 39, 1994, 3, s. 249-261.
33. Grosman F., Cwajna J.: The Application of Quantitative Metallography in the Evaluation of the Effect of Plastic Deformation on the Carbide Phase of High-Speed Steel. *Proc. Conf. Stereology in Materials Science*, Kraków 1986, p. 159-167.

34. Grosman F., Hadasik E.: Obliczanie parametrów siłowych kucia w kowarkach na podstawie badań plastometrycznych, Konferencja SIMP, KP HSW nt. Postępowe Technologie Kuźnicze w Kuźnictwie Polskim, Stalowa Wola, 22-23. 04. 1983, s. 70-81.
35. Grosman F., Piel A.: Program komputerowego wspomaganie projektowania procesu kucia w kowarce, II Konferencja SITPH, AGH, Politechniki Śląskiej nt. Zastosowanie komputerów w zakładach przetwórstwa metali, 16 - 18.01.1995, AGH Wisła, s. 125 ÷ 140.
36. Grosman F., Piel A.: Metal Flow in the Deformation Gap at Primary Swaging, Journal of Materials Processing Technologies, Volume PR0056/1-4, 1996, s. 404-411.
37. Grosman F., Piel A.: Wpływ odkształcenia i stanu naprężenia na fazę węglkową stali szybko tnących, III Konferencja AGH, Politechniki Śląskiej, Komitetu Metalurgii PAN, nt. Zastosowanie komputerów w zakładach przetwórstwa metali, Koninki '96, edycja, Kusiak J., Majta J., Piel A., Pietrzyk M., s. 63 ÷ 69. Publikowane, Obróbka Plastyczna Metali, t. VII, 1996, 1, s. 15-21.
38. Grosman F., Piel A.: Komputerowe wspomaganie projektowania procesu kucia w kowarce, Przegląd Mechaniczny, t. LIV, 1995, 6, s. 10-19.
39. Grosman F.: Analiza wpływu procesu kucia w kowarkach na własności wyrobu, Praca hab. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Hutnictwo, z. 22, Gliwice 1980.
40. Grosman F.: Przebieg odkształcenia w procesie kucia w kowarkach, Konferencja Obróbka Plastyczna '79, Komitet Metalurgii PAN, Sekcja Teorii Procesów Przeróbki Plastycznej, IMŻ, Kazimierz 1979, s. 38-46.
41. Grosman F., Pustówka E., Onderka J.: Rozkład odkształceń w pretach kutyh w kowarkach, Hutnik, t. 56, 1989, 7-8, s. 249-255.
42. Grosman F.: Podstawowe zagadnienia kucia w kowarkach do wstępnego przerobu, Ogólnopolska Konferencja Kuźnicza, Wisła 1976 (niepublikowane).
43. Grosman F., Piel A.: Korelacja między odkształceniem, strukturą i własnościami dla stali narzędziowej przerabianej plastycznie na kowarkach. Zadanie 5.6.1. Ustalenie związków ilościowych pomiędzy parametrami kucia a lokalnym odkształceniem oraz wpływu odkształcenia na strukturę cz. 2. Sprawozd. CPBP 02.07 za rok 1987, Politechnika Śląska, IIM Katowice (niepublikowane).
44. Grosman F., Cwajna J., Piel A.: Korelacja między odkształceniem, strukturą i własnościami dla stali narzędziowej przerabianej plastycznie na kowarkach. Zadanie 5.6.3. Ilościowy opis struktury materiałów narzędziowych. Próby komputerowej symulacji zmian struktury w procesie kucia. Sprawozd. CPBP 02.07. za rok 1988, Politechnika Śląska, IIM Katowice (niepublikowane).
45. Grosman F., Piel A.: Korelacja między odkształceniem, strukturą i własnościami dla stali narzędziowej przerabianej plastycznie na kowarkach. Zad. 5.6.4. Opracowanie podstaw doboru parametrów kucia w kowarce dla uzyskania założonego rozkładu odkształceń. Spr. CPBP 02.07. za rok 1989, Politechnika Śląska, Katowice (niepublikowane).
46. Grosman F., Piel A.: Przestrzenne modelowanie procesu kucia w kowarce przy użyciu metody elementów skończonych, dla zagadnień osiowosymetrycznych, Konferencja Komitetu Metalurgii PAN, Sekcji Teorii Procesów Przeróbki Plastycznej, Zakładu Przeróbki Plastycznej, Politechnika Rzeszowska, nt. Odkształcalność metali i stopów, Łańcut, 28-30.11.1995, publikowane, Rudy i Metale Nieżelazne, t. 40, 1995, 11, s. 474-478.
47. Grosman F., i inni: Modelowanie zjawisk strukturalnych i siłowo energetycznych jako podstawa komputerowego projektowania i sterowania procesami obróbki plastycznej i cieplno-plastycznej, Projekt badawczy KBN nr 7 0830 91 01, 1994.
48. Grosman F., Christoph H., Granicki J.: Nowe możliwości technologiczne Huty Baildon w produkcji cienkich pretów po uruchomieniu linii kowarki, Hutnik, t. 54, 1987, 11-12, s. 299-303.
49. Herrmann M.: Das Gemeinschaftsprojekt "Prozeßsimulation in der Umformtechnik - Zielsetzung, Konzepte, Probleme", Workshop Gemeinschaftsprojekt Prozeßsimulation Umformtechnik PSU, Hannover, 5 - 6 Dezember 1991, s. 1-13.
50. Instrukcje technologiczne oddziału kowarek Huty Batory (niepublikowane).
51. Jackson J. E., Gangjee T., Haque I.: Lubrication Modeling and its Effect on Simulation of Material Forming, Vol. 111, Transactions of the ASME, 1989, 1, p. 7480.
52. Koch H., Tuke K.H., Grube M.: Der Schmiede-Walzprozeß ein Sonderverfahren zur Herstellung von Halbzeug u. Stabsthal, Stofffluß Stand der Technik und Zukunftsaussichten, Der Kalibreur, t. 29, 1978, 12, p. 31-66.
53. Kolmogorow W.L., Konowalow A.W., Lanowok R.E.: Rasciet napraziennodeformirovannogo sostojania pri radialnoj kowkie, Izwestia Wys. Ucz. Zaw. Czernaja Metallurgia, 1989, 12, s. 66-69.
54. Kopp R., Moraes de Souza M., Dahl W., Hargen M.: Simulation des Profilwalzens mit Hilfe von Werkstoffmodellen und der Finite - Elemente - Methode, Stel Research, t. 59, 1988, 12, s. 542-552.
55. Kopp R., Bünthen R., Karhausen K., Philipp F.D., Schneider R.: Erfahrungen auf dem Gebiet Prozeßsimulation in der Umformtechnik - Netzneugenerierung und Einfluß der Randbedingungen auf die Ergebnisse, Workshop des Gemeinschaftsprojekts Prozeßsimulation Umformtechnik PSU, Hannover 5 - 6. Dezember 1991, s. 37-57.
56. Kröplin B., Schrem E., Wilhelm M., Keck P.: Grundkonzepte eines modularen Software-Kerns für nichtlineare Anwendungen der Methode der Finiten Elemente, Workshop des Gemeinschaftsprojekts Prozeßsimulation Umformtechnik PSU, Hannover 5 - 6 Dezember 1991, s. 15-24.
57. Kusiak J.: Program FORGE2 do projektowania technologii kucia matrycowego, Hutnik - Wiadomości Hutnicze, t. 60, 1993, 10, s. 324-326.
58. Lahoti G.D., Altan T.: Computer-Aided Analysis of Metal Flow and Temperatures in Radial Forging of Tubes, Proc. Int. Conf. Prod. Eng., New Dehli, Calcuta 1977, 1, p. 169-182.
59. Lahoti G.D., Altan T.: Analysis of Radial Forging Process For Manufacturing Rods and Tubes, Journal of Engineering for Industry, Trans. of ASME, 1976, 98, p. 265-272.
60. Łazorkin W. A., Tiurin W.A., Pospielow I.A., Żaluźnyj Ju, G.: Razrabotka i wnedrienie racyonalnych reżimow dieformirowanija slitkow iz instrumentalnych staliej na radialno-kowocznoj maszynie, Kuzniecno-sztampowocznoje proizwodstwo, 1986, 5, c. 8-10.
61. Lee H. C., Kobayashi S.: New Solution to Rigid-Plastic Deformation Problems Using a Matrix Method, Journal of Engineering for Industry, Trans. of ASME, 1973, 95, p. 865 - 873.
62. Lenard J.G., Pietrzyk M.: Rolling Process Modelling, part 11, eds., Hartley P., Pillinger I., Sturgess C., Numerical Modelling of Deformation Processes, Springer-Verlag, London 1992.
63. Lipski T.: Kucie na kowarkach, WNT, Warszawa 1979.
64. Liubwin W.I.: Obrabotka mietalłow radialnym obzajem, Maszynostr., Moskwa 1979.
65. Maliński M., Cwajna J., Richter J.: Carbide Particles Size and Shape in Large Diameter High-Speed Steel Bars, Acta Stereol., t. 8, 1989, 2, p. 269-274.

66. Maliński M., Cwajna J., Szala J., Grosman F.: Effect of Radial - Forging Parameters on High - Speed Steels Microstructure, V Ogólnopolska Konferencja Komitetu Nauki o Materiałach PAN, Politechniki Śląskiej nt. Materiały Narzędziowe, Gliwice-Zakopane 1993, s. 136-142.
67. Mitter M., Preininger G., Moser R., Till E.T.: Verzerrungen und Spannungen beim Verbundschmieden von Rundstäben, Berg und Hüttenmännische Monatshefte, t. 132, 1987, 11, s. 545-550.
68. Moal A., Massoni E., Chenot J-L.: A Finite Element Modelling for the Inertia Welding Process, Proc. of Int. Conf. Comp. Plasticity-Fund. and Applic., eds., D.R.J. Owen, E. Onate, E. Hinton, Barcelona 1992, p. 289-300.
69. Oh S.I., Chen C.C., Kobayashi S.: Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing, Part 2, Workability in Extrusion and Drawing, Journal of Engineering for Industry, Trans. of ASME, t. 101, 1979, 2, p. 36-44.
70. Osipow E.P.: Naprężenie sostoianie pri obzati diska (pri rotacionnoj kowkie prutka czetiriema matricami). Trudy IM. Akad. Nauk SSSR, Moskwa 1960, 49.
71. Piela A.: Komputerowo wspomagane projektowanie procesu kowarkowego, I Konferencja SITPH, AGH, Politechniki Śląskiej nt. Zastosowanie komputerów w zakładach przetwórstwa metali, Kraków 1993, ed. Pietrzyk M., Piela A., s. 71÷80.
72. Piela A.: Przebieg zmian temperatury materiału w procesie kowarkowym, III Konferencja AGH, Politechniki Śląskiej, Komitetu Metalurgii PAN, Koninki '96, ed., Kusiak J., Majta J., Piela A., Pietrzyk M., s. 33 ÷40.
73. Piela A.: Introduction of the Deformation Limit Criterion to the Analysis of Swaging Process, Proc. 6th Inter. Conf. Formability '94, ed., J. Barteček, Ostrava 1994, p. 321-328.
74. Piela A., Grosman F.: Termomechaniczna symulacja procesów przeróbki plastycznej - podstawa komputerowego projektowania i sterowania procesem technologicznym, II Seminarium Wydz. Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu, Politechniki Śląskiej, nt. Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii Żelaza, 20.05.1994, Katowice, poz. 8.
75. Piela A., Hadasik E.: Forging Force in the Swaging Machine as a Criterion of the Computer Designing of Technologies, 4th International Metallurgical Symposium, METAL'95, 16-18 may 1995, Ostrava, Czech Republic, v. II, p. 44-43.
76. Piela A.: Termomechaniczna symulacja procesu kucia w kowarkach do wstępnego przerobu, Hutnik - Wiadomości Hutnicze, t.60, 1993, 6, s. 197-203.
77. Piela A., Grosman F.: Spatial Modelling of Swaging Process Using Finite Elements Method Applied to Axially-Symmetrical Problems, METAL FORMING '96, Journal of Materials Processing Technology, p. 517-522.
78. Piela A.: Studies on the Applicability of the Finite Element Method to the Analysis of Swaging Process, Archiwum Hutnictwa, t. 37, 1992, 4, s. 425-443.
79. Piela A.: Conditions of Thermomechanical Simulation of Metal Flow at Swaging - Fundamentals of the Computer-Aided Processing Design, Archiwum Hutnictwa, t. 38, 1993, 1, s. 101-121.
80. Piela A.: Simulation of Primary Swaging Process for Bars in Circle → Square Sizing Scheme, Archiwum Hutnictwa, t. 39, 1994, 3, s. 295-317.
81. Piela A.: Analysis of the Metal Flow at Swaging - Numerical Modelling and Experimental Verification, Proc. Inter. Conf. AMPT, ed., M.S.J. Hashmi, Dublin 1995, p. 654-663. Extend. pub. in Spec. Issue Inter. Journal of Mechanical Sciences, 1996.
82. Piela A.: Rola badań plastometrycznych w analizie MES - na przykładzie procesu kowarkowego, Międzynarodowa Konferencja Politechniki Śląskiej, KMiTPP, Wysoka Szkoła Bańska Ostrawa, Katedra Tworzenia Materiału, nt. Rozwój metodyki i zastosowań badań plastometrycznych PLAST'94, Wisła 29-30.09.1994, s. 41-48.
83. Piela A.: Numeryczna symulacja procesu kowarkowego, Referat przedstawiony na: Seminarium Zakładu Plastycznej Przeróbki Metali, Wydz. Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 1993, (niepublikowane).
84. Piela A.: Projektowanie technologii kucia w kowarkach czterokowadełkowych do wstępnego przerobu przy użyciu metod symulacyjnych, Spr. BW-57/RM-2/94, Politechnika Śląska Gliwice (niepublikowane).
85. Piela A.: Modelowanie procesu kowarkowego przy użyciu metody elementów skończonych, International Conference New Outlooks for Metal Forming, Ostrava - Frýdlant nad Ostravici, 12-14.09, 1995, p. 108-116.
86. Piela A.: Określenie siły kucia w procesie kowarkowym przy kuciu płaskimi kowadłami, Hutnik - Wiadomości Hutnicze, t. 61, 1994, 7, s. 223-230.
87. Piela A.: Symulacja metodą elementów skończonych procesu płynięcia metalu podczas kucia w kowarkach do wstępnego przerobu jako podstawa projektowania technologii kucia i sterowania procesem, Sprawozdanie BW-744/RM2/92, Politechnika Śląska (niepublikowane).
88. Piela A.: Opracowanie koncepcji komputerowego projektowania procesu kucia w kowarce, Sprawozdanie IIM, Politechnika Śląska nr 5/PBU-244/RM-2/92, do projektu badawczego KBN nr 7 0830 91 01.
89. Piela A.: Modelowanie procesu kucia prętów w kowarkach do wstępnego przerobu przy użyciu metody elementów skończonych (MES), Zebranie Naukowe Komitetu Metalurgii PAN, Sekcja Teorii Procesów Przeróbki Plastycznej nt.: Fizyczne i matematyczne modelowanie procesów przeróbki plastycznej, Podkowa Leśna, 22-23 październik 1992 (niepublikowane).
90. Pietrzyk M., Głowacki M., Grosman F.: Generalized Plane Strain Finite-Element Analysis of the Swaging Process, Proc. of Inter. Conf. Comp. Plasticity-Fund. and Applic., eds., D.R.J. Owen, E. Onate, E. Hinton, Barcelona 1992, p. 1115-1125.
91. Pietrzyk M., Lenard J.G.: On the Significance of the Evaluation of Temperature Fields During Metal Forming Processes, Metalurgia i Odlewnictwo, t. 15, 1989, 3, s. 369-389.
92. Pietrzyk M., Głowacki M., Kusiak J.: Termomechaniczna symulacja procesów plastycznej przeróbki metali, Hutnik t. 58, 1991, 4, s. 134-138.
93. Pietrzyk M., Kusiak H., Lenard J. G.: Wymiana ciepła między odkształcanym metalem i narzędziem w procesach plastycznej przeróbki, Hutnik, t. 59, 1992, 5, s. 153-159.
94. Pietrzyk M.: Modelowanie zjawisk mechanicznych, termicznych i strukturalnych w procesach plastycznej przeróbki metali, Projekt badawczy KBN nr 18 351 14, 1991.
95. Pietrzyk M., Kusiak H., Kędziński Z.: Modelowanie procesów walcowania blach na gorąco, Hutnik, t. 58, 1991, 8, s. 266-273.
96. Pietrzyk M.: Zastosowanie metody elementów skończonych do symulacji procesu spęcznienia, Hutnik, t. 58, 1991, 2, s. 60-63.
97. Pietrzyk M., Głowacki M.: Dokumentacja programu El_kowar - symulującego metodą elementów skończonych kucie w kowarkach (niepublikowane).
98. Pietrzyk M.: Warunki brzegowe przy stosowaniu metody elementów skończonych do analizy walcowania wyrobów płaskich, Archiwum Hutnictwa, t. 28, 1983, 2, s. 241-250.

99. Pietrzyk M.: ERoll - program symulujący metodą elementów skończonych proces walcowania wyrobów płaskich, Hutnik, t. 61, 1994, 10-11, s. 314-320.
100. Pietrzyk M.: Klasyczna teoria walcowania w świetle rozwiązania metodą elementów skończonych. Obróbka Plastyczna, t. XXV, 1986, Z. 1, s. 5-9.
101. Pietrzyk M., Lenard J.G.: Thermal Mechanical Modelling of the Flat Rolling Process, Springer-Verlag, Berlin 1991.
102. Pietrzyk M., Glowacki M.: Metoda elementów skończonych i możliwości jej stosowania w procesie plastycznej przeróbki metali. Hutnik, t. 52, 1985, 7-8, s. 234-239.
103. Pietrzyk M.: Walcowanie wyrobów płaskich - modele matematyczne, Praca hab., Metalurgia i Odlewnictwo, 1983, 97.
104. Praca zbiorowa: Opracowanie programów do wyznaczania ilościowych związków pomiędzy odkształceniem lokalnym a parametrami stereologicznymi fazy węgla-kowej stali szybkotnących. Spr. NB-162/RM-2/89, Politechnika Śląska, Gliwice 1989, (niepublikowane).
105. Program FORGE2, Centre de Mise en Forme des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris rue C. Daunesse, Shopia Antipolis 06560 Valbonne cedex, France.
106. Pustówka E., Maciejny A., Grosman F.: Dobór parametrów kucia stali szybkotnących w kowarkach, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Hutnictwo, z. 18, Gliwice 1979, s. 58-66.
107. Radiuczenko Ju. S.: Rotacyonnaja kowka, Maszgiz, Moskwa 1962.
108. Radiuczenko S.: Rotacyonnoje obźatje, Maszynostrojenie, Moskwa 1972.
109. Raźnjevič K.: Tablice cieplne z wykresami, WNT, Warszawa 1966.
110. Rodič T., Owen D.R.J.: Basic Concepts of Numerical Simulation of a Radial Forging Process, ZEVB, t. 21, 1987, 4, p. 167-173.
111. Roll K., Tekkaya A.E.: Prozesssimulation in der Umformtechnik mit der Methode der Finiten Elemente - Stand und Entwicklungstendenzen, (Teil I) Drath, t. 36, 1985, 5, s. 213-218, (Teil II) 6, s. 280-283.
112. Royis P.: A Two-Fields Mixed Formulation for the Maxwell-Norton-Hoff's Viscoplastic Model, Proc. of Int. Conf. Comp. Plasticity-Fund. and Applic., eds., D.R.J. Owen, E. Onate, E. Hinton, 6-9.04.1992, Barcelona, Spain, 1, p. 153-162.
113. Senkara T.: Obliczenia cieplne pieców grzewczych w hutnictwie, Śląsk, Katowice 1985.
114. Shimizu T., Soyris N., Massoni E., Chenot J-L.: Development of 3D Code for the Simulation of the Deep Drawing Process, Proc. of Int. Conf. Comp. Plasticity-Fund. and Applic., eds., D.R.J. Owen, E. Onate, E. Hinton, Barcelona 1992, p. 1227-1238.
115. Spittel T., Spittel M.: Matematische Modellierung verfahrensabhängiger Kenngrößen der Umformtechnik, Neue Hütte, t. 34, 1989, 1, s. 23-29.
116. Staniszewski B.: Wymiana ciepła, PWN, Warszawa 1980.
117. Szala J., Wiśniewski A., Cwajna J.: The Systematic Scanning and Variance Analysis Method for Evaluation of Cluster Structures. Acta Stereol., t. 11, 1992, p. 617-623.
118. Szala J., Cwajna J., Wiśniewski A.: The Systematic Scanning and Variance Analysis Method for Evaluation of Particles Distribution. Acta Stereol., t. 8, 1989, 2, p. 237-242.
119. Tamura I.: Some Fundamental Steps in Thermomechanical Processing, Transactions ISIJ, 1987, 27, p.763-779.
120. Uhlig A.: Näherungsweise Berechnung der Rundknetkraft aus der Fläche und dem mittleren Druck, Bänder Bleche Rohre, t. 6, 1965, 4, s. 200-206.
121. Uhlig A.: Zur Berechnung und Messung der Werkzeugkräfte beim Rundkneten, Bänder Bleche Rohre, 1965, 2, s. 87-92.
122. Uhlig A.: Werkzeugbewegungen und erzeugbare Formen beim Rundkneten, Werkstatt und Betrieb, t. 98, 1965, 5, s. 299-304.
123. Unksow Je. P.: Inżeniernyje metody rasczota usilia pri obrabotkie mietalłow dawlienijem, Maszgiz., Moskwa 1959.
124. Wusatowski R.: Nauka przeróbki plastycznej w służbie nowoczesnego przemysłu hutniczego, Archiwum Hutnictwa, t. 31, 1986, 4, s. 549-566.
125. Zjuzin V., i inni: Soprotiwlenie plasticzeskoj deformacji mietalłow i splawow, Miietalłurgia, Moskwa 1964.
126. Zwieriajew N.F.: Napraźiennoje sostojanie i usilie deformacji pri rotacyonnoj kowkie, Trudy Leningradskogo Politiechniczeskogo Instituta, 1964, 238, c. 73-80.

ZASTOSOWANIE NUMERYCZNEJ SYMULACJI DO ANALIZY I PROJEKTOWANIA TECHNOLOGII KUCIA W KOWARKACH

Streszczenie

Przeanalizowano zagadnienia związane z opracowaniem programu wspomagania projektowania technologii kucia w czterokowadełkowych kowarkach do wstępnego przerobu, zapewniającej uzyskanie wyrobu o założonych własnościach, determinowanych zjawiskami występującymi lokalnie w kotlinie odkształcenia. Taki sposób rozwiązania projektowania technologii kucia wymaga przeprowadzenia komputerowej symulacji procesu kowarkowego.

Na podstawie analizy danych literaturowych oraz rezultatów wstępnych prac własnych sformułowano tezę, że termomechaniczna symulacja procesu płynięcia metalu w kotlinie odkształcenia, przy użyciu metody elementów skończonych dla zagadnień osiowo-symetrycznych, stwarza racjonalne podstawy projektowania technologii kucia w czterokowadełkowej kowarce do wstępnego przerobu, z uwzględnieniem występujących lokalnie zmian stanu naprężenia i odkształcenia oraz temperatury, w zależności od własności reologicznych oraz cieplnych odkształcanego materiału, technologicznych warunków procesu kucia, a także geometrii oraz kinematyki wzajemnego ruchu kowadeł i odkształcanego materiału. Opierając się na przyjętych założeniach, opracowano model procesu uwzględniający warunki, specyfikę oraz charakterystyczne cechy kucia w kowarce. Zastosowanie metody elementów skończonych dla zagadnień osiowo-symetrycznych, do modelowania kucia w kowarce przy podawaniu materiału ruchem prostym oraz ruchem złożonym pozwoliło na wyznaczenie podstawowych charakterystyk rozkładu naprężenia, prędkości odkształcenia, intensywności odkształceń lokalnych, prędkości przemieszczeń metalu oraz temperatury pasma i siły kucia. W procesie modelowania uwzględniono przenoszenie skutków oraz historii odkształcenia na kolejne etapy kształtowania, tzn. podania oraz przepusty.

Przyjęte założenia modelu oraz warunki obliczeń poddano weryfikacji doświadczalnej. Otrzymane wyniki obliczeń porównano z wynikami prób kucia w warunkach ruchomych. Do weryfikacji wykorzystano zarówno wyniki badań własnych, jak i wyniki prezentowane w literaturze. W zakresie badań odkształceń lokalnych dokonano porównania wyników obliczeń z wynikami pomiarów odkształceń określonych metodą prętów składanych. Weryfikacji poddano również otrzymane rozkłady temperatur na przekroju pasma, porównując je z wynikami pirometrycznych pomiarów temperatury powierzchni prętów. W badaniach weryfikujących analizie poddano także zmiany siły kucia. Uzyskane w badaniach wyniki pomiarów wykazały zgodność z wynikami symulacji, potwierdzając słuszność przyjętych założeń. Droga obliczeń wykazano, że symulacja procesu kowarkowego przeprowadzona na podstawie warstwowo modelowanej kotliny odkształcenia stwarza podstawy racjonalnego doboru technologii kucia, z uwzględnieniem bezpieczeństwa technologicznego procesu oraz wymagań w zakresie kucia prętów o założonym rozkładzie odkształceń na przekroju. Z kolei symulowane rozkłady odkształceń lokalnych oraz stan naprężenia w powiązaniu z przyjętą metodą oceny struktury stali narzędziowych kutech w kowarkach stworzyły możliwość analizy wpływu projektowanej technologii na gotowy wyrób, a ściślej, na strukturę prętów ze stali narzędziowych, wypełniając cel pracy w części dotyczącej ujęcia w projektowaniu technologii lokalnych zjawisk termomechanicznych występujących w kotlinie odkształcenia. Wyniki obliczeń numerycznych oraz badań testowych i weryfikujących potwierdziły przyjętą tezę pracy, dając zarazem podstawę do wykorzystania symulacji komputerowej przy opracowywaniu programu wspomagania projektowania technologii kucia w kowarce. Opracowany program stanowi próbę rozwiązania problemu projektowania technologii z uwzględnieniem zjawisk lokalnych, zaś uzyskane wyniki laboratoryjnej i przemysłowej weryfikacji potwierdzają jego przydatność.

APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION FOR ANALYSIS AND DESIGNING TECHNOLOGIES OF FORGING IN SWAGING MACHINES

Abstract

There were analyzed issues concerning elaboration of aid software for designing technology of forging in four-anvil swaging machines for initial processing which guarantees products of previously assumed properties determined by phenomena occurring locally in the deformation gap. This way of designing of forging technologies requires computer simulation of the forging process.

Basing on literature data and results of our primary studies we submitted a proposition that thermomechanical simulation of metal flow in the deformation gap, using the method of finite elements for axial-symmetry, creates a good basis for designing technologies of forging in a four-anvil swaging machine for initial processing taking into account local changes of stress and strain stages as well as temperature versus rheologic and thermal features of the material deformed, versus conditions of the forging process and geometry and kinematics of movements of anvils and the material. Basing on the accepted assumptions a model of the process was elaborated taking into account conditions, peculiarity and characteristic features of forging in a swaging machine. Application of the method of finite elements for axial-symmetry issues to a model forging in a swaging machine at simple and complex feed enabled to obtain basic characteristics of stress distribution, speed of deformation, intensity of local strains, speed of the material movement and temperature of the strip and strength of forging. In the modelling process transfer of results and deformation history for next stage of forming i.e. feed and pass were included.

The accepted assumptions and calculation conditions were verified experimentally. The results obtained from calculations were compared with the results of forging tests in industrial conditions. For the verification our own results and literature data were used. As far as the stress distribution was concerned the results of calculations were compared with the results of measurements of local strains obtained by the composed rods method. Also the obtained distributions of temperature at the strip section were verified by comparison with results of pyrometric measurements of temperature of the rod surface. Changes of the forging force were also analyzed. The results of tests were in a good agreement with the simulation results which meant that the primary assumptions had been properly made. It was shown by calculations that simulation of the forging process in a swaging machine carried out basing on a spatially modelled deformation gap creates basis for a proper choice of a forging technique taking into account safety of the process as well as requirements concerning of rod forging with a given distribution of stresses at the rod cross-section. Then, the simulated distributions of local strains and the stress state in a connection with the used method of evaluation of structure of the tool steels forged in swaging machines allowed to analyze the influence of designed technology on a final product, and more exactly - on structure of rods of tool steel. Thus the aim of the work has been obtained in the part which concerned including local thermomechanical phenomena occurring in the deformation gap into designing of the technology.

UTILISATION DE LA SIMULATION NUMERIQUE A L'ANALYSE ET L'ETUDE DE LA TECHNOLOGIE DE FORGEAGE SUR LES FORGEUSES

Résumé

On a analysé les problèmes liés à l'élaboration du logiciel d'assistance de l'étude de la technologie de forgeage sur les forgeuses à quatre bigorneaux pour un prétraitement assurant l'obtention d'un produit aux caractéristiques prévues définies par les phénomènes se manifestant localement dans l'emprise de déformation. Une telle approche fait la résolution de l'étude de la technologie de forgeage nécessite d'effectuer une simulation informatique du procédé de forgeage.

Suite à l'analyse des données contenues dans la littérature et des résultats des propres travaux préliminaires, on a exprimé la thèse que la simulation thermomécanique du processus d'écoulement du métal dans l'emprise de déformation en utilisant la méthode des éléments accomplis pour les questions axiales-symétriques sur la forgeuse à quatre bigorneaux pour le prétraitement compte tenu des variations locales de l'état de contrainte et de déformation ainsi que de la température en fonction des caractéristiques rhéologiques et thermiques de la matière déformée, des conditions technologiques du procédé de forgeage aussi bien que de la géométrie et de la cinématique du mouvement réciproque des bigorneaux et de la matière déformée. Selon les données de base adoptées, on a élaboré le modèle du procédé tenant compte des conditions, de la spécifique ainsi que des caractéristiques du forgeage sur la forgeuse. L'utilisation de la méthode des éléments accomplis pour les questions axiales-symétriques, pour le modelage de forgeage sur la forgeuse en amenant la matière par un mouvement simple et un mouvement complexe ont permis de définir les caractéristiques de base de la répartition de la contrainte, de la vitesse de déformation, de l'intensité des déformations locales, de la vitesse de déplacements du métal ainsi que de la température de la bande et de l'effort de forgeage. Dans le processus de modelage, on a tenu compte du transfert des conséquences ainsi que de l'histoire de forgeage sur les étapes successives de formage c'est à dire l'amenée et passe.

Les données de base adoptées pour le modèle et les modalités de calcul ont été vérifiées par voie expérimentale. Les résultats de calculs obtenus ont été vérifiés par rapport aux résultats de forgeage dans les conditions opératoires. Pour la vérification, on a employé aussi bien les résultats de nos propres essais que de ceux présentés dans la littérature. En ce qui concerne la répartition de déformations, on a comparé les résultats des calculs avec les résultats des mesures de déformations locales définies par la méthode des barres composées. On a vérifié également les répartitions de températures à la section de la bande en les comparant avec les résultats de mesures pyrométriques de températures de la surface des barres. Au cours des essais de vérification, on a également analysé les variations de l'effort de forgeage. Les résultats de mesures obtenus au cours des essais ont démontré la conformité aux résultats de la simulation en confirmant l'exactitude des données de base adoptées. Les répartitions de déformations locales simulées ainsi que l'état de contrainte en association avec la méthode adoptée de l'évaluation de la structure des aciers à outil forgés sur les forgeuses ont permis ensuite d'analyser l'influence de la technologie étudiée sur le produit fini et plus précisément sur la structure des barres en aciers d'outil en réalisant le but du mémoire en ce qui concerne la prise en compte des phénomènes thermomécaniques locaux intervenant dans l'emprise de déformation au cours de l'étude de la technologie. Les résultats des calculs numériques ainsi que ceux des tests et des essais de vérification ont confirmé la thèse adoptée dans le mémoire, en créant en même temps la base pour l'utilisation de la simulation informatique à l'élaboration du logiciel d'assistance de l'étude de la technologie de forgeage sur la forgeuse. Le logiciel élaboré c'est un essai de résolution du problème de l'étude de la technologie compte tenu des phénomènes locaux tandis que les résultats des vérifications en laboratoire et industrielle confirment bien son utilité.

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej

P3353/96/52