

**TECHNOLOGIA
OBRÓBKI WAŁÓW
O MAŁEJ SZTYWNOŚCI**



Antoni Świć

**TECHNOLOGIA
OBRÓBKI WAŁÓW
O MAŁEJ SZTYWNOŚCI**

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej

LUBLIN 2009

RECENZENCI:

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Banaszak

Politechnika Warszawska

Prof. dr hab. inż. Andrzej Buchacz

Politechnika Śląska

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

Opracowanie redakcyjne: mgr Tomasz Kusz

Zabrania się reprodukcji w każdej formie i za pomocą jakichkolwiek środków technicznych oraz rozpowszechniania całości lub fragmentów niniejszego opracowania bez zgody posiadaczy praw autorskich.

**© Copyright by Politechnika Lubelska
Lublin 2009**

ISBN 978-83-7497-084-6

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej
20-109 Lublin, ul. Bernardyńska 13
e-mail: wydawnictwo@pollub.pl

SPIS TREŚCI

WSTĘP	8
1. SPECYFIKA TECHNOLOGII OBRÓBKİ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI	11
1.1. Specyfika i wymagania dokładności technologicznej obróbki toczeniem wałków o małej sztywności	11
1.2. Badanie metod zapewnienia dokładności zautomatyzowanej obróbki tokarskiej z wykorzystaniem tablic analizy	31
1.3. Klasyfikacja metod sterowania dokładnością zautomatyzowanej obróbki tokarskiej wałków o małej sztywności	34
1.4. Naprężenia szczątkowe w procesie technologicznym wykonania wałków o małej sztywności	38
1.5. Procesy technologiczne stosowane do stabilizacji kształtów i wymiarów części długowymiarowych o małej sztywności	44
1.6. Podsumowanie	47
2. PODSTAWY TEORETYCZNE METOD STEROWANIA DOKŁADNOŚCIĄ ZAUTOMATYZOWANEJ OBRÓBKİ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI	49
2.1. Metodologia budowy modeli matematycznych obróbki wałków sprężyste – odkształcalnych przy warunkach ustalonych	49
2.2. Uzasadnienie teoretyczne metody sterowania dokładnością obróbki wałków sprężyste – odkształcalnych	53
2.3. Metody technologiczne podwyższenia dokładności obróbki wałków sprężyste – odkształcalnych na etapie przygotowania produkcji.....	72
2.4. Podsumowanie	84
3. ŚRODKI AUTOMATYZACJI I STEROWANIA OBRÓBKĄ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI W STANIE SPRĘŻYŚCIE – ODKSZTAŁCALNYM	86
3.1. Sposoby obróbki skrawaniem części o małej sztywności w stanie sprężyste – odkształcalnym	86
3.2. Metoda technologiczna sterowania dokładnością obróbki wałków o małej sztywności	87
3.3. Układy sterowania automatycznego obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężyste – odkształcalnym	90
3.4. Oprzyrządowanie do obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężyste – odkształcalnym	95
3.4.1. Konik tokarki do obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężyste – odkształcalnym	95
3.4.2. Konik tokarki o napędzie elektromechanicznym w postaci elektrycznego silnika liniowego	97

SPIS TREŚCI

3.4.3. Konstrukcja konika tokarki z wykorzystaniem muskułu pneumatycznego	99
3.4.4. Konstrukcja konika tokarki do obróbki wałków w stanie sprężystości – odkształcalnym	101
3.4.5. Konik tokarki z napędem elektromechanicznym	103
3.4.6. Konik obrabiarki z napędem pneumatycznym.....	106
3.4.7. Konik tokarki konwencjonalnej do obróbki wałków w stanie sprężystości – odkształcalnym	107
3.4.8. Konstrukcja konika tokarki z drgającym krokowym napędem pneumatycznym o działaniu liniowym	111
3.5. Podsumowanie	114
4. TECHNOLOGIA OBRÓBKİ WAŁÓW DŁUGOWYMIAROWYCH	115
4.1. Modułowa technologia wytwarzania długowymiarowych wałów o małej sztywności	115
4.2. Obróbka tokarska wałów o małej sztywności	117
4.2.1. Teoretyczne uzasadnienie sterowania obróbką wałów o małej sztywności	121
4.2.2. Praktyczna realizacja obróbki długowymiarowych wałów o małej sztywności	127
4.3. Sterowanie obróbką wibracyjną wałów o małej sztywności	130
4.3.1. Podwyższenie stabilności wałów o małej sztywności przy obróbce wibracyjnej	131
4.3.2. Uzasadnienie metody obróbki wibracyjnej wałów o małej sztywności	134
4.3.3. Sposób obróbki wibracyjnej wałów długowymiarowych	141
4.3.4. Urządzenie do obróbki wibracyjnej wałów długowymiarowych o małej sztywności	145
4.4. Technologiczna dziedziczność przy obróbce wałów i zalecana kolejność operacji	147
4.4.1. Modelowanie prawidłowości dziedziczenia z zastosowaniem teorii grafów	147
4.4.2. Przykład wpływu dziedziczności technologicznej w czasie wytwarzania części precyzyjnych	150
4.5. Kształtowanie struktury operacji procesu technologicznego obróbki wałów	157
4.6. Obróbka cieplno – siłowa	164
4.6.1. Określenie analityczne prostoliniowości osi wału przy obróbce cieplno – siłowej	165
4.6.2. Nowoczesne technologie obróbki cieplno – siłowej wałów długowymiarowych	170
4.6.3. Sposób obróbki cieplno – siłowej wałów długowymiarowych o małej sztywności	175
4.6.4. Obróbka cieplno – siłowa osiowosymetrycznych części wielostopniowych	178
4.7. Podsumowanie	183

SPIS TREŚCI

5. MODELE MATEMATYCZNE PROCESU TECHNOLOGICZNEGO OBRÓBKİ CIEPLNO – SIŁOWEJ	184
5.1. Specyfika i wymagania dokładności obróbki wałów o małej sztywności ..	184
5.2. Analiza teoretyczna i modele matematyczne procesów obróbki cieplno – siłowej	197
5.3. Model układu dynamicznego obróbki cieplno – siłowej	209
5.4. Ocena analityczna prostoliniowości osi wału o małej sztywności przy jego hartowaniu w urządzeniu	218
5.5. Podsumowanie	223
ZAKOŃCZENIE	224
Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	228
LITERATURA	229
STRESZCZENIE	242
SUMMARY	243
АННОТАЦИЯ	244

WSTĘP

Połowa wszystkich części maszyn to elementy obrotowe: wały (ok. 40%), tarcze, tuleje, cylindry itp. Wśród nich do 12% stanowią wały o małej sztywności.

Bardzo ważnym, a jednocześnie złożonym zagadnieniem jest dokładność obróbki i niezawodność eksploatacyjna wałów o małej sztywności, dosyć szeroko stosowanych w wielu zespołach różnych maszyn i urządzeń.

Wały o małej sztywności znajdują zastosowanie w:

- przemyśle lotniczym,
- mechanice precyzyjnej,
- przemyśle narzędziowym (narzędzia specjalne),
- przemyśle motoryzacyjnym.

Charakteryzują się one nieproporcjonalnością wymiarów gabarytowych oraz małą sztywnością w określonych przekrojach i kierunkach. Wysokie wymagania stawiane są również w zakresie parametrów kształtu geometrycznego, wzajemnego położenia powierzchni, wymiarów liniowych i jakości powierzchni.

Specyfika obróbki podobnych części powoduje, że utrudnione jest uzyskanie wymaganych parametrów dokładności kształtu, wymiarów i jakości powierzchni. Mała sztywność własna oraz względnie niska sztywność wału, w porównaniu ze sztywnymi zespołami obrabiarki, powodują powstawanie w określonych warunkach drgań. Proces obróbki zakłóca i destabilizuje wiele czynników (duże odkształcenia własne wałków, narzędzie, przyrząd, wióry, pył itp.), co wpływa na zmniejszenie dokładności obróbki.

Tradycyjne metody osiągnięcia dokładności obróbki wałków o małej sztywności, wykorzystujące obróbkę wieloprześciową, obniżone parametry obróbki, podtrzymki oraz dodatkowe zabiegi i ręczne docieranie, powodują istotne obniżenia wydajności, a w wielu przypadkach nie jest możliwe uzyskanie zakładanego wyniku, to znaczy wymaganej niezawodności; nie odpowiadają również współczesnym wymogom automatyzacji, są nieekonomiczne i mało wydajne.

Wymusza to poszukiwanie nowych metod obróbki wałków o małej sztywności. Niektóre z takich rozwiązań przedstawiono w niniejszym opracowaniu.

Monografia jest syntetyczną prezentacją prac prowadzonych przez autora z zakresu technologii wytwarzania części o małej sztywności.

Ze względu na wymiary rozpatrywanych elementów w rozdziałach 1, 2, i 3 stosowane jest określenie wałki, a w rozdziałach 4 oraz 5 – wały.

W rozdziale 1 omówiono specyfikę i wymagania dokładności obróbki toczeniem wałków o małej sztywności; scharakteryzowano metody zapewnienia dokładności zautomatyzowanej obróbki tokarskiej; przedstawiono: klasyfikację metod sterowania dokładnością zautomatyzowanej obróbki tokarskiej wałków o małej sztywności, wpływ naprężeń szczątkowych na wykonanie wałków o małej sztywności oraz procesy technologiczne, stosowane do stabilizacji kształtów i wymiarów części.

Rozdział 2 zawiera: podstawy teoretyczne metod sterowania dokładnością obróbki wałków o małej sztywności, w tym: metodologię budowy modeli matematycznych obróbki wałków sprężyste – odkształcalnych przy warunkach ustalonych, podstawy teoretyczne metody sterowania dokładnością obróbki wałków sprężyste – odkształcalnych, metody technologiczne podwyższenia dokładności obróbki wałków sprężyste – odkształcalnych, na etapie przygotowania produkcji.

W rozdziale 3 scharakteryzowano sposoby obróbki skrawaniem części o małej sztywności w stanie sprężyste – odkształcalnym. Przedstawiono metodę technologiczną sterowania dokładnością obróbki wałków o małej sztywności, układy sterowania automatycznego obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężyste – odkształcalnym, oprzyrządowanie do obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężyste – odkształcalnym, czyli opracowane konstrukcje koników do tokarek, przeznaczone do stosowania przy różnych warunkach produkcji.

W rozdziale 4 przedstawiono zagadnienia związane z technologią obróbki wałów długowymiarowych. Pokazano: modułową technologię wytwarzania długowymiarowych wałów o małej sztywności, podstawy sterowania obróbką wibracyjną wałów o małej sztywności, wpływ dziedziczności technologicznej przy obróbce wałów i zalecaną kolejność operacji w procesie technologicznym; nowoczesne technologie obróbki cieplno – siłowej wałków długowymiarowych o małej sztywności.

Rozdział 5 zawiera opracowane modele statyczne i dynamiczne obróbki cieplno – siłowej. Przedstawiono nowe podejście do budowy modeli matematycznych opisujących, przy pomocy transmitancji operatorowych i schematów strukturalnych, części sprężyste i niesprężyste, umożliwiających zastosowanie metody częstotliwościowej do oceny zachowania półfabrykatu jako ciała sztywnego oraz określenie analityczne prostoliniowości osi wału o małej sztywności przy jego hartowaniu w odpowiednim urządzeniu. Przedstawiono specjalne przyrządy do prostowania gorącego półfabrykatu w temperaturze hartowania oraz stabilizacji cieplnej w temperaturze odpuszczania.

Wiele opracowanych i przedstawionych w pracy rozwiązań, w tym umożliwiających zmniejszenie ilości operacji procesu technologicznego (podtrzymka hydrauliczna samoosiująca, konstrukcje koników tokarskich umożliwiających uzyskanie parametrów dokładnościowych przy obróbce wałków przy odpowiednio wysokich parametrach skrawania – obróbkę z wysoką wydajnością, specjalne przyrządy do prostowania gorącego półfabrykatu w temperaturze hartowania oraz stabilizacji cieplnej w temperaturze odpuszczania) może być zastosowanych w licznych przedsiębiorstwach przemysłowych, w których wytwarzane są wałki o małej sztywności.

Monografia jest przeznaczona dla specjalistów zajmujących się problematyką projektowania technologii wytwarzania wałków o małej sztywności, doktorantów oraz studentów kierunków mechanika i budowa maszyn, automatyka i robotyka oraz inżynieria produkcji.

1. SPECYFIKA TECHNOLOGII OBRÓBKİ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

1.1. Specyfika i wymagania dokładności obróbki toczeniem wałków o małej sztywności

Pod pojęciem dokładności (niezawodności technologicznej) obróbki wałków o małej sztywności rozumie się osiągnięcie wymaganej dokładności kształtu, wymiarów i jakości powierzchni części wytwarzanych przy stabilnym funkcjonowaniu układu technologicznego (UT – tzw. OUPN). Stabilność układu technologicznego wyklucza pojawianie się niebezpiecznych i szkodliwych czynników produkcyjnych, prowadzących do powstania sytuacji awaryjnych i obniżenia poziomu bezpieczeństwa produkcji, co zwiększa dokładność obróbki oraz niezawodność eksploatacyjną obrobionych części i całego wyrobu.

Na podstawie analizy wielu wyrobów przemysłowych można stwierdzić, że połowa wszystkich części maszyn stanowią części obrotowe: wały (ponad 40%), tarcze, tuleje, cylindry cienkościenne, obręcze itp.

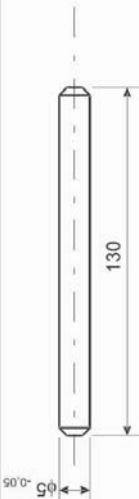
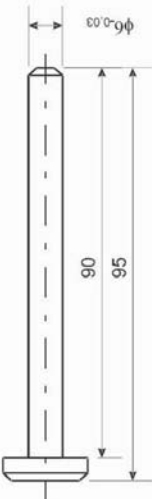
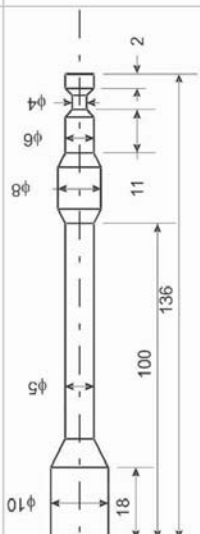
W przemyśle maszynowym części osiowo – symetryczne stanowią około 34% ogólnej ilości części, wśród nich do 12% można zaliczyć do wałków o małej sztywności [125].

Części o małej sztywności (tab. 1.1 i 1.2) znajdują zastosowanie w przemyśle lotniczym (wałki sprężynujące, elastyczne i skrętne, resory, śruby), przemyśle narzędziowym (różnego rodzaju przyrządy, mechanizmy, narzędzia precyzyjne i specjalne, wiertła, rozwiertaki, gwintowniki, wytaczadła), przemyśle maszynowym (wałki, wirniki turbin i pomp, śruby pociągowe), w maszynach rolniczych (półosie traktorów, kombajnów), przemyśle motoryzacyjnym i pochodnych.

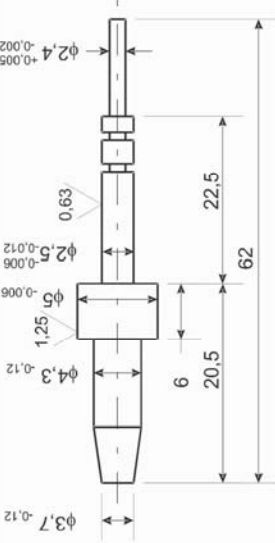
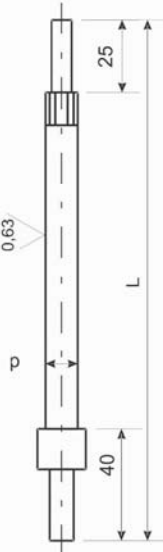
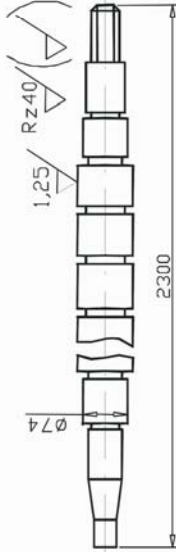
Mimo różnorodnego przeznaczenia funkcjonalnego i różnic konstrukcyjnych części te mogą być zaliczone do jednej grupy, według jednolitego wyróżnika klasyfikacyjnego – kształtu (ciała obrotowe). Wysokie wymagania stawiane są w zakresie dokładności kształtu i położenia powierzchni, wymiarów liniowych i jakości warstwy wierzchniej części o małej sztywności. Wałki o małej sztywności wykonuje się najczęściej ze stali niestopowych lub stopowych o wysokiej wytrzymałości. Podstawowymi metodami obróbki takich części są toczenie zewnętrzne wzdłużne i szlifowanie zewnętrzne. Przy tym dokładność obróbki toczeniem powinna odpowiadać od 8 do 11 klasy dokładności, przy chropowatości $R_a = 0,63 - 2,5 \mu\text{m}$, a operacja szlifowania powinna zapewniać 5 – 6 klasę dokładności przy chropowatości $R_a \leq 0,63 \mu\text{m}$.

Operacje tokarskie określają dokładność kolejnych operacji (szlifowania), a w wielu przypadkach toczenie jest końcowym rodzajem obróbki.

Tab. 1.1. Przykłady charakterystycznych części z klasyfikacji wałków o małej sztywności

1	Nr	Nazwa części	Szkic	Materiał	L mm	d mm	$K = \frac{L}{d}$	ω $\mu\text{m}/\text{N}$	ω HRC
I – części nośne	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	Oś		Stal C45 1X17H2	130	5	26,0	7,00	
	2	Oś		Stal C45	95	$d_{np}=6,2(1,2)$	15,3	1,15	
	3	Oś		50HFA	136	6	22,7	3,80	

Tab. 1.1. c.d. Przykłady charakterystycznych części z klasyfikacji wałków o małej sztywności

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I – części nośne	4	Wałek – wirnik		1X17H2	62	$d_{hp}=3,2 (1,3)$	19,3	4,49	
	5	Wałek – wirnik		Stal C45 14X17H2	170	$10^{+0,012}_{+0,002}$	17,0	0,98	
	6	Wałek – wirnik		30H4A40X	2300 (2500)	74 (90)	31	0,80	

Tab. 1.1. c.d. Przykłady charakterystycznych części z klasyfikacji wałków o małej sztywności

1	2 – części elastyczne sprężyste	3	4	5	6	7	8	9	10
7	Wałek elastyczny		35XNM	35	$d_{np}=0,5 (1,3)$	62,5	889,70	33-37 HRC	
8	Wałek uzębiony			81,5	$d_{np}=4,42 (1,3)$	18,4	2,83	33-37 HRC	
9	Sruba kotwowa silnika		18X2H4WA	464	18	25,8	1,9	33-37 HRC	
10	Sruba		18X2H4WA	870	22	39,8	5,1	33-37 HRC	
4 – części łączące									
3 – części napędowe									

Tab. 1.2. Narzędzia trzpieniowe

Nr	Nazwa części	Szkic	Materiał	L [mm]	d [mm]	d ₂ [mm]	d ₁ [mm]	H [mm]	$K = \frac{L}{d}$	ω , [µm/N]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Gwintowniki bezwiorowe maszynowo – ręczne		R6M5 R9 9XS	36 40 45 48	1,0-1,2 1,4-2,0 2,2-2,5 3	d _{prz} =1,68	2,24 2,24 2,8 3,15		d _p =168 L=35,9 K=21,4	
2.	Gwintowniki bezwiorowe do nakrętek		R6M5 R9 9XS	129 160 180 200 220 250	3 4 5 6 8 10	2,24 2,8 3,6 4,5 6,3 8,0	2,24 2,8 3,55 4,5 6,3 8,0		d _p =8,2 L=250 K=30,5	
3.	Rozwiertaki zdzieraki jednolite		9XS	65±107	3 ... 5		3,5		d _p =3,88 K=25,8	
4.	Rozwiertaki zdzieraki jednolite		9XS	156±168	8 ... 10				d _p =8,6 K=18,54	
5.	Rozwiertak		R6M5	80	d _{prz} =2,29				34,9	

Większości wałków, przedstawionych w tab. 1.1 i tab. 1.2, stawiane są wysokie wymagania dokładności (5 – 6 klasa) i chropowatości ($R_a \leq 0,63 \mu\text{m}$); po operacji szlifowania części nie powinny mieć mikropęknięć, przypaleń i innych defektów powierzchni. Metodami obróbki, spełniającymi te wymagania są: toczenie, a następnie szlifowanie zewnętrzne. Jednak połączenie niestabilnych procesów toczenia i szlifowania części o małej sztywności powoduje powstanie dosyć złożonego układu technologicznego, zachowania którego w procesie skrawania a priori praktycznie nie można przewidzieć [110, 170].

Wartość podatności wałka określa się w przypadku przyłożenia obciążenia F w jego środku, kiedy $x = L/2$ ($\varepsilon = x/L = 0,5$)

$$\omega = \frac{L^3}{48EI} = 2 \cdot 10^{-3} \left(\frac{K^3}{d} \right) \frac{\mu\text{m}}{N} \quad (1.1)$$

gdzie: $K = L/d$, d – średnica części, E – moduł sprężystości,
 I – moment bezwładności przekroju.

Przy obróbce wałków stopniowanych określana jest ich średnica zredukowana; i tak w przypadku wałków o większej średnicy z jednej strony

$$d_s = \frac{d_1 L_1 + d_2 L_2 + \dots + d_i L_i}{L}, \quad (1.2)$$

w środku wałka

$$d_s = \sqrt{\frac{d_1^2 l_1 + d_2^2 l_2 + \dots + d_i^2 l_i}{L}} \quad (1.3)$$

gdzie: $d_1, d_2, \dots, d_i$ – średnice stopni wałka, $l_1, l_2, \dots, l_i$ – długości stopni wałka.

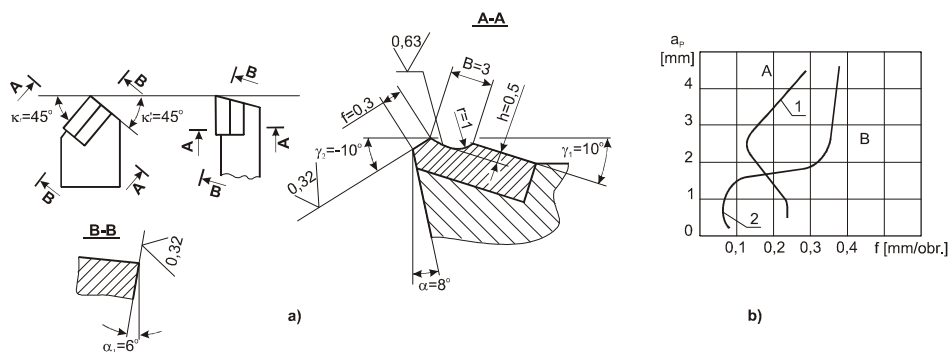
Podstawowym zadaniem klasyfikacji jest sprowadzenie całej różnorodności części, powierzchni i ich połączeń do minimalnej liczby typów, przy których proces obróbki należy rozpatrywać na bazie konkretnego procesu technologicznego i odpowiednich urządzeń technologicznych (tab. 1.1, tab. 1.2).

Przy budowie klasyfikacji technologicznej A. P. Sokołowski przyjął klasy, podklasy, grupy i typy. Klasą nazywa się wszystkie części charakteryzujące się jednolitością zadań technologicznych, rozwiązywanych w warunkach określonej konfiguracji tych części [142]. W klasyfikacji tej przewidziano 15 klas (wały, tuleje, tarcze, kątowniki, części mimośrodowe, krzyżaki, dźwignie, płyty, wpusty, stojaki, wrzecienniki, koła zębate, krzywki kształtowe, śruby pociągowe i ślimaki, drobne części złączne). Akcentuje się przy tym, że w tej uogólnionej w budowie maszyn klasyfikacji, celowe jest wyodrębnienie nowych klas części, charakterystycznych w poszczególnych branżach przemysłu.

Przedstawiona klasyfikacja nie uwzględnia tak ważnego wyróżnika klasyfikacyjnego, jak sztywność części, której szeroki zakres zmian istotnie oddziałuje na wybór i opracowanie procesu technologicznego.

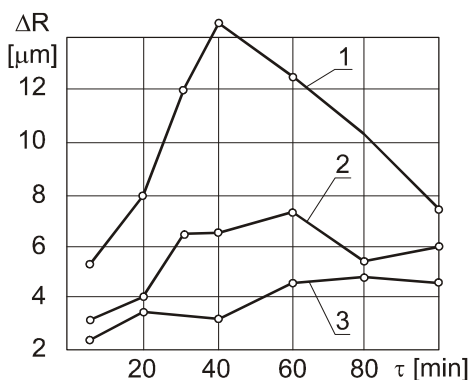
Wybór optymalnej geometrii ostrza umożliwia rozwiązanie problemu powstawania i łamania wiórów w trakcie toczenia. Wióry wstęgowe lub spiralne, nawijając się na część i narzędzie mogą powodować powstanie drgań, uszkodzenie ostrza, zakleszczanie, a także zwiększenie niebezpieczeństwa wypadków. W przypadku przedostania się do mechanizmów (prowadnic) obrabiarki – mogą powodować sytuacje awaryjne.

Przykładową geometrię ostrza noża tokarskiego z płytkami z węgliku spiekanego, umożliwiającego obróbkę stali konstrukcyjnych z rozdrabnianiem wióra, pokazano na rys. 1.1a [7]. Wykresy niezawodnego rozdrabniania wióra, dzielące zakres parametrów skrawania na strefy stabilnego (A) i niestabilnego (B) rozdrabniania wiórów, przedstawiono na rys. 1.1b. Krzywą 1 otrzymano przy toczeniu stali X10CrNi18-8 z prędkością skrawania $v_c = 70 - 130$ m/min, a krzywą 2 – przy toczeniu stali C 45 z $v_c = 130$ m/min.



Rys. 1.1. Ostrze noża tokarskiego przeznaczonego do toczenia wzdłużnego:
a) parametry geometryczne ostrza, b) zakresy niezawodnego
rozdrabniania wiórów przy toczeniu stali X10CrNi18-8 oraz stali C45

Czynnikami, w sposób istotny wpływającymi na dokładność i błędy kształtu geometrycznego obrabianej części, są temperatura nagrzewania się tokarki (długotrwałość jej pracy) oraz wartość zużycia ostrzy. Na rys. 1.2 pokazano zależność błędu kształtu geometrycznego części ΔR , obrabionych na obrabiarkach 1K62 (krzywa 1), 1K625 (krzywa 2), 16K20P (krzywa 3) od długotrwałości działania tych obrabiarek [118].



Rys. 1.2. Zależności błędów kształtu geometrycznego części ΔR od długotrwałości τ pracy obrabiarek

Wytrzymałość ostrza w istotny sposób wpływa na warunki obróbki. Płytki wykonane metodą warstwowego prasowania, a następnie spiekania warstwowych półfabrykatów, posiadają wysoką wytrzymałość (1400–1500 MPa) i odporność na zużycie (HPA 90–91). W celu dodatkowego podwyższenia wytrzymałości płytek na krawędziach skrawających wykonywane są fazki 0,2 mm pod kątem 20° [191]. Zastosowanie pokryw azotkowych i węglkowych zwiększa wytrzymałość ostrza skrawającego, ponieważ zmienia i umacnia strukturę dyslokacyjną stali narzędziowych i stopów narzędziowych. Zwiększenie wytrzymałości osnowy plastycznej ostrza osiągnięte jest w wyniku wstępnego, jonowego azotowania, przed naniesieniem pokryw (trójwarstwowe TiC + TiC + T, jednowarstwowe TiC) lub jonowym azotowaniem płytek z naniesionymi pokryciami, co pozwala zwiększyć trwałość ostrza od 2 do 5 razy [190].

Ciecz smarująco – chłodząca w sposób złożony wpływa na wytrzymałość części skrawającej narzędzia. Zastosowanie cieczy smarująco – chłodzącej na osnowie olejowej powoduje zwiększenie naprężeń kontaktowych σ_n w pobliżu krawędzi skrawającej od 5 do 10% i obniżenia temperatury skrawania od 7 do 12%, co zwiększa zapas wytrzymałości narzędzia. Przy zastosowaniu cieczy na osnowie wodnej naprężenia σ_n zwiększają się o 10%, temperatura skrawania obniża się od 15 do 20%. Ciecze syntetyczne poprawiają warunki skrawania, zmniejszają chropowatość powierzchni obrobionej, zwiększają trwałość narzędzia od 20 do 200%, ułatwiają warunki pracy operatora [63, 80, 82, 139, 141, 177]. Coraz częściej stosuje się obróbkę z minimalnym smarowaniem, które polega na doprowadzaniu cieczy smarująco – chłodzącej w postaci mgły, rzędu 50 ml/h [109, 132, 157, 183].

Prowadzone są badania wpływu dodatku specjalnych aktywatorów do cieczy smarująco – chłodzących na parametry chropowatości powierzchni obrobionej [57, 138].

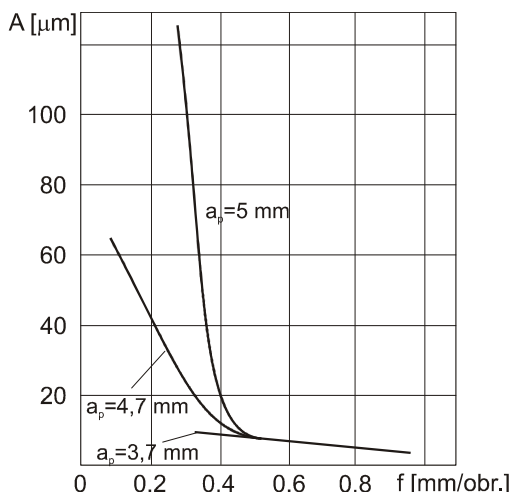
Niedostateczna sztywność zamocowania płytek skrawających oraz odporność ostrza na zużycie są przyczynami powstawania drgań własnych podczas toczenia. W narzędziach z mechanicznym mocowaniem płytek najbardziej istotnym parametrem jest w tym przypadku posuw wzdłużny. Średnia wartość posuwu, przy którym następowało zniszczenie ostrzy z nakrętką beczkową i tuleją centrującą, jest o 12% większa niż w przypadku noży bez mocowania płytki oporowej [103, 111, 155].

Przy małej sztywności wałka, w związku ze zmianą rozkładu wpływu różnych czynników niebezpiecznych i szkodliwych, istotnie wzrasta znaczenie parametrów skrawania, a zakres ich wartości przesuwają się w stronę zmniejszenia v_c , a_p , f . Takie części posiadają najmniejszą sztywność w przekroju poprzecznym, w kierunku działania składowych sił skrawania, które są nie tylko podstawowym źródłem niedokładności kształtu i wymiarów, ale także czynnikiem obniżającym [8]. Z przeprowadzonych badań wynika, że w ciągu okresu trwałości narzędzia T , składowa siła skrawania F_p zwiększa się o około 30%, co prowadzi do zwiększenia odkształceń sprężystych i powoduje powstanie drgań [35, 152, 154, 170].

Na powstanie i intensywność drgań oraz pozostałych czynników niebezpiecznych i szkodliwych wpływają głównie: grubość warstwy skrawanej (posuw f), głębokość skrawania a_p , geometria ostrza, sztywność układu technologicznego, ciecz smarująco – chłodząca [63, 82, 84].

Przy toczeniu stali 41Cr4 (rys. 1.3), z różnymi głębokościami skrawania, ze wzrostem posuwu f od 0,1 do 0,8 mm/obr, amplituda drgań szybko się obniża, a przy posuwie przekraczającym 0,5 mm/obr – praktycznie zanika. Ze zwiększeniem a_p amplituda drgań zwiększa się, w przybliżeniu zgodnie z zależnością liniową. Jednak zupełnie małe wartości a_p (poniżej 0,005 mm) również prowadzą do powstania drgań [33, 97, 109, 148].

Z elementów geometrii ostrza narzędzia skrawającego istotny wpływ na amplitudę drgań mają: kąt natarcia γ , główny kąt przystawienia κ_r i promień naroża r_ϵ [63, 84]. Zmiana kąta natarcia γ od -10° do $+30^\circ$ powoduje zmniejszenie amplitudy od 8 do 10 razy, przy czym największy wpływ γ na drgania obserwuje się w zakresie kątów ujemnych, ponieważ wówczas silnie rosną siły tarcia oraz składowa promieniowa F_p . Obniżenie kąta przyłożenia α wpływa na zmniejszenie amplitudy drgań. Zmniejszenie głównego kąta przystawienia prowadzi do rozszerzenia strefy drgań i zwiększenia ich amplitudy, co jest uwarunkowane wzrostem siły F_p , zachodzącym przy zmniejszaniu κ_r . Zwiększenie promienia zaokrąglenia ostrza r_ϵ wpływa na drgania, podobnie jak zmniejszenie głównego kąta przystawienia κ_r .



Rys. 1.3. Zależność amplitudy drgań od posuwu przy toczeniu stali 41Cr4

Najbardziej efektywny wpływ na zwiększenie odporności układu narzędzie – część na drgania, w trakcie toczenia z bardzo małymi głębokościami skrawania ($a_p < 0,04 \text{ mm}$), ma ciecz smarująco – chłodząca, co jest charakterystyczne podczas obróbki wałków o małej sztywności. Zastosowanie cieczy smarująco – chłodzącej wpływa na obniżenie odpowiednio: amplitudy drgań, siły tarcia i skrawania, odkształcenia części o małej sztywności [15, 141].

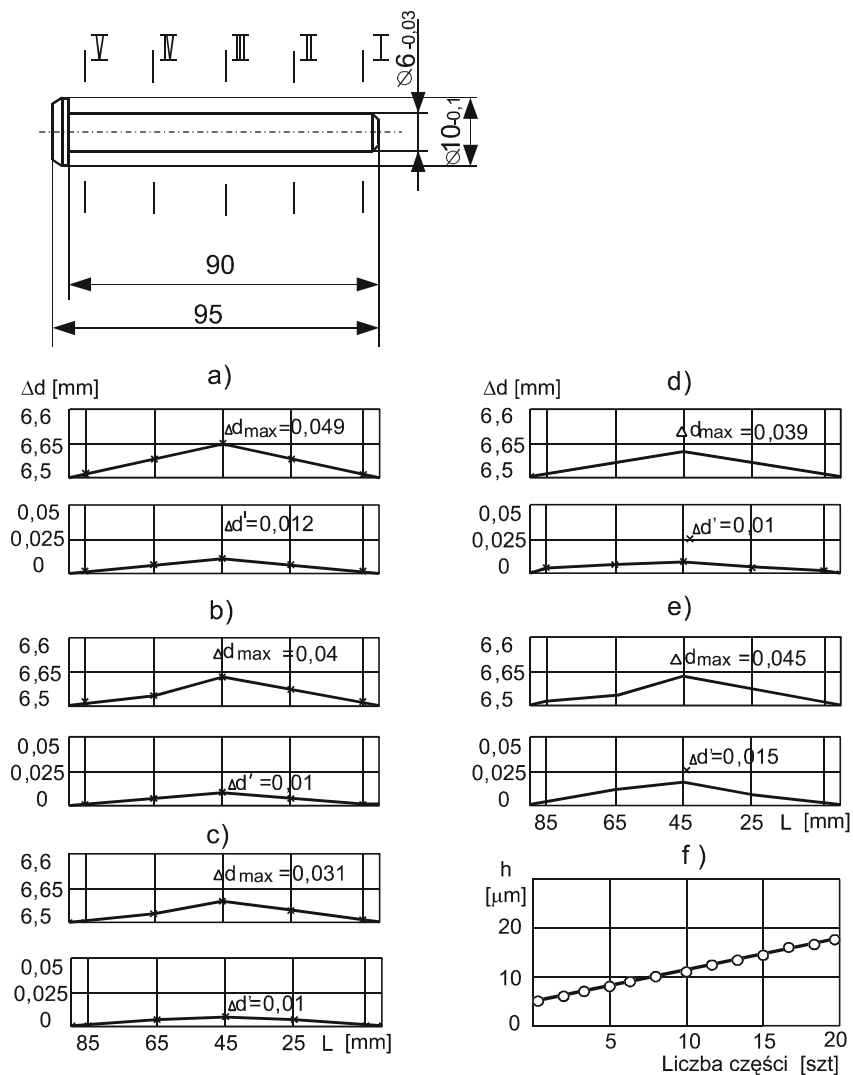
Ze wzrostem sztywności układu technologicznego strefa drgań zawęża się, ich częstotliwość wzrasta, a amplituda zmniejsza. Zastosowanie różnorodnych tłumików drgań, ze sztucznymi opornościami (cierne, hydrauliczne) o działaniu uderowym, a także dynamicznych, nie zwiększa sztywności układu technologicznego i nie likwiduje możliwości przenoszenia niedokładności półfabrykatu na obrabiany element [15, 130]. Podwyższenie dokładności wykonania części i zespołów obrabiarki zwiększa sztywność układu technologicznego w wyniku zwiększenia dokładności wzajemnego położenia narzędzia i części obrabianej [97, 163, 180]. Zwiększenie sztywności i dokładności obrabiarek umożliwia podwyższenie, w pewnym zakresie, niezawodności i dokładności obróbki. W rozpatrywanym przykładzie obróbki części o małej sztywności należy zagwarantować warunki do podwyższenia jej sztywności.

W przedsiębiorstwie produkującym przyrządy mechaniki precyzyjnej, przeprowadzono badania statystyczne błędów obróbki wałka o małej sztywności podczas operacji toczenia. Zgodnie z technologią zakładową obróbka osi (rys. 1.4) ze stali C45 jest wykonywana w dwóch przejściach na obrabiarence 1604. Częściom stawiane są następujące wymagania: dokładność obrobionej powierzchni $\varnothing 6h9$, chropowatość $R_a = 1,25 - 2,5 \mu\text{m}$.

Parametry skrawania są następujące: $v_c = 32$ m/min, $n = 1000$ obr/min, $a_{p1} = 1,75$ mm, $a_{p2} = 0,25$ mm, $f_1 = 0,125$ mm/obr, $f_2 = 0,05$ mm/obr; nóż z płytami z węgla T15K6, $\kappa_r = 90^\circ$, $r_\epsilon = 0,5$ mm.

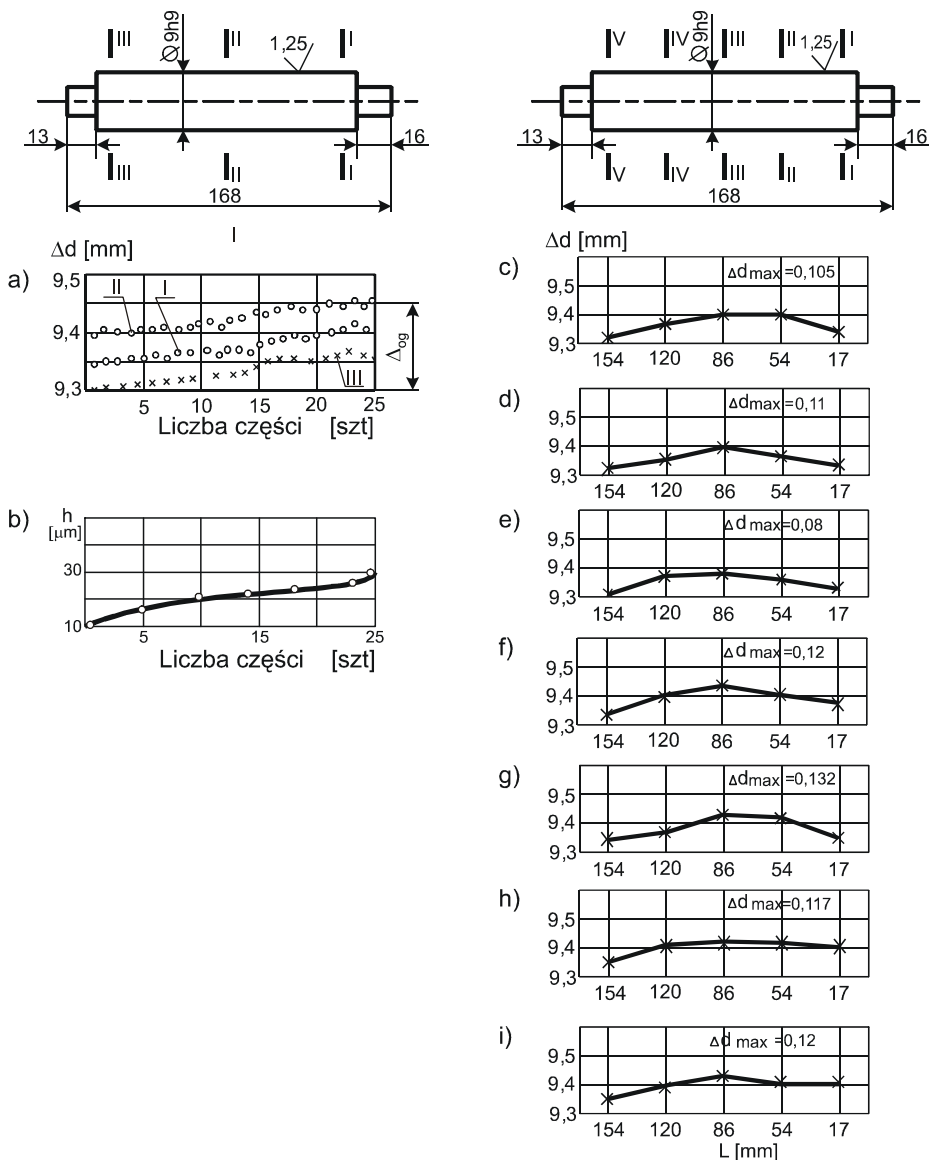
Uwzględniając niewielkie partie obrabianych elementów (od 9 do 40 sztuk w partii, co odpowiada programowi zakładowemu) do zbudowania wykresów punktowych błędu kształtu w przekroju wzdłużnym losowo, wybierano pięć części (rys. 1.4 – a – część 1, b – część 7, c – część 22, d – część 30, e – część 38). Wykresy utworzono zgodnie z metodą umownego zera, za które przyjęto najmniejszą faktyczną średnicę wałka [75, 91. Po pierwszym przejściu błąd kształtu, w przekroju wzdłużnym poszczególnych części, wynosił $\Delta d = 0,035 - 0,051$ mm. Po drugim przejściu $\Delta d' = 0,01 - 0,015$ mm, co odpowiada tolerancji wymiaru $\varnothing 6h9$, równej 0,03 mm. Na rys. 1.4f przedstawiono wykres zmiany chropowatości obrabianych powierzchni. Dominujący błąd, zarówno po pierwszym, jak i po drugim przejściu, wynikał ze zmian nastawienia obrabiarki, głównie odkształceń sprężystych układu technologicznego, spowodowanych odkształceniami części o niewielkiej sztywności. Przy tym wartość odkształceń sprężystych części, podczas pierwszego przyjścia, przewyższa wymaganą tolerancję na obróbkę. Przy zmianie numerów części, losowo wybranych z partii obrabianych półfabrykatów, uzyskiwano podobne wyniki.

Przyjęto następujące parametry obróbki: $v_c = 30$ m/min ($n = 800$ obr/min), $a_p = 1,35$ mm, $f = 0,075$ mm/obr, nóż z płytką T15K6 ($\kappa_r = 90^\circ$, $r_\epsilon = 0,5$ mm), obliczona przy danych warunkach składowa odporowa siły skrawania $F_p = 110$ N. Analogicznie, jak w przypadku obróbki partii osi (rys. 1.4) oraz wałków zbudowano wykresy punktowe pola rozrzutu wymiarów (rys. 1.5a), wykres chropowatości obrabianych powierzchni (rys. 1.5b) oraz wykresy błędów kształtu w przekroju wzdłużnym wałka (rys. 1.5c, d, e, f, g, h, i) w przypadku siedmiu dowolnie wybranych części z partii 45 sztuk. Jak wynika z rys. 1.5 ogólna wielkość pola rozrzutu $\Delta_{og} = 0,14$ mm, przy chropowatości w zakresie $R_a = 3,5 - 5$ μ m. Błąd kształtu, w przekroju wzdłużnym poszczególnych części, wynosił $\Delta d_{max} = 0,08 - 0,132$ mm, w wyniku czego części te są przekazywane na operację szlifowania z nierównomiernym naddatkiem, przekraczającym 0,3 mm, co zwiększa czas i koszt obróbki. Podobną powtarzalność wyników uzyskano w przypadku dowolnych próbek z innych partii obrabianych części.



Rys. 1.4. Wykresy zmian błędu kształtu i chropowatości powierzchni osi

Walek obrabiano (rys. 1.5) w jednym przejściu, ponieważ jako końcowa została przyjęta operacja szlifowania. Element po toczeniu powinien odpowiadać następującym wymaganiom: naddatek na szlifowanie 0,3 mm, chropowatość powierzchni w zakresie $R_a = 2,5 - 5 \mu\text{m}$.



Rys. 1.5. Wykresy zmian błędu kształtu i chropowatości powierzchni wałków

W badaniach procesu szlifowania wałków o małej sztywności, jako obiekt rozpatrywano wałki mikromaszyn elektrycznych (tab. 1.1, poz. 4, 5), na których zaprasowywano (bez dodatkowego mocowania) zespoły wirników. Wałki charakteryzowały się następującymi parametrami geometrycznymi: $d = 2 - 12$ mm, $K = L/d = 15 - 25$, wysoką wymaganą dokładność kształtu ($3 - 5 \mu\text{m}$).

Zgodnie z wymaganiami technicznymi wirniki te powinny wytrzymywać długotrwałe, nawet 10 – krotne przeciążenia. W tym celu powinna być osiągana wysoka trwałość stykowa połączeń prasowanych wałka z zestawem wirnika. Rezultaty badań przemysłowych i eksploatacyjnych pokazują, że jedną z wad takich urządzeń jest naruszenie szczelności posadowienia zespołu wirnika. Prowadzi to do powstawania drgań i pogorszenia charakterystyk technicznych mikromaszyn.

Analizę wpływu sztywności poszczególnych elementów układu technologicznego oraz parametrów skrawania na dokładność obróbki w tym układzie przeprowadzono zgodnie ze schematem – rys. 1.6 [162, 169, 171].

Analityczne wyrażenie funkcji odkształceń w przypadku obróbki wałka w kłach (rys. 1.6a) przy działaniu składowej posuwowej F_f i odporowej (promieniowej) F_p siły skrawania można otrzymać z równania [106]:

$$y'' = -\frac{M(x)}{EI}. \quad (1.4)$$

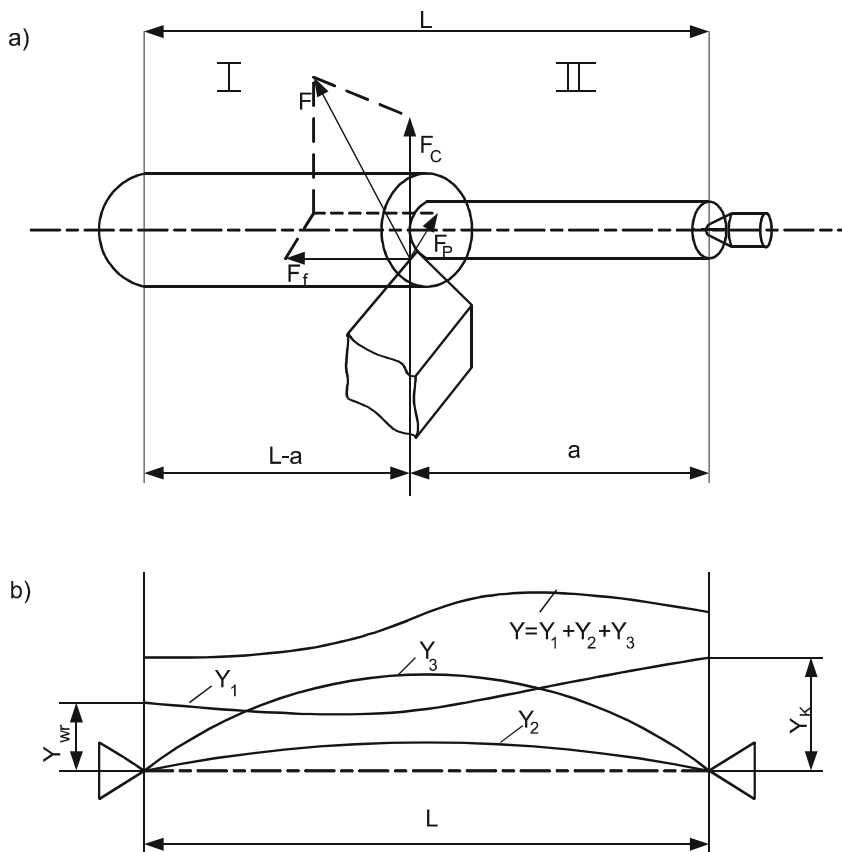
W danym przypadku uwzględnia się momenty zginające odnośnie osi X , ponieważ odkształcenie względem tej osi wykazuje dominujący wpływ na błąd kształtu w przekroju wzdłużnym części.

Konieczność uwzględnienia składowej osiowej siły skrawania F_x , jest spowodowana faktem, że przy obróbce części o małej sztywności, wzajemne działania składowej F_f i siły docisku konika mogą doprowadzić do utraty stateczności. Osiowa składowa F_c siły skrawania powoduje skręcanie części i w danym przypadku nie jest uwzględniana. Rozpatrywany jest tylko wpływ odkształceń zginających na dokładność obróbki.

Zmianę momentów zginających, w zależności od osiowej F_f i odporowej F_p składowych siły skrawania, z uwzględnieniem reakcji każdego z odcinków, można zapisać w postaci:

I odcinek

$$M(x)_I = -\frac{2F_p(L-a) - F_f d}{2L} x_1, \quad (1.5)$$



Rys. 1.6. Schemat sił działających na część (a) i odkształceń sprężystych UT (b) w procesie obróbki toczeniem

II odcinek

$$M(x)_{II} = -\frac{2F_p(L-a) - F_f d}{2L} x_2, \quad (1.6)$$

gdzie: a – odległość od miejsca zamocowania do miejsca działania sił skrawania.

Uwzględniając wyrażenie (1.5) równanie (1.4) można zapisać jako:

$$y'''(x)_I = -\frac{1}{EI} \frac{2F_p(L-a) - F_f d}{2L} x_1. \quad (1.7)$$

Po podwójnym całkowaniu równania (1.4) otrzymano:

$$y'(x)_I = \left(\frac{1}{4} EIL \right) [2F_p(L-a) - F_f d] x_1^2 + C_1, \quad (1.8)$$

$$y(x)_I = \left(\frac{1}{12} EIL \right) [2F_p(L-a) - F_f d] x_1^3 + C_2. \quad (1.9)$$

Stałe całkowania C_1 i C_2 wyznaczono z warunków brzegowych, które w tym przypadku pokrywają się z początkowymi, przy:

$$x = 0, \quad y(0) = R_k \omega_k, \quad x = L \quad y(L) = R_{wr} \omega_{wr}, \quad (1.10)$$

gdzie: $R_{wr} = \frac{2F_p a + F_f d}{2L}$ – reakcja w podporze przedniej,

$R_k = \frac{2F_p(L-a) - F_f d}{2L}$ – reakcja w podporze tylnej,

ω_{wr} i ω_k – podatność odpowiednio w podporze tylnej i przedniej.

Po uwzględnieniu równań (1.6) i (1.7), otrzymano wartości stałych całkowania:

$$C_2 = \frac{2F_p L - F_f d}{2L} \omega_k, \quad (1.11)$$

$$C_1 = \frac{F_p}{L} (\omega_{wr} - \omega_k) + \frac{F_f d}{2L^2} (\omega_{wr} - \omega_k) + \frac{F_f dL}{2EI}.$$

Sprowadzając miejsce określone odległością x_1 do miejsca działania sił skrawania, otrzymano funkcję odkształceń przy $x_1 = a = x$. Równanie (1.9) z uwzględnieniem (1.11) można przedstawić jako:

$$\begin{aligned} y(x) = & -\frac{F_p}{6EIL} x^4 + \left(\frac{F_p}{6EIL} - \frac{F_f d}{12EIL} \right) x^3 + \\ & + \left[\frac{F_p}{L} (\omega_{wr} - \omega_k) + \frac{F_f d}{2L^2} (\omega_{wr} + \omega_k) + \frac{F_f dL}{2EI} \right] x + \frac{2F_p L - F_f d}{2L} \omega_k. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Wprowadzenie współczynników przy x , umożliwia otrzymanie funkcji odkształceń w postaci wielomianu

$$y(x) = Ax^4 + Bx^3 + Cx + D,$$

gdzie:

$A = -\frac{F_p}{6EI L}$; $B = \frac{F_f}{6EI} - \frac{F_f d}{12EI L}$ – współczynniki uwzględniające wpływ momentów zginających, pochodzących od składowych F_f i F_p sił skrawania;

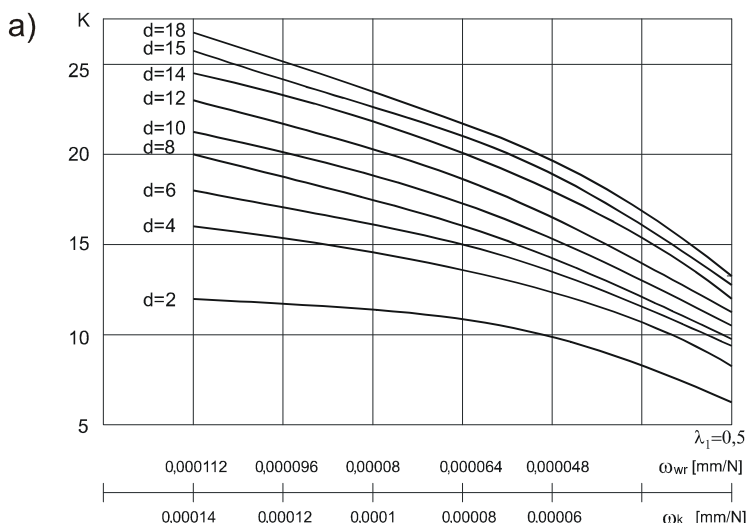
$C = \frac{F_p}{L}(\omega_{wr} - \omega_k) + \frac{F_f d}{2L^2}(\omega_{wr} + \omega_k) + \frac{F_f dL}{2EI}$ – współczynnik uwzględniający wpływ podatności podpór i części;

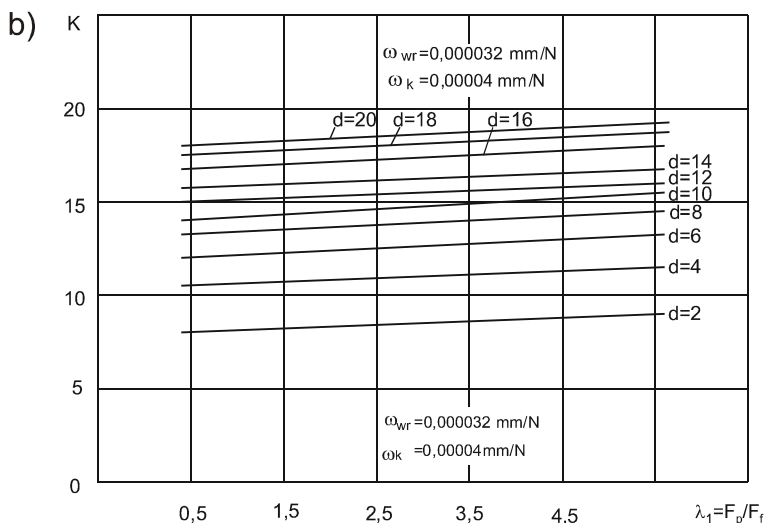
$D = \frac{2F_p L - F_f d}{2L} \omega_k$ – współczynnik uwzględniający zmianę położenia głównej osi obrabiarki, przy ruchu narzędzia w kierunku od konika do wrzeciona.

Efektywne wykorzystanie dokładności obrabiarki wymaga, aby wartości odkształceń sprężystych części nie przewyższały wartości odkształceń węzłów obrabiarki. Oznacza to, że powinien być spełniony warunek:

$$|y(x)|_{\max} \leq y_k, \quad (1.13)$$

co przedstawiono na wykresach – rys. 1.6b, gdzie y_k , y_{wr} , y_1 , y_2 , y_3 – odkształcenia sprężyste odpowiednio: konika, wrzeciona, obrabiarki i części.





**Rys. 1.7. Zależności analityczne zmian maksymalnego stosunku $K = L/d$:
a) w zależności od podatności ogniów układu technologicznego $K = f(\omega)$
przy $\lambda_1 = 0,5$; b) w zależności od parametrów skrawania $K = f(\lambda_1)$**

Na rys. 1.7a przedstawiono zależności analityczne zmiany stosunku $K = \frac{L}{d}$ oraz wartości podatności wrzeciennika ω_{wr} i konika ω_k przy $\lambda_1 = \frac{F_p}{F_f} = 0,5$ [97,

144]. Z ich analizy widać, że przy zmniejszeniu podatności (zwiększeniu sztywności) ogniów układu technologicznego, przy $d = 2 - 18 \text{ mm}$, maksymalny stosunek K może się zmniejszyć nawet dwukrotnie. Wynika z tego, że część o danej średnicy, $K = L/d$, działających na nią siłach skrawania, ω_{wr} i ω_k może być obrobiona z dokładnością, określaną przez charakterystyki obrabiarki.

Współczesne modele obrabiarek wyróżniają się podwyższoną sztywnością poszczególnych węzłów i całej obrabiarki, dlatego rosnącym wartościom K będą odpowiadać rosnące wartości odkształceń sprężystych i mniejsza dokładność obróbki, to znaczy, że część w danym układzie technologicznym będzie mało sztywna. Podany wniosek odpowiada klasyfikacji wałków o małej sztywności, kiedy celowe jest charakteryzowanie sztywności wałków warunkami najmniejszej nierównomierności podatności ogniów układu technologicznego i sposobu obróbki [120]. Analogicznie otrzymano zależności analityczne stosunku K i funkcji λ_1 (rys.1.7b), przy wartości $\omega_k = 0,00004 \text{ mm/N}$.

Według prac [97, 145] głębokość skrawania $a_p = 0,5 \div 2$ mm przy $\kappa_r = 45^\circ$, $\gamma = 0$, $r_\varepsilon = 0$ i $f = 0,055$ mm/obr wpływa na siły skrawania i stosunek $\lambda_1 = 1,285 \div 1$. Przy $a_p = 0,5$ mm i $f = 0,055 \div 1,75$ mm/obr stosunek λ_1 zmienia się w zakresie $\lambda_1 = 5 \div 1,7$. Zmiana kąta przystawienia $\kappa_r = 45^\circ \div 90^\circ$ przy $a_p = 0,5$ mm, $f = 0,055$ mm/obr powoduje zmiany $\lambda_1 = 1,285 \div 0,38$, a przy $a_p = 0,5$ mm, $f = 1,75$ mm/obr – $\lambda_1 = 5 \div 1,5$. Jak wynika z zależności analitycznych zmiany parametrów skrawania a_p , f , geometrii ostrza, a więc i wartości λ_1 powodują zmiany stosunku $K = L/d$ od 10 do 12%.

Na podstawie analizy zależności (rys. 1.7) można sformułować wniosek, że najbardziej efektywnymi środkami automatycznego sterowania dokładnością kształtowania danej klasy części $d = 2 - 18$ mm, z uwzględnieniem podatności układu technologicznego, są sposoby sterowania stanem sprężystości – odkształcalnym części. Wychodząc z faktu, że współczesne obrabiarki konstruuje się w taki sposób, aby podatność wrzeciennika i konika w zasadzie były równe, wałki według kryterium sztywności należy klasyfikować, uwzględniając średnią wartość podatności wrzeciennika i konika, to znaczy sztywność konkretnego układu technologicznego:

$$\frac{K^3}{24d} < \frac{\omega_{wr} + \omega_k}{2}, \quad (1.14)$$

- **wałki sztywne** – odkształcenia części można nie uwzględniać; błąd kształtu w przekroju wzdłużnym występuje jako zmniejszanie się średnicy wałka w kierunku jego środka; drgania podczas obróbki mogą powstawać w wyniku niestateczności elementów obrabiarki, a zwiększenie dokładności jest możliwe poprzez obniżenie podatności konika;

$$\frac{K^3}{24d} \approx \frac{\omega_{wr} + \omega_k}{2}, \quad (1.15)$$

- **wałki o średniej sztywności** – przy ocenie dokładności układu technologicznego należy uwzględniać odkształcenia części i podpór; błąd kształtu w tym przypadku powstaje jako falistość wałka, w dowolnym punkcie układu;

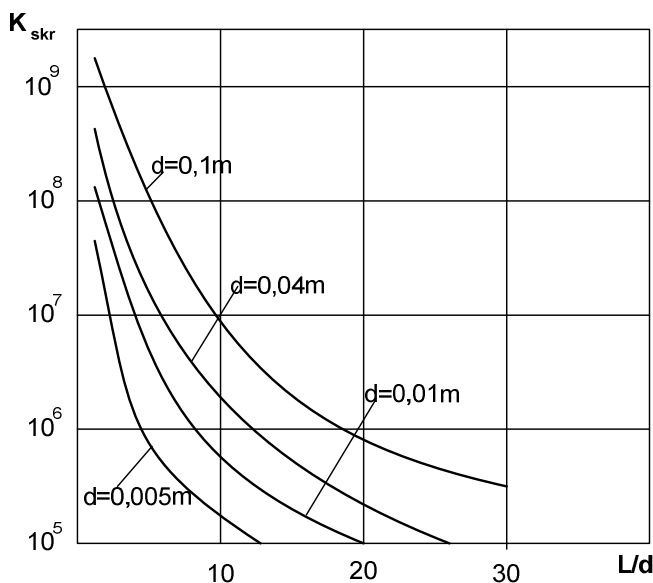
$$\frac{K^3}{24d} > \frac{\omega_{wr} + \omega_k}{2}, \quad (1.16)$$

- **wałki o małej sztywności** – podatności podpór można nie uwzględniać, a na schematach obliczeniowych powinny one być oznaczone jako przegubowe. Odkształcenia sprężyste układu technologicznego uwarunkowane są tylko podatnością części; błąd kształtu przejawia się w formie beczkowatości, a drgania powstają w wyniku niestateczności wałka, którego sztywność jest niewielka w porównaniu ze sztywnością obrabiarki [185].

Sztywność części $K_{cz} = \frac{EI \cdot K_i}{L^3}$ (K_i – współczynnik, zależny od rodzaju

podpór) jest proporcjonalna do czwartej potęgi średnicy i odwrotnie proporcjonalna do sześcianu długości wałka, a więc w układzie technologicznym może być oceniana przez porównanie ze sztywnością podpór i sztywnością układu.

Przyjmując sztywność skrawania $K_{skr} = (0,1 \div 10) \cdot 10^7 \text{ N/m}$, sztywność podpór $K_{pod} = 1 \div 10 \text{ N/m}$, strefy sztywności części o różnych średnicach można określić z zależności przedstawionych na rys. 1.8 [42].



Rys. 1.8. Zależności sztywności układu skrawania od stref sztywności części

Pojawienie się klasy części typu wałki o małej sztywności wymaga wprowadzenia zmian, zarówno do typizacji części, jak i technologii ich obróbki, co z kolei wiąże się z uzupełnieniem wcześniej wprowadzonych klasyfikacji części [42, 62, 118, 119, 125, 142].

Podstawowym zadaniem przedkładanej klasyfikacji części, według cech konstrukcyjno – technologicznych, jest sprowadzenie całej różnorodności wałków o małej sztywności do minimalnej liczby typów, przy których proces obróbki należy rozpatrywać na bazie konkretnego procesu technologicznego i odpowiednich urządzeń.

Opracowana klasyfikacja daje metodyczny środek do technologicznie zorientowanego konstruowania wałków o małej sztywności przy tworzeniu zintegrowanych systemów zautomatyzowanego projektowania.

Podwyższenie niezawodności obróbki jest osiąganę w wyniku zmniejszenia sił skrawania oraz zmniejszenia odkształceń sprężystych wałka. Zastosowanie wielozabiegowej obróbki wałków o małej sztywności, ze stopniowym zmniejszaniem głębokości skrawania, jest skrajnie nieekonomiczne i obniża wydajność; nie są więc wykorzystywane możliwości technologiczne obrabiarki, istotna część materiału jest zamieniana w wiór, utrudnione są warunki automatycznej obróbki wałków o małej sztywności, a także wymagane jest stosowanie dodatkowych środków, w celu zagwarantowania bezpieczeństwa obróbki tych części.

W pracy [185] przedstawiono wyniki badań doświadczalnych sytuacji awaryjnych i wypadków, podczas operacji obróbki mechanicznej, przeprowadzonych w przedsiębiorstwie, produkującym przyrządy mechaniki precyzyjnej.

1.2. Badanie metod zapewnienia dokładności zautomatyzowanej obróbki tokarskiej z wykorzystaniem tablic analizy

Prace poświęcone różnorodnym sposobom technologicznym zwiększenia dokładności obróbki wałków o małej sztywności, przy operacjach toczenia i szlifowania, nie obejmują całości problematyki i nie uwzględniają wszystkich różnorodnych czynników oraz metod stosowanych przy ich obliczeniach.

W celu wyodrębnienia dróg dalszych badań zagadnienia sterowania dokładnością kształtowania wałków, o małej sztywności, celowe jest przeprowadzenie analizy prac na podstawie metody, która pozwoliłaby porównać między sobą różnorodne schematy obliczeniowe rozwiązania sformułowanego problemu [17].

Podobną analizę przeprowadzono przy pomocy tablic analizy, opracowanych analogicznie do tablic odpowiedniości, stosowanych przy projektowaniu zautomatyzowanym [62].

Formalny opis tablic odpowiedniości przedstawiono, między innymi, w pracy [62].

Parametry $X_1, X_2, \dots, X_n$ określają wybór rozwiązania, a $X_{1,1}, X_{2,2}, \dots, X_{1,n}$ – wartości tych parametrów. Zbiór

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\},$$

jest to zbiór warunków rozwiązań.

Możliwe rozwiązania U zapisuje się w postaci

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\},$$

gdzie: $U_1, U_2, \dots, U_m$ – poszczególne rozwiązania, m – liczba rozwiązań.

W wierszach tablicy 1.3 wstawiane są „+”, jeżeli pewne rozwiązanie U istnieje w przypadku parametru X . Wtedy

$$U = (X_{ki}), \quad X_{ki} \in X.$$

Na podstawie analizy różnych publikacji można ukształtować podzbiór U_{p1} zbioru U_p wskaźników jakościowo i ilościowo, charakteryzujących kompleksowe zagadnienie zagwarantowania niezawodnej obróbki części o małej sztywności, przy osiągnięciu żądanej dokładności obróbki.

Wybrano następujące wskaźniki wyjściowe:

- X1** – sposoby obróbki: 1 – toczenie i roztaczanie, 2 – szlifowanie, 3 – toczenie wielonożowe, 4 – frezowanie, 5 – obróbka kombinowana;
- X2** – kształt obrabianej części: 1 – płyty i płytki, 2 – ciała obrotowe (wały i osie), 3 – części typu korpus, 4 – części o dowolnym kształcie;
- X3** – charakterystyka części: 1 – sztywna, 2 – o małej sztywności;
- X4** – idealny kształt badanej powierzchni: 1 – powierzchnia obrotowa, 2 – powierzchnia składowa, 3 – gwintowa;
- X5** – wskaźniki dokładnościowe i jakościowe powierzchni: 1 – dokładność wymiarów, 2 – dokładność kształtu w przekroju wzdłużnym, 3 – dokładność kształtu w przekroju poprzecznym, 4 – chropowatość;
- X6** – metoda uwzględniania wpływu odkształceń własnych ciał: 1 – eksperymentalna, 2 – zgodnie z teorią belek, płyt i powłok, 3 – według metody elementów skończonych;
- X7** – charakter obciążenia: 1 – idealnie statyczne, 2 – realne statyczne, 3 – dynamiczne;
- X8** – rozwiązanie zadania: 1 – deterministyczne, 2 – losowe;
- X9** – metoda badania: 1 – eksperymentalna, 2 – eksperymentalno – analityczna, 3 – analityczna;
- X10** – metoda osiągnięcia założonej dokładności obróbki: 1 – nastawienie statyczne, 2 – nastawienie dynamiczne;
- X11** – parametry umożliwiające osiągnięcie założonej dokładności: 1 – posuw wzdłużny, 2 – posuw poprzeczny, 3 – sztywność jednego z elementów UT, 4 – geometria narzędzia skrawającego, 5 – stan sprężystości – odkształcalny części, 6 – kierunek drgań lub obróbka wibracyjna, 7 – kombinacja parametrów, 8 – oddziaływania cieplne;
- X12** – uwzględnienie charakterystyk dynamicznych procesu skrawania: 1 – charakterystyka pseudostatyczna, 2 – charakterystyka dynamiczna, 3 – charakterystyka dynamiczna uwzględniająca czas opóźnienia;

- X13** – narzędzie skrawające: 1 – trwałość narzędzia (zużycie i zniszczenia), 2 – płytki skrawające (mocowanie i pokrycia), 3 – diagnostyka narzędzia, 4 – konstrukcyjne i technologiczne metody ochrony;
- X14** – przyrządy mocujące: 1 – siła mocowania, 2 – rodzaj styku, kształt elementów mocujących, 3 – metoda bazowania, 4 – konstrukcyjne i technologiczne metody zwiększenia niezawodności;
- X15** – mechanizmy napędowe i transmisyjne: 1 – zespoły pociągowe i transmisyjne UT, 2 – organy wykonawcze UT, 3 – konstrukcyjne i technologiczne metody ochrony;
- X16** – wióry i pył metaliczny: 1 – proces powstawania wióra i kierunek spływu, 2 – parametry procesu skrawania (f , v , a_p), 3 – sposoby i środki ochrony przed wiórami i cząstkami pyłu;
- X17** – drgania podczas skrawania: 1 – parametry skrawania, 2 – geometria ostrza, 3 – siły tarcia, 4 – powiązania między współrzędnymi, 5 – konstrukcyjne i technologiczne metody osiągnięcia niezawodności;
- X18** – drgania wymuszone: 1 – przyczyny powstawania, 2 – konstrukcyjne i technologiczne metody ochrony;
- X19** – ciecz smarująco – chłodząca: 1 – przygotowanie cieczy, 2 – przechowywanie, 3 – eksploatacja cieczy, 4 – utylizacja zużytej cieczy.

W tablicy analizy 1.3 pokazano tylko część wskaźników i czynników, charakteryzujących zagadnienie osiągnięcia wymaganego poziomu niezawodności technologicznej, uzyskanych za pomocą różnych badań. Wartości jakościowe i ilościowe wskaźników ponumerowano liczbami 1, 2..., itd. w kolejności zapisu. Nazwiska autorów oznaczono zgodnie z pozycją publikacji w spisie literatury. Jak wynika z tablicy analizy, niektóre ze wskaźników przedstawione są bardziej dokładnie niż inne, co wynika z częstości ich stosowania przy rozwiązywaniu przedstawionego wyżej problemu.

Z analizy tablicy 1.3 wynika, że publikacje z zakresu problematyki zwiększenia dokładności obróbki mechanicznej w budowie maszyn obejmują różne sposoby obróbki i szeroki zakres wytwarzanych części. Zagadnienia, związane z rozwiązaniem problemu zwiększenia dokładności kształtowania części o małej sztywności, zbadano dosyć dokładnie (tab. 1.3). Kompleksowe rozwiązanie zagadnienia uzyskania wysokiego poziomu niezawodności technologicznej, podczas kształtowania części nie jest w wystarczający sposób opisane w literaturze. Wskaźniki i czynniki, odzwierciedlające niezawodność obróbki, przedstawione przez autorów, którzy pracowali nad problematyką ogólnej niezawodności, można znaleźć w literaturze, opisującej szeroko rozumianą niezawodność.

Podczas rozwiązywania problemu osiągnięcia niezawodności technologicznej procesu kształtowania, oprócz elementów i czynników ją obniżających (proces powstawania wiórów i jego elementy; parametry geometryczne, tłumiące pokrycia narzędzi i właściwości fizyko – mechaniczne /zmęczenia i adhezyjne/ materiału narzędzia; sztywność mocowania narzędzia i płytek z węglików spiekanych; metody bazowania i mocowania części i odkształcenia stykowe h_{ki} części; indywidualne i grupowe środki ochrony [4, 13, 35, 36, 54, 81, 84, 86, 89, 92, 97, 111, 144, 182, 191]), należy również uwzględniać badania dynamiczne UT, metody obliczeń i rozwiązania konstrukcyjne [73, 89, 90, 94, 95, 96, 100, 129, 130, 120, 181, 192].

Współczesne wymagania odnośnie niezawodności technologicznej są na tyle wysokie, że stosowane metody nie zawsze umożliwiają osiągnięcie wymaganej dokładności obróbki i kształtu. Aktualne jest więc opracowanie i badanie nowych rozwiązań, w tym zakresie i w szczególności nowych metod technologicznych oraz środków sterowania automatycznego niezawodnością technologiczną obróbki części o małej sztywności.

Oprócz pogładowego przedstawienia związków logicznych, w procesie rozwiązania zagadnienia zwiększenia niezawodności i dokładności obróbki części o małej sztywności, tablica analizy może być podstawą do organizacji banku danych prac związanych z tą problematyką.

Osiągnięcia w tych dziedzinach nauki i techniki nie mogą być bezpośrednio zastosowane, przy kompleksowym rozwiązaniu zagadnienia sterowania niezawodnością i dokładnością kształtowania części o małej sztywności, ponieważ uzyskane zostały różnymi metodami, przy różnych założeniach, warunkach początkowych i brzegowych. Wyniki te mogą być częściowo wykorzystane przy tworzeniu modeli matematycznych, uwzględniających charakterystyki statyczne i dynamiczne UT różnych niezawodnych sposobów obróbki części o małej sztywności.

1.3. Klasyfikacja metod sterowania dokładnością zautomatyzowanej obróbki tokarskiej wałków o małej sztywności

Układy sterowania automatycznego dokładnością obróbki są podzielone według następujących cech charakterystycznych:

- struktury układu sterowania,
- przeznaczenia,
- metody sterowania,
- parametru mierzonego,
- oddziaływania regulacyjnego.

Pozwala to ocenić ich możliwości i zagwarantować prawidłowy wybór różnych przypadków obróbki, przy automatyzacji procesów technologicznych.

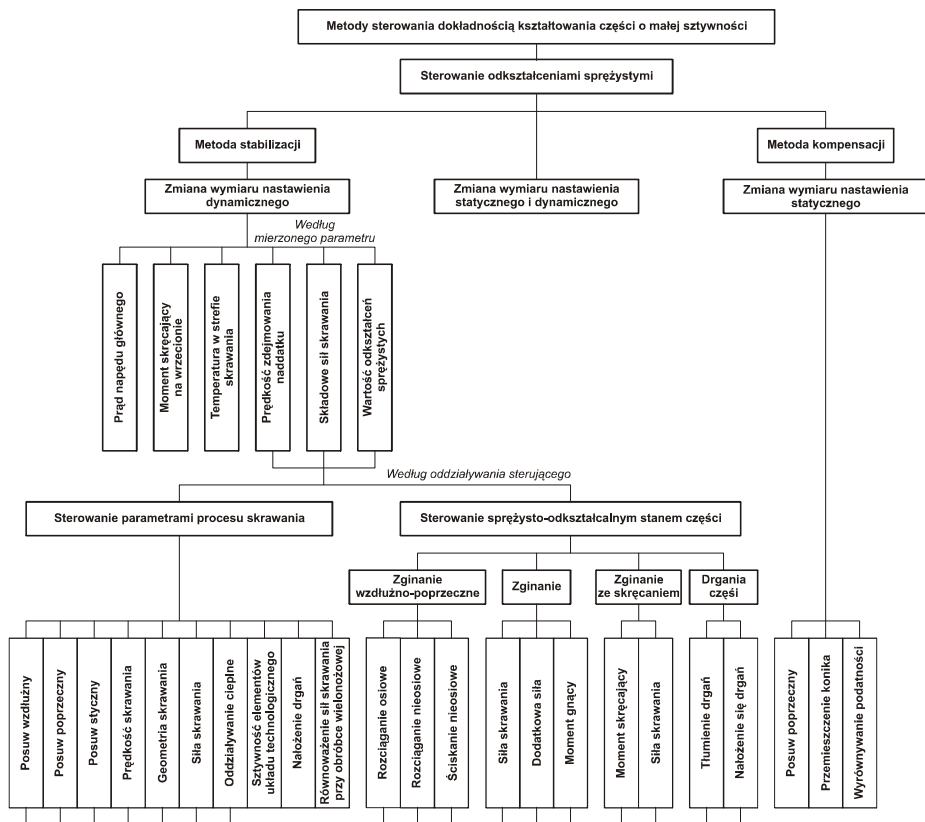
Uwzględnienie badań analitycznych metod technologicznych sterowania dokładnością kształtowania części o małej sztywności, umożliwia rozszerzenie i uzupełnienie klasyfikacji o nowe sposoby sterowania dokładnością.

Do sterowania dokładnością kształtowania części o małej sztywności (rys. 1.9) można zastosować metodę kompensacji lub stabilizacji [5, 6]. Odształcenia sprężyste niwelują zmianę wymiaru nastawienia statycznego według wielkości przemieszczenia, powstającego w układzie technologicznym, w wyniku regulacyjnych oddziaływań: przemieszczenia konika, wyrównywania podatności układu technologicznego [119], zmiany posuwu poprzecznego narzędzia [6, 131].

Stabilizacja odształceń sprężystych jest uzyskiwana poprzez zmianę wymiaru nastawienia dynamicznego. Sterowanie odbywa się tak, żeby wymiar ustawienia dynamicznego z możliwie dużą dokładnością był utrzymywany jako stały. Bezpośredni pomiar wymiaru nastawienia dynamicznego nie zawsze jest możliwy, dlatego stabilizacja odształceń sprężystych przebiega według funkcjonalnie powiązanych z nimi wielkości: składowych sił skrawania, prędkości zdejmowania materiału, prądu lub mocy silnika elektrycznego napędu głównego, momentu skręcającego na wrzecionie, temperatury w strefie skrawania. Pierwsze trzy mierzone parametry są stosowane przy sposobach sterowania dokładnością kształtowania wałków o małej sztywności. Aby uzyskać dużą dokładność metody kompensacji i stabilizacji odształceń sprężystych mogą być stosowane łącznie. W tym przypadku sterowanie odształceniami sprężystymi odbywa się w wyniku zmiany wymiaru nastawienia statycznego i dynamicznego. Jako oddziaływania regulacyjne, przy sterowaniu wymiarem dynamicznego nastawienia w procesie obróbki części o małej sztywności, mogą być stosowane parametry skrawania lub wielkości: posuwu wzdłużnego [6, 131], posuwu stycznego [120], posuwu poprzecznego [6, 100], prędkości skrawania, geometrii skrawania [6, 104, 131, 149, 153, 170], siły skrawania [6, 96], oddziaływania cieplnego [42, 120] lub ich kombinacje.

Do oddzielnej grupy mogą być zaliczone sposoby sterowania z oddziaływaniami regulacyjnymi: ukierunkowana zmiana sztywności poszczególnych ogniw układu technologicznego [6, 119], nałożenie na układ część – narzędzie drgań oscylacyjnych [120], zrównoważenie składowych sił skrawania przy obróbce wielonożowej. Zastosowanie tych oddziaływań sterujących, oprócz zwiększenia dokładności wymiarów i kształtu, gwarantuje także uzyskanie wyższej jakości powierzchni obrabianej.

[illegible]



Rys. 1.9. Klasyfikacja sposobów sterowania dokładnością kształtowania części o małej sztywności

W ostatnim czasie pojawiły się nowe sposoby sterowania dokładnością kształtowania wałków o małej sztywności, bazujące na zmianie stanu sprężystości – odkształcalnego części, w procesie obróbki przy zastosowaniu jako oddziaływań sterowniczych, poszczególnych czynników siłowych lub ich kombinacji (rys. 1.9) [83, 96].

W przypadku części o małych średnicach $d \leq (6 - 10)$ mm, $L/d \geq 20$ i $\omega > 2,26 \mu\text{m/N}$ efektywne jest rozciąganie osiowe [83], powodujące obciążenia wzdłużno – poprzeczne i zwiększające sztywność obrabianej części; przy $d > 10$ mm, $\omega < 0,675 \mu\text{m/N}$ – nieosiowe rozciąganie i ściskanie, tworzące dwa sterowalne czynniki siłowe: siłę i moment zginający; dosyć efektywne jest sterowanie dokładnością kształtowania w warunkach zginania w wyniku przyłożenia dodatkowej siły sterowniczej ze strony podpory sprężystej w postaci tłumików drgań [192].

Sterowanie dodatkową siłą, przy zastosowaniu tłumików drgań, umożliwia jednocześnie stabilizację wymiaru nastawienia dynamicznego i tłumienie drgań, w procesie obróbki części o małej sztywności [190]. W wielu pracach, poświęconych tym zagadnieniom, zastosowano wyidealizowane schematy obciążeń i obliczeń, przedstawiając praktycznie niemożliwe do zastosowania środki realizacji sposobów obróbki i sterowania dokładnością. Zastosowanie zginająco – skręcającego odkształcenia siłowego, jako oddziaływania sterującego, pozwala podwyższyć dokładność kształtowania, w wyniku ukierunkowanego zwiększenia sztywności części.

1.4. Naprężenia szczątkowe w procesie technologicznym wykonania wałków o małej sztywności

Naprężeniami szczątkowymi nazywa się naprężenia istniejące i równoważące się wewnątrz materiału po zaprzestaniu oddziaływań, powodujących ich powstawanie (siły powierzchniowe i masowe, oddziaływania temperaturowe itd.) [34, 40, 114, 134]. Naprężenia szczątkowe powstają praktycznie przy wszystkich procesach technologicznych obróbki cieplnej, mechanicznej, obróbce ciśnieniowej oraz przy wielu innych rodzajach obróbki. Przyczyny powstawania naprężeń szczątkowych są różnorodne (niejednorodność odkształceń plastycznych, niejednorodność pola temperaturowego, przekształcenia fazowe).

Naprężenia szczątkowe można umownie podzielić w zależności od prędkości zmiany naprężeń według współrzędnej przestrzennej na:

1. Naprężenia szczątkowe 1 rodzaju (makronaprężenia), które ulegają nieistotnej zmianie w granicach ziarna materiału (w stopach technicznych są zwykle rzędu setnych części milimetra). Zwykle naprężenia pochodzące od obciążeń są odnoszone do makronaprężeń.
2. Mikronaprężenia (naprężenia 2 i 3 rzędu) ulegają gwałtownej zmianie w granicach ziaren i komórek siatki krystalicznej. Związane są one z anizotropią kryształów, orientacją płaszczyzn kryptograficznych, występowaniem różnorodnych faz itd.

W niniejszej pracy rozpatrywane są tylko makronaprężenia szczątkowe (naprężenia 1 rodzaju).

W technice znane są przypadki pozytywnego oddziaływania naprężeń, w tym przypadku są one wytwarzane specjalnie. Na przykład w budownictwie stosuje się wstępne naprężanie konstrukcji. Wiadomo również, że ze wzrostem naprężeń ściskających na powierzchni, ulega zwiększeniu wytrzymałość zmęczeniowa. Do utworzenia odpowiedniego rozkładu naprężeń szczątkowych stosowany jest zgniot powierzchniowy (np. rolowanie, śrutowanie, to znaczy powierzchniowe odkształcanie plastyczne).

W większości przypadków naprężenia szczątkowe są niepożądane.

Przy oddziaływaniu obciążeń zewnętrznych w procesie obróbki mechanicznej lub eksploatacji naprężenia szczątkowe, sumując się z naprężeniami od sił zewnętrznych, mogą przekroczyć granicę sprężystości, co prowadzi do nierównomiernego odkształcenia plastycznego, paczania, skręcania itp. Może wystąpić również znaczne obniżenie możliwości przeciwdziałania części utracie jej stateczności. Przy obróbce cieplnej, mającej na celu obniżenie naprężeń szczątkowych, wyrób może ulegać odkształceniom („wykrzywieniu”). Przy dużej zmianie temperatury w wyrobie z naprężeniami szczątkowymi może mieć miejsce nie tylko zniekształcenie wymiarów i kształtu, ale także jego zniszczenie, szczególnie niebezpieczne przy tym są naprężenia rozciągające. Naprężenia szczątkowe obniżają wytrzymałość wyrobów przy obciążeniach zmiennych i cyklicznych, wpływają na zużycie przy tarcu ślizgowym lub tocznym. W pracy [37, 116] przedstawiono kilka efektów działania naprężeń szczątkowych przy korozji. Niekorzystnym efektem naprężeń szczątkowych, w półfabrykatkach walcowanych, jest ich krzywienie w procesach walcowania i stygnięcia. Problem uzyskania prostych wałów ściśle powiązany jest z obniżeniem i stabilizacją poziomu naprężeń szczątkowych. Naprężenia szczątkowe mogą być częściowo niwelowane w wyniku obróbki cieplnej.

Przy odpuszczaniu, w celu likwidacji naprężeń szczątkowych, podstawowym mechanizmem zmiany naprężeń szczątkowych jest ich relaksacja, która przebiega szybciej przy podwyższeniu temperatury [43, 50, 143]. Wadami tego procesu są:

- naprężenia szczątkowe nie są usuwane całkowicie, uwarunkowane jest to temperaturą odpuszczania, czasem wygrzewania, materiałem, masowością wyrobu;
- przy nagrzewaniu, a następnie chłodzeniu, półfabrykat o naprężeniach szczątkowych zmienia swój kształt i wymiary;
- odpuszczanie takie, przy wałach długowymiarowych jest operacją pracochłonną, zmniejszającą wydajność procesu. Istotny przy tym wpływ okazuje prędkość chłodzenia po odpuszczaniu, ponieważ przy stygnięciu wyrobów mogą powstać nowe naprężenia szczątkowe, powodujące skrzywienia długich części.

Można więc stwierdzić, że problem obniżenia poziomu naprężeń szczątkowych jest bardzo istotny.

W tej pracy problem badania i zmniejszenia naprężeń szczątkowych rozpatrywany jest jako zagadnienie ich stabilizacji w procesie wykonywania wałów długościowych według długości i przekroju średnicowego.

Zagadnienie to może być sformułowane w sposób następujący. Początkowo badany materiał znajduje się w stanie naturalnym, w ogólnym przypadku w niejednorodnym polu temperaturowym.

Przy stygnięciu do temperatury otoczenia oddziałują na niego różnego rodzaju obciążenia siłowe i temperaturowe, niektóre nich można odnieść do sterowalnych. Należy określić sterowanie stabilizujące lub minimalizujące poziom naprężeń szczątkowych w końcu procesu.

Przy takim podejściu można rozpatrywać naprężenia szczątkowe różnego pochodzenia, a więc:

- naprężenia szczątkowe cieplne,
- naprężenia szczątkowe odkształcające w wyniku niejednorodnych odkształceń plastycznych,
- naprężenia będące wynikiem przemieszczeń fazowych.

Problem ten może być rozwiązany poprzez wprowadzenie nowej operacji – stabilizacji cieplnej, z zastosowaniem układu kontroli przebiegu procesu technologicznego. Kontrolowana jest jednocześnie temperatura nagrzewania wzdłuż części, gwarantowana jest stabilizacja odkształceń plastycznych i temperatury wzdłuż części w wyniku sterowania tymi parametrami.

Przy obróbce mechanicznej (toczeniu) należy rozwiązać dwa zadania jednocześnie: uzyskać wymaganą dokładność i zachować ją w czasie eksploatacji. W pracy [53] przedstawiono wyniki badań, dotyczących zmiany kształtu i wzajemnego położenia powierzchni części obrabiarek precyzyjnych. Drogą eksperymentalną oceniono wielkość zmiany parametrów geometrycznych powierzchni po obróbce wrzecion obrabiarek współrzędnościowych. Przy obróbce mechanicznej wrzecion można uzyskać dokładność wymiarów średnic rzędu 1-2 μm , natomiast w ciągu 5 miesięcy badań zarejestrowano zmianę wymiaru średnicy, idącą w dziesiątki mikrometrów.

Nierównomierne wydzielanie ciepła przy zdejmowaniu różnej wielkości nadkładu powoduje powstawanie owalności pierścieni łożyskowych po szlifowaniu [38, 40, 52]. W celu usunięcia owalności zakłada się przeprowadzenie, przed szlifowaniem ostatecznym, dodatkowego odpuszczania, które umożliwia zmniejszenie poziomu naprężeń szczątkowych po szlifowaniu wstępnym. Jednak autorom prac nie udało się do końca wyjaśnić mechanizmu procesów, powodujących niestabilność kształtu powierzchni głównych wrzeciona i pierścieni łożyska.

Istotną wadą przy obróbce mechanicznej skrawaniem jest niestabilność kształtu obrabianej części, widoczna bezpośrednio przy realizacji operacji technologicznych. W pracy [126] ustalono, że przy obróbce tokarskiej pierścieni łożyskowych, z rur walcowanych na zimno i gorąco, wielkość owalności zależy od metody technologicznej otrzymywania półfabrykatów.

Wysokie wymagania, odnośnie do dokładności i stabilności parametrów wyjściowych zespołów i maszyn precyzyjnych, warunkują specyfikę procesu technologicznego wykonania części o wysokiej dokładności.

Oprócz uzyskania wysokiej dokładności wymiarów i parametrów geometrycznych powierzchni, przy zastosowaniu odpowiednich metod technologicznych, szczególną uwagę zwraca się na kształtowanie właściwości fizyko – mechanicznych materiału. Przy tym definiowane są wymagania odnośnie właściwości materiału podstawowego, kształtu konstrukcyjnego części i procesu technologicznego jej wykonania.

Podstawowe z nich są następujące:

- wysoka stabilność wymiarowa materiału części o wysokiej dokładności;
- konstruowanie takiego kształtu części, który zagwarantuje stabilny stan, przy działaniu sił masowych i powierzchniowych;
- wybór parametrów technologicznych, umożliwiających uzyskanie stabilnego stanu kształtu i wymiarów.

W celu uzyskania stabilności wymiarowej części o wysokiej dokładności, proces technologiczny jej wykonania należy opracowywać z uwzględnieniem kolejności wykonania operacji technologicznych. Po uzyskaniu półfabrykatów lub obróbce mechanicznej zgrubej przeprowadzana jest obróbka cieplna, nakierowana na uzyskanie wymaganych właściwości mechanicznych i stanu strukturalnego materiału części. Kolejne operacje obróbki mechanicznej powinny przeplatać się z operacjami stabilizacji cieplnej w procesie technologicznym części o wysokiej dokładności. W pracach [67, 70, 71] przedstawiono schematy typowych procesów technologicznych wykonania części o wysokiej dokładności oraz tablice parametrów, stabilizującej obróbki cieplnej.

Z technologicznego punktu widzenia bardzo ważne jest dysponowanie danymi odnośnie do wymiarowej niestabilności materiału przed hartowaniem oraz po hartowaniu.

Konieczność zastosowania złożonych operacji technologicznych obróbki stabilizującej uwarunkowana jest tym, że dowolność zmiany kształtu i wymiarów prowadzi do zmiany parametrów wyjściowych i obniżenia niezawodności maszyn precyzyjnych. Należy zagwarantować stabilność w warunkach długotrwałej eksploatacji, przy temperaturach stałej i zmiennej [127, 128]. Najbardziej pełną charakterystyką stabilności wymiarowej materiału w czasie jest wielkość naprężenia maksymalnego, nieulegającego relaksacji w drugim okresie badań (500-3500 h), nazywana umownym okresem relaksacji. Wielkość tę zaleca się stosować jako podstawową charakterystykę stabilności sygnałów w budowie maszyn.

W przypadku maszyn precyzyjnych, wybór materiałów konstrukcyjnych zaleca się przeprowadzać na podstawie stosunku, charakteryzującego stabilność wymiarową według wskaźnika oporu odkształcenia mikroplastycznego oraz modułu sprężystości i gęstości materiału [135]. Metale i stopy o wysokich wartościach tych stosunków są najbardziej odpowiednie na elementy o wysokiej dokładności.

Na takie części odpowiedniejsze są materiały o minimalnym stosunku współczynników rozszerzalności i przewodności cieplnej [114, 143]. Względnie odpowiednią kombinację wysokich obciążeń, posiadają wysokowytrzymałe stale konstrukcyjne. Szeroko rozpowszechnione są nierdzewne stale chromowe, natomiast w przypadku części obciążonych w stopniu średnim przy zastosowaniu optymalnej obróbki cieplnej, stosowane są stale o średniej zawartości węgla. Przy wyborze materiału na elementy działające przy wysokich obrotach, należy uwzględnić, że powinny mieć one niewielki ciężar względny i wysoki moduł sprężystości, ponieważ przy dużym ciężarze względnym materiału w obracającej się części o dużej dokładności powstaje wysoki poziom naprężeń. Za podstawę wyboru metod obróbki stabilizacyjnej elementów o wysokiej dokładności przyjęto zasadę uzyskania stabilności stanu strukturalnego i zmniejszenia poziomu naprężeń szczątkowych.

Ważnym czynnikiem przeszkadzającym w uzyskaniu parametrów dokładnościowych części o wysokiej dokładności jest ich kształt [136, 137]. Ustalono, że przy obróbce powierzchni głównych wrzeciona dokładnego, uzyskanie wysokiej dokładności jest utrudnione z powodu nierównomiernej sztywności elementów konstrukcyjnych. Nierównomierna sztywność konstrukcyjna jest przyczyną odkształceń, również w przypadku równomiernego rozkładu naprężeń szczątkowych. Zwiększenie niestabilności kształtu jest możliwe przy nieprawidłowym konstrukcyjnym rozmieszczeniu elementów masowych, okazujących istotny wpływ na zmianę mikrostruktury obciążonej warstwy wierzchniej. Złożoność określania prawidłowych rozwiązań uwarunkowana jest tym, że element konstrukcyjny, o określonej masie, może spełniać pozytywną rolę przy osiąganiu wysokiej dokładności, natomiast przy jej zachowaniu jest przyczyną niestabilności kształtu.

Większość prac badawczych dotyczy zakresu zwiększenia charakterystyk eksploatacyjnych maszyn i narzędzi nowymi metodami technologicznymi, natomiast brak jest w nich informacji odnośnie do analizy przyczyn niestabilności i wpływu charakteru jej zmiany na kształt części gotowych przy ich przechowywaniu i eksploatacji.

Według autorów pracy [143] konieczność analizy zagadnień stabilności mikrostruktury, uwarunkowana jest tym, że umiejętność kształtowania w materiałach określonych właściwości opiera się na możliwości otrzymania wymaganej mikrostruktury. Każdy materiał części posiada swoją specyficzną mikrostrukturę. Podobne mikrostruktury, jak odnotowują autorzy pracy [186], prawie we wszystkich przypadkach są niestabilne termodynamicznie. Niestabilność powstaje z powodu tego, że każdy stop może posiadać tylko jedną strukturę stabilną i nieskończoną liczbę struktur niestabilnych. W materiale części oprócz mikrostruktury charakterystycznej powstają mikro- i makro-naprężenia szczątkowe, kształtowane w trakcie procesu technologicznego wytwarzania.

Mogą to być naprężenia szczątkowe od operacji cieplnych, od operacji obróbki mechanicznej itp.

Zastosowanie obróbki stabilizacyjnej prowadzi do powstania struktury stabilnej i usunięcia makronaprężeń szczątkowych. Pozostaje jednak niestabilna mikrostruktura, charakterystyczna w przypadku każdego materiału części i makronaprężenia, „pamiętające” historię oddziaływania technologicznego.

W wyniku działania sił masowych i powierzchniowych, niestabilność mikrostruktury prowadzi z czasem do zmiany kształtu i wymiarów części o małej sztywności. Makronaprężenia wewnętrzne określają naprężenia, kierunek i intensywność występowania struktury niestabilnej oraz charakter przebiegu procesów fizycznych. W przypadku części o małych wymiarach [50, 116, 133], możliwa jest zmiana ich kształtu i wymiarów, w wyniku działania czynników, ukształtowanych oddziaływaniem technologicznym, bez działania sił zewnętrznych.

Liczbowe określenie zmiany kształtu i wymiarów części, po operacji technologicznej, umożliwia efektywne sterowanie metodami oddziaływania technologicznego na obrabianą powierzchnię w dowolnym etapie wytwarzania części, tym bardziej, że możliwa jest analiza parametrów geometrycznych, obrabianych powierzchni, uzyskanych w taki sposób przy zastosowaniu teorii dziedziczności technologicznej, przedstawionej w pracach [67, 70, 71].

Niestabilność kształtu części o wysokiej dokładności, będąca wynikiem działania zjawisk złożonych, określana jest w mikrometrach. Zjawisko niestabilności kształtu i wymiarów części o wysokiej dokładności należy więc rozpatrywać jako zjawisko dziedziczności.

W technologii maszyn, przy zastosowaniu teorii dziedziczności technologicznej, przyjęte są dwa określenia: „dziedziczenie” i „dziedziczność” [116, 128, 143]. Zastosowanie tych pojęć do wyjaśnienia jednego z tych zjawisk wymaga dodatkowych badań. Teoria dziedziczności technologicznej umożliwiła poznanie wielu cech specyficznych przebiegu procesu technologicznego, wykonania części i wypracowanie sposobów technologicznych, umożliwiających uzyskanie wysokiej dokładności oraz określenie zasad niezawodności technologicznej. Oddziaływanie technologiczne może zmieniać (wzmacniać lub osłabiać) dziedziczność podstawowego metalu, w niektórych przypadkach w sposób zasadniczy, ale charakter oddziaływania zawsze uwarunkowany jest dziedziczną mikrostrukturą.

Według autorów prac [126, 134, 152, 157] przy odkształceniach mikroplastycznych, w warunkach relaksacji naprężeń, przy temperaturze pokojowej lub nieco wyższej, w metalu mają miejsce procesy dyslokacji wewnątrz ziaren. Poślizg powstaje na granicach ziaren i rozprzestrzenia się w głąb. Procesowi poślizgu przy relaksacji naprężeń towarzyszy powstawanie bardziej zrównoważonej i stabilnej struktury dyslokacyjnej.

Wykorzystanie materiału eksperymentalnego, zgromadzonego w ciągu ostatnich dziesięcioleci jest utrudnione w związku z brakiem teorii, wyjaśniającej technologiczne naprężenia szczątkowe, która powinna odpowiadać następującym wymaganiom:

- prawidłowość zmiany naprężeń powinna być przedstawiona w możliwie prosty sposób funkcjonalny,
- wielkość maksymalnych naprężeń rozciągania lub ściskania, głębokość ich oddziaływania i zasada rozkładu naprężeń po głębokości, powinny być przedstawione w postaci jawnej na podstawie liczbowych wartości danych eksperymentalnych,
- powinna istnieć możliwość zmiany wartości liczbowych jednego z parametrów rozkładu naprężeń szczątkowych, przy tym inne należy pozostawić niezmiennie.

Opis teoretyczny rozkładu naprężeń szczątkowych w warstwie wierzchniej przy spełnieniu wskazanych wymagań umożliwia przeprowadzenie badań wstępnych wpływu każdego z parametrów i określenie ich wartości, umożliwiających zwiększeniu stabilności kształtu i wymiarów. Takie podejście teoretyczne może być zastosowane również do oceny wpływu naprężeń szczątkowych, z uwzględnieniem zmiany ich wielkości w czasie, na inne parametry eksploatacyjne części maszyn.

Wyjaśnienie mechanizmu procesów relaksacyjnych w warstwie wierzchniej pozwala na ukierunkowane kształtowanie, przy pomocy metod technologicznych, dziedzicznych właściwości materiału części, umożliwiających uzyskanie stabilności kształtów i wymiarów.

1.5. Procesy technologiczne stosowane do stabilizacji kształtów i wymiarów części długowymiarowych o małej sztywności

Cykl technologiczny wykonania części o małej sztywności zawiera wiele operacji: prostowanie, obróbka cieplna, często wielokrotna, obróbka mechaniczna. Każda z tych operacji wnosi swoje naprężenia szczątkowe, które powodują odkształcenia zarówno na etapie wytwarzania jak i w trakcie ich eksploatacji. Rozpowszechnionymi sposobami obniżenia naprężeń szczątkowych są różne rodzaje obróbki cieplnej: odpuszczanie, wyżarzanie niskotemperaturowe i starzenie naturalne. W ostatnich latach stosowana jest również obróbka wibracyjna.

Przy metodzie wibracyjnej zdejmowania naprężeń do metalu przenika energia drgań [37, 38, 41, 52, 150]. Dzięki temu w materiale polikrystalicznym mają miejsce przemieszczenia siatki krystalicznej, którym towarzyszy zmiana rozkładu naprężeń. Wibracja powinna zachodzić z częstotliwością rezonansową lub bliską do niej.

W przypadku, kiedy częstotliwość wibracji jest większa od częstotliwości drgań własnych wyrobu mogą pojawić się naprężenia zmęczeniowe [143].

Metoda wibracyjna nadaje się do zdejmowania naprężeń szczątkowych w półfabrykatch, uzyskanych metodami odkształcenia plastycznego, a powstałych w trakcie obróbki mechanicznej: frezowania, toczenia, strugania, przeciągania, wiercenia itp. Obróbka wibracyjna, w porównaniu ze sposobami cieplnymi zdejmowania naprężeń, posiada wiele zalet:

- praktycznie nie występują odkształcenia,
- elementy nie zmieniają swojego kształtu i wymiarów,
- nie występuje niebezpieczeństwo powstania nowych naprężeń, które mogłyby powstać przy nieprawidłowej obróbce cieplnej,
- skrócenie długotrwałości procesu,
- niewielkie zapasy części (mniejsza powierzchnia do ich składowania),
- mniejsze nakłady na urządzenia.

Obróbka cieplna, umożliwiającą zdjęcie naprężeń szczątkowych, w celu stabilizacji naprężeń i wymiarów części jest znana jako starzenie sztuczne. Proces ten wyraźnie zmniejsza poziom naprężeń szczątkowych i umożliwia wysoką jakość stabilizacji, ale posiada wiele wad, których nie mają metody wibracyjne.

Wszystkie metody, zapobiegające paczeniu i umożliwiające stabilizację kształtu i wymiarów części, nazywane są „starzeniem” [34]. Naprężenia szczątkowe, będące podstawową przyczyną odkształcenia części, ulegają znaczącemu zmniejszeniu w procesie wyżarzania niskotemperaturowego. Uważa się, że według wielkości pozostałych w części naprężeń szczątkowych, można sądzić, czy będą one następnie ulegać paczeniu, czy też nie. W wyniku badań ustalono, że w procesie starzenia naturalnego naprężenia szczątkowe, ulegają nieznacznemu zmniejszeniu, chociaż z praktyki wiadomo, że w procesie eksploatacji takie elementy nie ulegają paczeniu. Wysunięto założenie, że paczenie zachodzi głównie z powodu relaksacji naprężeń szczątkowych w miejscach ich koncentracji, a nie relaksacji średnich naprężeń szczątkowych 1 rodzaju, które brane są pod uwagę przy ocenie stanu naprężonego części. To znaczy, że poziom naprężeń w wyrobie oraz stopień ich obniżenia nie mogą charakteryzować stabilności wymiarów części obrabianych, dlatego efektywność tej lub innej metody starzenia powinna być oceniana według wielkości odkształceń. Wszystkie znane metody starzenia umownie można podzielić na trzy grupy, w zależności od stopnia zmiany naprężeń szczątkowych:

- 1 – naprężenia ulegają niewielkiej zmianie,
- 2 – naprężenia ulegają wyraźnemu zmniejszeniu,
- 3 – naprężenia ulegają gwałtownemu zmniejszeniu.

Do pierwszej grupy zalicza się starzenie naturalne, starzenie wibracyjne, obróbkę cieplną przy $T^{\circ} = 200^{\circ} - 300^{\circ}C$. Do grupy drugiej – metodę obciążenia statycznego, metodę uderzeń cieplnych. Do grupy trzeciej – wyżarzanie przy temperaturze przy $T^{\circ} = 500^{\circ} - 600^{\circ}C$.

Przed wyborem tej lub innej metody powinny być określone dokładnie wymagania, stawiane w stosunku do części, co jest ważniejsze - wysoka stabilność wymiarów lub poziom naprężeń szczątkowych. Jeżeli jedno i drugie wymagania pokrywają się, to czasami należy je połączyć lub zastosować metodę, odpowiadającą obu tym wymaganiom.

Wielkość naprężeń szczątkowych w półfabrykacie nie określa możliwości ich paczenia [38]. Na przykład przy intensywnym umocnieniu stabilizacja wymiarów półfabrykatów, uzyskiwana jest przy względnie niewielkim obniżeniu ich ogólnego poziomu naprężeń szczątkowych (do 10%). Odwrotnie, przy intensywnym zmniejszeniu umocnienia (wyżarzanie niskotemperaturowe w $T^{\circ} = 500^{\circ} - 600^{\circ}C$) paczenie nie postępuje tylko w przypadku znaczącego obniżenia naprężeń szczątkowych (do 50 - 60%).

Eliminacja odkształceń plastycznych wymaga zwiększenia wytrzymałości metalu na odkształcenia plastyczne, to znaczy jego odporności relaksacyjnej lub zmniejszenia działających naprężeń. Umocniona, w wyniku odkształcenia plastycznego, stal ma o wiele większą odporność na nowe odkształcenia plastyczne.

Ostatnio rozwijane są metody starzenia, zwiększające trwałość relaksacyjną materiału przy niewielkim obniżeniu naprężeń szczątkowych. Zalicza się do nich obciążenie statyczne i dynamiczne, starzenie przy zastosowaniu uderzeń cieplnych, stabilizację wymiarów części w polu magnetycznym, uderzenia elektrohydrauliczne, napromieniowanie promieniami rentgenowskimi.

Istnieje kilka teorii, próbujących wyjaśnić efekt, uzyskiwany w trakcie obróbki. Na przykład przy obróbce wibracyjnej metal uzyskuje energię drgań, powodującą powstawanie naprężeń czasowych, które w sumie z naprężeniami szczątkowymi powinny przekraczać granicę plastyczności materiału przy naprężeniach zmiennych według znaku, której wielkość jest mniejsza od statycznej granicy plastyczności, co wynika z efektu Bauschingera [116].

Obróbka wibracyjna według znanych metod [127, 128] posiada wiele wad:

- poszukiwanie pików rezonansowych jest łatwe tylko przy małych częstotliwościach, które odpowiadają rezonansowi części o dużych masach;
- przy częstotliwościach wysokich nie udaje się wykryć pików rezonansowych, a więc jakościowa stabilizacja naprężeń szczątkowych nie jest możliwa.

Dokładność poszukiwania i kontroli zmiany stanu naprężonego istotnie wzrasta przy zastosowaniu rozwiązań technicznych odnośnie zmiany pętli histerezy. Wskaźnikiem początku stabilizacji naprężeń szczątkowych jest migracja części nieliniowej pętli histerezy, a zakończenia stabilizacji – uzyskanie jej liniowości. Przy tym powierzchnia ograniczona pętlą histerezy ulega zmniejszeniu.

Do uzyskania charakterystyk, odzwierciedlających zależność intensywności odkształceń plastycznych, stosowany jest klucz elektroniczny do odcięcia drgań harmonicznym niewpływających na intensywność odkształceń plastycznych, dający na wyjściu „parametr sumaryczny”, rejestrowany przez wskaźnik. W tym przypadku „parametrem sumarycznym” jest łączna ilość impulsów, nagromadzona przy zmianie częstotliwości wzbudzania w określonym trybie.

W celu zwiększenia efektywności procesu stabilizacji wibracyjnej naprężeń szczątkowych i równomierności gęstości rozkładu wibracji w objętości części [40, 41, 51, 67, 72, 128], obróbka wibracyjna realizowana jest przy częstotliwości, równej najmniejszej ogólnej wielokrotności częstotliwości własnych składowych elementów konstrukcji.

Do obróbki wibracyjnej części o długiej osi i małej sztywności należy rozszerzyć zakres częstotliwościowy wibratora i opracować kontur sterowania poziomem wibracji i częstotliwości rezonansowych.

1.6. Podsumowanie

Analiza badań teoretycznych i doświadczalnych przedstawionych w literaturze współczesnej pokazuje, że zagadnienia badania dokładności obróbki zaczęto definiować i rozwiązywać od momentu powstania nauki o skrawaniu metali. Postępy w ich rozwiązywaniu na każdym z etapów rozwoju przemysłu maszynowego, w znaczącym stopniu były określane przez osiągnięcia w dziedzinie technologii maszyn, teorii skrawania materiałów, budowy obrabiarek, przemysłu narzędziowego, automatyzacji procesów obróbki i projektowania, a także budowy różnorodnych układów sterujących, w szczególności układów sterowania automatycznego i adaptacyjnego.

Mimo znaczących osiągnięć metod eksperymentalno – analitycznych, tradycyjna strategia ich zastosowania, przy badaniach i obliczeniach dokładności, a szczególnie przy kształtowaniu części o małej sztywności, sprowadza się do tego, że skupia się uwagę na małych podzbiorach rzeczywistego problemu, ograniczając się przy tym, jak pokazały badania przy pomocy tablic analizy, do uproszczonych schematów obliczeniowych, nie uwzględniających całego kompleksu rzeczywistych czynników statycznych i dynamicznych.

Do ogólnych wad sposobów sterowania dokładnością i metod jej określania odnosi się oddzielne podejście do obliczeń dokładności kinematycznej, dynamicznej i statycznej, przy czym ruchome elementy maszyn zakreslają trajektorie ruchu, które w wyniku oddziaływania czynników siłowych zależą od obciążeń, dokładności łańcuchów kinematycznych i wymiarowych.

W podejściach do obliczeń i sterowania dokładnością nie zawsze łącznie uwzględniane są aspekty konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne.

Na dokładność eksploatacyjną kształtu i wymiarów części o małej sztywności, przy ich wykonaniu, dominujący wpływ mają właściwości fizyko-mechaniczne materiału półfabrykatu, poziom naprężeń szczątkowych i ich nierównomierność w przekrojach wzdłużnym i poprzecznym półfabrykatu, a także błędy wnoszone przez odkształcenia sprężyste i plastyczne układu technologicznego oraz obrabianej części.

Opracowanie metod obróbki części o małej sztywności realizowane jest, w przypadku poszczególnych operacji, poprzez wprowadzenie nowych również poprzez sterowanie parametrami technologicznymi procesów oraz opracowanie jakościowo nowych procesów technologicznych. Jakość gotowych wyrobów i ich dokładność eksploatacyjna zależy od całego procesu technologicznego, z uwzględnieniem wzajemnych relacji między operacjami i ich dziedziczności technologicznej, przekazywanej przez półfabrykat.

Najbardziej efektywnymi metodami zwiększenia jakości i wydajności wytwarzania części są te, które, obok sposobów tradycyjnych, wykorzystują układy sterowania automatycznego, w rozwoju tych systemów charakterystyczne jest o wiele szersze zastosowanie informacji o charakterze przebiegu procesu technologicznego.

2. PODSTAWY TEORETYCZNE METOD STEROWANIA DOKŁADNOŚCIĄ ZAUTOMATYZOWANEJ OBRÓBKİ WĄLKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

2.1. Metodologia budowy modeli matematycznych obróbki wągów sprężyste – odkształcalnych przy warunkach ustalonych

Współczesne pojęcie i metody oceny dokładności bazują na metodzie układów współrzędnościowych z powiązaniami odkształceniowymi, przedstawionej w pracach [3, 4, 9]. Układy współrzędnościowe są przy tym budowane na bazach technologicznych obrabianej części – Σ_{cz} , bazach głównych wrzeciona – Σ_{wr} , prowadnicach łoża – Σ_l i bazach głównych narzędzia skrawającego – Σ_i (rys. 2.1). Każdy element układu technologicznego jest pozbawiony odpowiedniej liczby stopni swobody, a więc nałożenie określonych więzów na układy współrzędnościowe umożliwia otrzymanie ekwiwalentnego schematu układu technologicznego tokarki. Dokładność obróbki w znacznym stopniu zależy od zgodności sztywności części oraz sztywności obrabiarki i może się zmieniać w szerokim zakresie. Część o małej sztywności, w konkretnym układzie technologicznym, jest najsłabszym ogniwem, a więc przy rozpatrywaniu obiektu sterowania, jakim jest element o małej sztywności, układ technologiczny przy ustalonych parametrach jest ograniczany odcinkiem „wrzeciennik – wałek o małej sztywności – konik, kiel lub zacisk”.

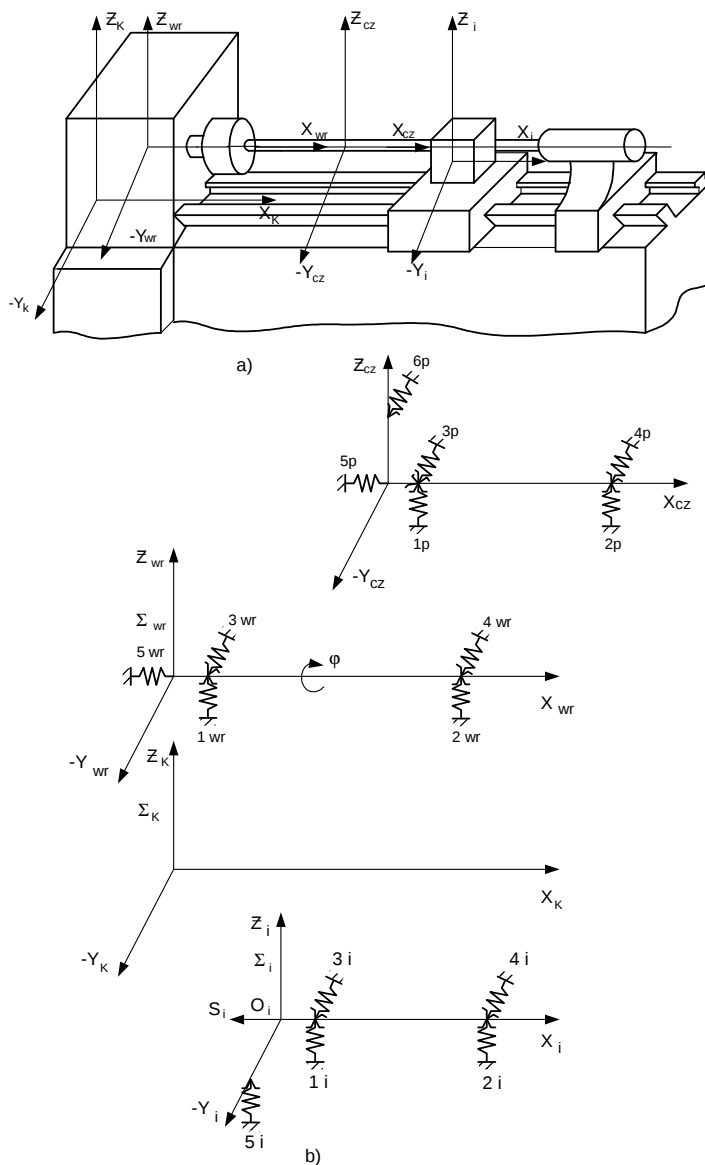
Przy opracowywaniu opisu matematycznego obiektu sterowania – funkcji odkształceń węgła o małej sztywności – przy ustalonych parametrach, należy uwzględniać kilka czynników, takich jak np. sposoby zamocowania czy warunki obciążenia [27, 32, 55, 56].

Opracowanie modelu matematycznego w proponowanym ujęciu jest zagadnieniem identyfikacji strukturalnej. Otrzymywany model matematyczny powinien być wystarczająco prosty do dalszego stosowania, przy sterowaniu dokładnością obróbki i jednocześnie odpowiadać a priori informacjom o mechanizmie, powiązaniach i parametrach zjawisk. Należy więc wyodrębnić czynniki, wykazujące dominujący wpływ na dokładnościowe wskaźniki procesu obróbki.

Rozwiązanie tego problemu podzielono na dwa etapy. W pierwszym opracowuje się model matematyczny, umożliwiający drogą analizy, ustalenie wpływu zestawu czynników na dokładność.

PODSTAWY TEORETYCZNE METOD STEROWANIA DOKŁADNOŚCIĄ ZAUTOMATYZOWANEJ OBRÓBKİ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

W drugim etapie badań, na bazie metod optymalizacji, formułuje się algorytmy sterowania sprężysto – odkształcalnym stanem części, z uwzględnieniem powiązań rzeczywistych i opracowuje nowe sposoby sterowania niezawodnością technologiczną obróbki.



Rys. 2.1. Widok ogólny (a) oraz schemat ekwiwalentny (b) tokarki

Opis matematyczny linii sprężystej, na podstawie rzeczywistego oddziaływania części i ostrza, struktura modeli matematycznych, wybór metod liczbowych i algorytmów rozwiązania są realizowane z uwzględnieniem znanego i rozwijanego podejścia ogólnosystemowego [9, 19, 27]. Przy tym opracowane modele matematyczne powinny być w postaci uogólnionej, to znaczy powinno być możliwe ich zastosowanie w danym systemie modelowania i systemie automatycznego projektowania. Z tego punktu widzenia, sposób realizacji analizowanego problemu w niektórych aspektach jest standardowy, ponieważ w tych przypadkach, gdzie istnieje zgodność z przyjętymi celami, można wykorzystać wyniki, otrzymane przez znanych badaczy, zaprezentowane między innymi w pracach [2, 3, 4, 15, 16, 18, 24]. Natomiast inne podejście niż ogólnie przyjęte ma na celu wzbogacenie o takie cechy, jak: uniwersalność, dokładność, ekonomiczność.

Przy budowie modeli linii sprężystych walców o małej sztywności, obrabianych w stanie sprężystości – odkształcalnym, najbardziej istotnymi czynnikami są momenty zginające względem osi x , ponieważ odkształcenia sprężyste względem tej osi wykazują dominujący wpływ na błędy kształtu w kierunku wzdłużnym. Składowa F_c siły skrawania w dużym stopniu wpływa na zamocowanie części, a jej działanie zginające może być uwzględnione w postaci obciążenia od ostrza, jako siła $F_{zg} = \sqrt{F_c^2 + F_p^2}$. Konieczność uwzględniania składowej osiowej F_f siły skrawania jest spowodowana tym, że działanie składowej F_f powoduje zwiększenie odkształceń części o małej sztywności wzdłuż osi x .

Różnorodne sposoby zamocowania części o małej sztywności podczas obróbki, w warunkach zginania poprzecznego i wzdłużno – poprzecznego przedstawiono w tab. 2.1. Pokazano typy urządzeń i ich interpretację w modelach na lewym i prawym końcu części. Konkretny rodzaju modelu może być przyjęty po określeniu ostatecznego rozwiązania konstrukcyjnego modelu zamocowania, identyfikacji parametrycznej i analizie zbieżności wyników, otrzymanych w oparciu o model symulacyjny z danymi eksperymentalnymi.

W badaniach i przy budowie modeli matematycznych przyjęto następujące założenia: proces technologiczny uważa się jako ciągły i niezmienny w trakcie obróbki jednej części; prędkość obrotowa, posuw, zdolność skrawna narzędzia w trakcie procesu obróbki jednej części przyjmowane są jako niezmiennie; warunki początkowe są określane w momencie styku narzędzia skrawającego oraz części i powstania napięcia w układzie technologicznym. Układ technologiczny jest ograniczony przez odcinek „wrzeciennik – wałek o małej sztywności – konik” [88, 123, 138].

Tab. 2.1. Sposoby zamocowania części przy rozciąganiu wzdłużnym

Sposoby zamocowania części			
Lewy koniec części		Prawy koniec części	
Urządzenie	Interpretacja w modelu	Urządzenie	Interpretacja w modelu
Uchwyt		Oprawka tulejowa ze wstępnym zaciskiem	
Uchwyt ze wstępnym zaciskiem		Oprawka tulejowa z zaciskiem powstałym w wyniku siły rozciągającej	
Uchwyt lub tuleja z podporą sferyczną		Uchwyt lub oprawka z podporą kulistą	
		Urządzenie rozciągania ruchowego	

Uwzględniana jest sztywność i odkształcenia sprężyste układu technologicznego tylko w kierunku promieniowym; jako wyjściowy parametr sterujący dokładnością, przyjmowana jest odchyłka walcowości; wartość odchyłek kształtu określana jest proporcjonalnie do odkształceń sprężystych, w odpowiednich przekrojach wałka o małej sztywności.

2.2. Uzasadnienie teoretyczne metody sterowania dokładnością obróbki wałków sprężystości – odkształcalnych

Jak wynika ze specyfiki wytwarzania wałków o małej sztywności oraz z analizy badań teoretycznych i eksperymentalnych, jedną z efektywnych dróg zwiększenia dokładności obróbki tego rodzaju części jest zwiększenie ich sztywności, poprzez ukierunkowaną zmianę stanu sprężystości – odkształcalnego, w wyniku przyłożenia do nich siły rozciągającej, tworzącej razem z siłą skrawania obciążenia wzdłużno – poprzeczne. Przy tym zwiększenie sztywności części o średnicy od 2 do 6 mm i długości od 100 do 300 mm, przy obciążeniu ich siłą rozciągającą, w zakresie od 980 do 1960 N, prowadzi do zmniejszenia odkształceń sprężystych odpowiednio od 80 do 20%, przy $d = 8 - 12$ mm o 5 – 7%, a przy zwiększeniu $d > 16$ mm przy danej długości praktycznie nie wpływa na wartość sztywności statycznej i odpowiednio na odkształcenia części [83, 88, 101].

W celu dokonania analizy wpływu siły rozciągającej na sztywność statyczną obrabianych części może być zastosowany znany model (tab. 2.2, wiersz 2.1). Przytoczony model nie opisuje adekwatnie zachowania linii sprężystej, przy różnych sposobach zamocowania. Wynika stąd, że część zamocowana w koniku obrabiarki, w przedstawionym modelu, ma możliwość zarówno przemieszczenia liniowego wzdłuż osi części, jak i swobodnego obrotu przekroju w miejscu zamocowania. Ta metoda zamocowania w wielu przypadkach nie prowadzi do zmniejszenia odkształcenia w strefie obróbki.

Zamocowanie wałka przy przyłożeniu osiowej siły rozciągającej, może być zrealizowane w tulei sprężynującej. Taki sposób zamocowania jest interpretowany jako sztywne zamocowanie, z możliwością przemieszczenia osiowego (tab. 2.2, wiersze 2.2 i 2.3).

W celu minimalizacji odkształcenia sprężystego możliwe jest także sterowanie kątem obrotu przekroju części w miejscu zamocowania, drogą przyłożenia siły rozciągającej przemieszczonej względem osi kłków [6]. Ten rodzaj zamocowania może być także przedstawiony jako ruchoma podpora obrotowa (tab. 2.2, wiersz 2.4).

Zasadniczą cechą pokazanego schematu jest przyłożenie momentu sterującego w punkcie zamocowania części, w wyniku rozciągania mimośrodowego. Przy tym przyłożenie jednego sterowalnego czynnika siłowego – rozciągania mimośrodowego – umożliwia wytworzenie dwóch czynników siłowych w dowolnym uprzednio określonym przekroju części, w szczególności w strefie obróbki: wzdłużnej siły F_{x1} i momentu zginającego $M_2 = F_{x1} \cdot e$, przeciwdziałającego siłom skrawania, to znaczy ukierunkowanego sprężystości – odkształcalnego stanu części.

Przyłożenie sił rozciągających z przemieszczeniem względem osi kłków z dwóch końców obrabianego wałka, kiedy zamocowanie może być przedstawione jako ruchoma podpora obrotowa (tab. 2.2, wiersz 2.5), umożliwia sterowanie położeniem osi części z dwóch stron przy dowolnym położeniu narzędzia skrawającego, w stosunku do długości obróbki. Ponadto możliwe jest wykorzystanie specjalnego urządzenia do rozciągania ruchomego, przy obróbce długich wałków o małej sztywności (tab. 2.2, wiersz 2.6).

Model 2.7 (tab. 2.2) uwzględnia specyfikę obciążenia sprężystości – odkształcalnego części o małej sztywności, przy ściskaniu mimośrodowym na operacjach szlifowania.

W tab. 2.2 przyjęto następujące oznaczenia:

- F_{x1} – siła rozciągająca;
- e – mimośród siły rozciągającej przy rozciąganiu;
- M_1 – moment powstający od składowej osiowej F_f siły skrawania;
- x_1, x_2, x_3 – bieżące współrzędne na każdym z odcinków;
- a – odległość między ostrzem (miejscem przyłożenia obciążenia) a miejscem zamocowania części we wrzecionie;
- Q_0 i M_0 – parametry początkowe: odpowiednio siła poprzeczna i moment w miejscu zamocowania części.

Jedną z metod umożliwiających otrzymanie modelu matematycznego opisu rodzaju linii sprężystej, w zależności od parametrów części i parametrów procesu obróbki (sił obciążających), jest metoda energetyczna Ritza, przy pomocy której otrzymano funkcje odkształceń – rozciąganego pręta z końcem zamocowanym na sztywno (tab. 2.2, wiersz 2.2).

Innym sposobem, umożliwiającym otrzymanie praktycznie użytecznych wyników, jest uzyskanie opisu linii sprężystej części o małej sztywności przy zginaniu poprzeczno – wzdłużnym, w postaci układu równań różniczkowych czwartego stopnia, ze stałym współczynnikiem. Przy występowaniu sił i momentów skupionych na każdym z odcinków, na które dzielią część pokazane zakłócenia, prawdziwe są równania różniczkowe (rozciąganie osiowe – model 2.3)

$$y_i^{IV} - \alpha^2 y_i'' = 0, \quad (2.1)$$

$$\text{gdzie: } \alpha = \sqrt{\frac{F_{x1}}{EI}}.$$

W najprostszym przypadku jedyne zakłócenie linii sprężystej jest przyłożone w punkcie skrawania, to znaczy

$$i \in \{1, 2\}. \quad (2.2)$$

Rozwiązanie równania (2.1) można zapisać w postaci

$$y_i(x_i) = A_i \operatorname{sh} \alpha x_i + B_i \operatorname{ch} \alpha x_i + C_i x_i + D_i, \quad (2.3)$$

a w przypadku (2.2)

$$\begin{cases} y_1(x_1) = A_1 \operatorname{sh} \alpha x_1 + B_1 \operatorname{ch} \alpha x_1 + C_1 x_1 + D_1 \\ y_2(x_2) = A_2 \operatorname{sh} \alpha x_2 + B_2 \operatorname{ch} \alpha x_2 + C_2 x_2 + D_2 \end{cases} \quad (2.4)$$

Uwzględniając, że $M_1(x_1) = EI \cdot y_1''$; $F_1(x_1) = EI \cdot y_1'''$; $M_2(x_2) = EI \cdot y_2''$; $F_2(x_2) = EI \cdot y_2'''$, z warunków brzegowych (rubryka 3, tab. 2.2) w każdym układzie współrzędnych przy $x_1 = 0$, odkształcenie $y_1(0) = 0$, kąt obrotu przekroju $y_1'(0) = 0$ i $EI \cdot y_1''(0) = M_0$, $EI \cdot y_1'''(0) = Q_0$, określano stałe współczynniki:

$$A_1 = \frac{Q_0}{EI\alpha^3}, \quad B_1 = \frac{M_0}{EI\alpha^2}, \quad C_1 = -\frac{Q_0}{EI\alpha^2}, \quad D_1 = -\frac{M_0}{EI\alpha^2}, \quad (2.5)$$

a równanie odkształceń na I odcinku z uwzględnieniem (2.5) i wyrażenia do określenia α można zapisać jako

$$y_1(x_1) = \frac{Q_0}{\alpha F_{x1}} (\operatorname{sh} \alpha x_1 - \alpha x_1) + \frac{M_0}{F_{x1}} (\operatorname{ch} \alpha x_1 - 1). \quad (2.6)$$

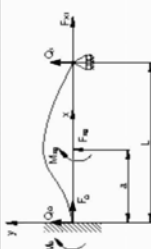
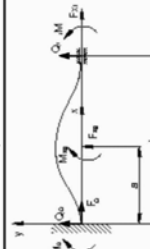
Współczynniki A_2, B_2, C_2, D_2 wyrażono z warunków brzegowych $x_2 = 0$, warunków równowagi i znoszenia odkształceń $y_1'(a) = y_2'(0)$, $EI y_1''(a) = EI y_2''(0)$, $EI y_1'''(a) + F_{zg} = EI y_2'''(0) = 0$ i są równe:

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{Q_0 \operatorname{ch} \alpha a + M_0 \alpha \operatorname{sh} \alpha a + F_{zg}}{\alpha^3 EI}, \\ B_2 &= \frac{Q_0 \operatorname{sh} \alpha a + M_0 \alpha \operatorname{ch} \alpha a}{\alpha^3 EI}, \\ C_2 &= \frac{Q_0 \operatorname{ch} \alpha a + M_0 \alpha \operatorname{sh} \alpha a + F_{zg}}{\alpha^3 EI}, \\ D_2 &= \frac{Q_0 \operatorname{sh} \alpha a + M_0 \alpha \operatorname{ch} \alpha a}{\alpha^3 EI}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

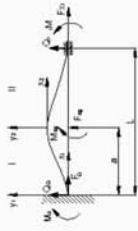
a równanie odkształceń na odcinku II można zapisać jako

$$y_2(x_2) = \frac{Q_0 \operatorname{ch} \alpha a + M_0 \alpha \operatorname{sh} \alpha a + F_{zg}}{\alpha F_{x1}} (\operatorname{sh} \alpha x_2 - \alpha x_2) + \frac{Q_0 \operatorname{sh} \alpha a + M_0 \alpha \operatorname{ch} \alpha a}{\alpha F_{x1}} (\operatorname{ch} \alpha x_2 - 1). \quad (2.8)$$

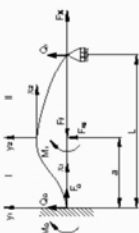
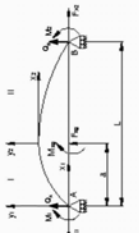
Tab. 2.2. Warunki obciążenia części przy sterowaniu stanem sprężystości – odkształcalnym

Nr	Sposób zamocowania Warunki obciążenia Rodzaj linii sprężystej odkształcenia części	Warunki brzegowe Warunki równowagi Warunki zgodności odkształceń	Funkcja odkształceń	Parametry początkowe Q_0 i M_0
1	2	3	4	5
2.1.	 $F_x = 0; M_1 = 0; b = 0; \beta = (L - a)/L$ $F_{z8} = \sqrt{F_c^2 + F_p^2}$	$x = 0; y(0) = 0; y'(0) = 0;$ $EI y''(0) = M_0;$ $EI y'''(0) = Q_0;$ $x = L; y(L) = 0;$ $\alpha = \sqrt{F_{z1}/EI}.$	$y(x) = \frac{Q_0}{F_{z1}} \left(\frac{ch dx - dx}{F_{z1}} + \frac{M_0}{F_{z1}} (ch dx - 1) \right) + f(x);$ $0 < x < a; f(x) = 0;$ $0 < x < L;$ $f(x) = F_{z8}/F_{z1} \left[(x - a) - sh \alpha (x - a) \right].$	$Q_0 = F_{z8} \frac{\beta a L \cdot ch a L - sh \beta a L}{a L \cdot ch a L - sh a L};$ $M_0 = F_{z8} \frac{\beta sh a L - sh \alpha \beta L}{a L \cdot ch a L - sh a L} L.$
2.2.		$x = 0; y(0) = 0; y'(0) = 0;$ $x = L; y(L) = 0; y'(L) = 0;$ $y(x) = \alpha [1 + \cos((2\pi x)/L)]$ $d_w/d_{a1} = 0.$	$y(x) = \frac{F_{z8} L^3 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right] \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right]}{\pi^2 (8\pi^2 \cdot EI + F_{z8} L^2)}.$	

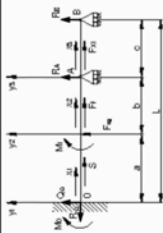
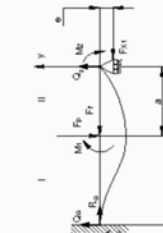
Tab. 2.2. c.d. Warunki obciążenia części przy sterowaniu stanem sprężystości – odkształcalnym

2.3.		$x = 0; \quad y(0) = 0; \quad y'(0) = 0;$ $EIY''(0) = M_0;$ $EIY'''(0) = Q_0;$ $x_2 = 0; \quad y_2(0) = 0; \quad y_2'(0) = y_1(0)$ $EIY_2'(0) = EIY_1'(0);$ $EIY_2''(0) = EIY_1''(0) + F_g;$ $\alpha = \sqrt{\frac{F_g}{EI}}.$	$0 < x_1 < a$ $y_1(x_1) = \frac{Q_0}{\alpha F_{x_1}} (sh \alpha x_1 - \alpha x_1) + \frac{M_0}{F_{x_1}} (ch \alpha x_1 - 1);$ $a < x_1 < L$ $y_2(x_2) = \frac{Q_0 ch a + M_0 \alpha ch a + F_g}{\alpha F_{x_2}} \times$ $\times (sh \alpha x_2 - \alpha x_2) + \frac{Q_0 sh a + M_0 \alpha ch a}{\alpha F_{x_2}} (ch \alpha x_2 - 1)$	$y_1(a) = -y_2(L-a); \quad y_2'(L-a) = 0;$ $Q_0 = \frac{F_g \{ [ch a (1-a) + cha(L-a) - cha(L-a)] \times$ $\times [sh a (1-a) + a(L-a) ch a (L-a) sh a - sh a L] \}}{+ a(L-a) ch a (L+a) + a a (sh a L - sh a a)};$ $M_0 = \frac{F_g \{ [ch a (L-a) ch a - cha (L+a) + a a (1-cha)] \times$ $\times [(L-a) + sh a (L-a) sh a - sh a L + sh a a]$ $+ a(L-a) ch a (L-a) + a a (sh a L - sh a a) \}}{\alpha \{ [1 - cha(L-a) - cha(L+a) +$ $+ a(L-a) ch a (L-a) + a a (sh a L - sh a a)] \}}.$
------	---	--	---	---

Tab. 2.2. c.d. Warunki obciążenia części przy sterowaniu stanem sprężystości – odkształcalnym

1	2	3	4	5
2.4.		$x = 0; y(0) = 0; y'(0) = 0;$ $x_2 = 0; y_2(0) = 0; y_2'(0) = y_1'(a);$ $EIY''(0) = M_0;$ $EIY''(0) = Q_0;$ $EIY_2''(0) = EIY_1''(a) + M_1;$ $\alpha_1 = \sqrt{\frac{F_0 - F_f}{EI}}, \alpha_2 = \sqrt{\frac{F_0}{EI}}.$	$0 < x_2 < a$ $y_1(x_1) = \left(\frac{Q_0}{F_0 - F_f} \alpha \right) (sh \alpha x_1 - \alpha x_1) +$ $+ \left(\frac{M_0}{F_0 - F_f} \right) (ch \alpha x_1 - 1);$ $a < x_2 < L$ $y_2(x_2) = \frac{Q_0 ch \alpha_1 + M_0 \alpha_1 sh \alpha_1 a + F_0}{\alpha_2 F_0} \times$ $\times (sh \alpha_2 x_2 - \alpha_2 x_2) + \frac{sh \alpha_1 a (Q_0 / \alpha_1) + M_0 sh \alpha_1 + M_1}{F_0} \times$ $\times (ch \alpha_2 x_2 - 1)$	Otrzymano analitycznie
2.5		$\sum y = 0; \sum M_2 = 0;$ $x = 0; y_1(0) = 0; y_1'(0) = Q_0;$ $EI_1 y_1'(0) = M_1; y_2'(0) = y_1'(a);$ $EI_2 y_2'(0) = EI_1 y_1'(a); EI_1 y_1'(0) = Q_0;$ $EI_2 y_2'(0) = EI_1 y_1'(a) + F_0;$ $\alpha_1 = \sqrt{\frac{F_0 - F_n}{EI_1}}, \alpha_2 = \sqrt{\frac{F_0 - F_n}{EI_2}}.$	$0 < x_1 < a$ $y_1(x_1) = -\frac{\Theta_0}{\alpha_1^2 EI_1} (sh \alpha_1 x_1 - \alpha_1 x_1) +$ $+ \frac{M_1}{\alpha_1^2 EI_1} (ch \alpha_1 x_1 - 1) + \frac{\Theta_0}{EI_1} x_1;$ $a < x_2 < L$ $y_2(x_2) = \frac{Q_0 ch \alpha_1 a + \alpha_1 M_1 sh \alpha_1 a + F_0}{\alpha_2^2 EI_2} \times$ $\times (sh \alpha_2 x_2 - \alpha_2 x_2) +$ $\frac{Q_0 sh \alpha_1 a + M_1 ch \alpha_1 a (ch \alpha_2 x_2 - 1)}{\alpha_1} +$ $+ \frac{\Theta_0}{\alpha_1} x_2 + \frac{Q_0 (ch \alpha_1 a - 1) + M_1 \alpha_1 sh \alpha_1 a}{\alpha_2^2 EI_2} x_2.$	$Q_A = \frac{M_2 - M_1 - F_0(L-a)}{L}; Q_B = \frac{M_1 - M_2 - F_0 a}{L};$ $y_1(a) = -\gamma_2(L-a);$ $\Theta_0 = -\frac{Q_A EI_2 (sh \alpha_1 a - \alpha_1 a)}{\alpha_1^2 [EI_2 a + EI_1(L-a)]} - \frac{M_1 \alpha_1 EI_2 (ch \alpha_1 a - 1)}{\alpha_1^2 [EI_2 a + EI_1(L-a)]} -$ $- \left(\frac{Q_0 sh \alpha_1 a + M_1 ch \alpha_1 a + F_0}{\alpha_2^2 [EI_2 a + EI_1(L-a)]} \right) [sh \alpha_2(L-a) - \alpha_2(L-a)] -$ $- \left(\frac{Q_0 sh \alpha_1 a + M_1 ch \alpha_1 a}{\alpha_2^2 [EI_2 a + EI_1(L-a)]} \right) \frac{EI_1}{[ch \alpha_2(L-a) - 1]} -$ $- \frac{[Q_A (ch \alpha_1 a - 1) + M_1 \alpha_1 sh \alpha_1 a] EI_2 (L-a)}{\alpha_1^2 [EI_2 a + EI_1(L-a)]}$

Tab. 2.2. c.d. Warunki obciążenia części przy sterowaniu stanem sprężystości – odkształcalnym

2.6.	 $M_1 = F_x \frac{d}{2}; \quad F_{zg} = \sqrt{F_p^2 + F_c^2};$	$\sum x=0; \sum y=0; \sum M_D=0; \sum M_A=0;$ $x=0; \quad y(0)=0; \quad y'(0)=0;$ $x_2=0; \quad y_D \neq 0; \quad y_2(0)=y_D(a);$ $EI_1 y_1''(0)=M_0; \quad EI_1 y_1''(0)=Q_0;$ $\Theta_2(0)=\Theta_D(a)$ $EI_2 y_2''(0)=-M_D(a); \quad EI_2 y_2''(0)=Q_D(a)$ $\alpha_1 = \sqrt{\frac{F_p + F_c}{EI_1}}; \quad \alpha_2 = \sqrt{\frac{F_x}{EI_2}}.$	$0 < x_1 < a$ $y_1(x_1) = \frac{Q_0}{\alpha_1^2 EI_1} (sh \alpha_1 x_1 - \alpha_1 x_1) +$ $+ \frac{M_0}{\alpha_1^2 EI_1} (ch \alpha_1 x_1 - 1);$ $a < x_2 < L$ $y_2(x_2) = \frac{Q_D}{\alpha_2^2 EI_2} (\alpha_2 x_2 - sh \alpha_2 x_2) +$ $+ M_D \alpha_2^2 EI_2 (1 - ch \alpha_2 x_2) + \frac{Q_0}{EI_2} x_2 + y_D.$	$Q_0 + Q_D + F_g = 0; \quad M_0 + M_1 - M_D + Q_0 a = 0;$ $Q_0 = \frac{F_g (1 - ch \alpha_1 a) - F_{zg} (\alpha_1 sh \alpha_1 a)}{\alpha_1 a sh \alpha_1 a};$ $M_0 = \frac{M_1 \alpha_1 (1 + ch \alpha_1 a) - F_{zg} (\alpha_1 a - sh \alpha_1 a)}{\alpha_1^2 a sh \alpha_1 a};$ $y_D(a) = \frac{Q_0}{\alpha_1^2 EI_1} (sh \alpha_1 a - \alpha_1 a) + \frac{M_0}{\alpha_1^2 EI_1} (ch \alpha_1 a - 1);$ $Q_D(a) = \frac{Q_0}{\alpha_2^2 EI_1} (ch \alpha_1 a - 1) + \frac{M_0}{\alpha_2 EI_1} sh \alpha_1 a;$ $M_D(a) = \frac{Q_0}{\alpha_2} sh \alpha_1 a + M_0 ch \alpha_1 a;$ $Q_D(a) = Q_0 ch \alpha_1 a + \alpha_1 M_0 sh \alpha_1 a.$
2.7.	 $M_1 = F_x (d/2); \quad \beta = (L-a)/L;$ $M_2 = F_x \cdot e.$	$x=0; \quad y(0)=0;$ $x=L; \quad y(L)=0; \quad y'(L)=0;$ $EI y_1' = -EI (y_0 \alpha^2 \cos \alpha x +$ $+ y_0 \alpha^2 \sin \alpha x);$ $EI y_1' = M_1(x); \quad EI = F_x / \alpha^2;$ $x=0; \quad M_1(0)=M_2;$ $C = \frac{\sin \beta \alpha L}{\sin \alpha L}; \quad D = \frac{\cos \alpha L}{\sin \alpha L};$ $\alpha = \sqrt{F_x / EI}.$	$y_1(x) = y_0 \alpha x + y_0 (1 - \cos \alpha x) + y_0 (\alpha x - \sin \alpha x);$ $y_{II}(x) = y_0 \alpha x + y_0 (1 - \cos \alpha x) + y_0 (\alpha x - \sin \alpha x);$ $f(x) = -\frac{F_p}{F_x} \frac{F_c}{\alpha F_x} \sin(x-a);$ $y_1(x) = \frac{F_p}{F_x} \left(\beta - C \right) x - \frac{2M_2}{F_x} \left(D - \frac{1}{\alpha L} \right) (\alpha x -$ $- \frac{2M_2}{F_x} (1 - \cos \alpha x) + \left(\frac{F_p C}{\alpha F_x} + \frac{2M_2 D}{F_x} \right) (\alpha x - \sin \alpha x);$ $y_{II}(x) = y_1(x) - \frac{F_p}{F_x} (x-a) + \frac{F_p}{\alpha F_x} \sin \alpha (x-a).$	$y_0' = -\frac{F_p}{\alpha F_x} \left(\beta - \frac{\sin \beta \alpha L}{\sin \alpha L} \right) - \frac{2M_2}{F_x} \left(\frac{\cos \alpha L}{\sin \alpha L} - \frac{1}{\alpha L} \right);$ $y_0'' = -\frac{2M_2}{F_x};$ $y_0''' = \frac{F_p}{\alpha F_x} \left(\frac{\sin \beta \alpha L}{\sin \alpha L} \right) + \frac{2M_2}{F_x} \left(\frac{\cos \alpha L}{\sin \alpha L} \right);$

Równania odkształceń na odcinkach I i II, w przypadku modelu 2.4 (tab. 2.2) i w innych rozpatrywanych przypadkach obciążenia, otrzymane analogicznie, przedstawiono w rubryce 4 tab. 2.2.

Wartości parametrów początkowych Q_0 i M_0 wyznaczono w skrajnych warunkach na końcu pręta

$$y_2'(L - a) = 0, \quad (2.9)$$

a równania odkształceń na końcu odkształconego pręta

$$y_1(a) = -y_2(L - a). \quad (2.10)$$

Wyniki rozwiązania równań (2.9) i (2.10) przedstawiono w rubryce 5 tab. 2.2.

Przy rozciąganiu mimośrodowym (model 2.4, $F_f \neq 0$, $e \neq 0$) równania różniczkowe (2.1) na każdym z odcinków I i II mają postać:

$$y_1^{IV} - \alpha_1^2 y_1'' = 0, \quad (2.11)$$

$$y_2^{IV} - \alpha_2^2 y_2'' = 0, \quad (2.12)$$

$$\text{gdzie: } \alpha_1 = \sqrt{\frac{F_{x1} - F_f}{EI}}, \quad \alpha_2 = \sqrt{\frac{F_{x1}}{EI}},$$

a rozwiązanie (2.11) i (2.12) zapisuje się jako (2.3) z uwzględnieniem α_1 na I odcinku. Podstawiając warunki brzegowe, warunki równowagi i warunki równoczesności odkształcenia (rubryka 3, tab. 2.2) do równania (2.11) i (2.12), uzyskano opis odkształceń, przedstawiony w rubryce 4 tab. 2.2.

Parametry początkowe Q_0 i M_0 wyznaczono przez warunki (2.9) i warunki równowagi

$$\sum M(L) = Q_0 L + M_0 + F_f \frac{d}{2} + F_{zg}(L - a) - F_{x1}e = 0, \quad (2.13)$$

a otrzymane wartości Q_0 i M_0 przytoczono w rubryce 5 tab. 2.2.

Specyfiką rozpatrywanego zagadnienia sterowania odkształceniami sprężystymi części sprężystość – odkształcalnej, przy dwustronnym rozciąganiu mimośrodowym (tab. 2.2, wiersz 2.5), jest łatwość określenia parametrów początkowych Q_0 przy znanych $M_1 = F_{x1} \cdot e_1$ i $M_2 = F_{x2} \cdot e_2$ z warunków równowagi sił, względem osi współrzędnych ($\sum Y = 0$) i równowagi momentów ($\sum M_b = 0$ – rubryki 3 i 5). Jednocześnie komplikuje się wyznaczenie kąta obrotu Q_0 , przy którym szukane wyrażenie otrzymano z równań (2.10) i przedstawiono je w rubryce 5.

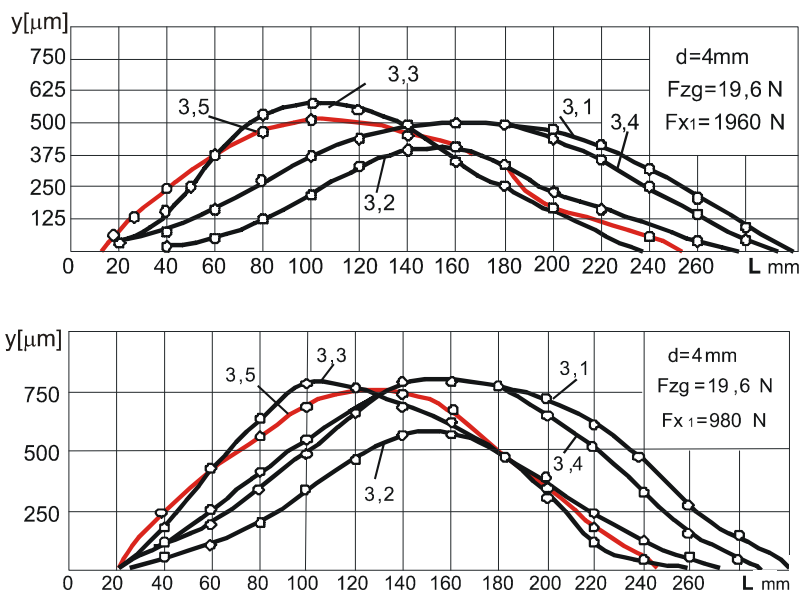
Przy obciążeniu długiej części siłą rozciągającą schemat obliczeniowy przedstawiono w postaci belki dwukrotnie statycznie niewyznaczalnej (tab. 2.2, wiersz 2.6), obciążonej siłą zginającą F_{zg} , momentem $M_1 = F_{fd}/2$ oraz siłami wzdłużnymi F_f i F_{x1} . Wartości sił i momentów są określone, przy czym $|F_{x1}| > |F_f|$ i $|F_f| > 0$, dlatego na lewo od punktu A pręt zawsze jest rozciągnięty, a F_f może być ujemna, ponieważ zmienia się kierunek posuwu roboczego f . W przypadku średnicy równej d_1 na lewym odcinku części (od punktu D do 0) i średnicy d_2 (na prawo od D), osiowe momenty bezwładności przekroju będą równe odpowiednio: $I_1 = \frac{\pi d_1^4}{64}$, $I_2 = \frac{\pi d_2^4}{64}$, a parametry $\alpha_2 = \sqrt{\frac{F_{x1}}{EI_2}}$,

$\alpha_1 = \sqrt{\frac{F_{x1} + F_f}{EI_1}}$. Przy ruchu podpory A w prawo, punkt D przesuwa się za nią z taką samą prędkością, a odległość b ma wartość stałą. Wymiar a zmienia się w zakresie: $0 \leq a \leq (1-a)$. W celu rozwiązania podwójnie statycznie niewyznaczalnego zadania zginania wzdłużnie – poprzecznego pręta, przy obciążeniu ruchomą siłą rozciągającą F_{x1} , przeanalizowano jego lewą i prawą część.

Z warunków brzegowych i warunków wspólnego oddziaływania odkształceń (tab. 2.2, wiersz 2.6) otrzymano funkcje odkształceń (rubryka 4) i parametry początkowe (rubryka 5).

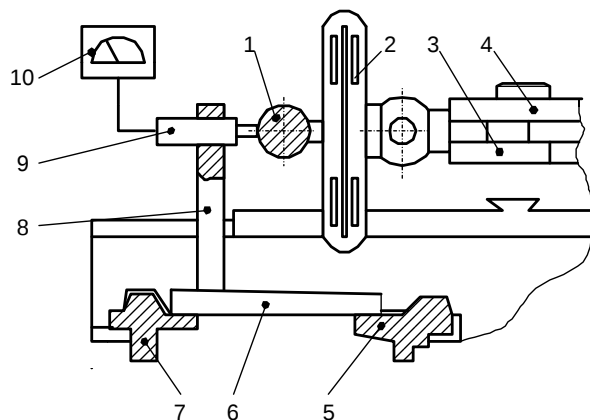
Na rys. 2.2 przedstawiono wyniki modelowania wartości odkształceń sprężystych części, w strefie obróbki ($x = a$), przy czym numer zależności analitycznych odpowiada numerowi modelu w tab. 2.2. Zależność 2.5 otrzymano eksperymentalnie przy zamocowaniu części w uchwycie wrzeczona i sprężynującej tulei konika, bez możliwości obrotu przekroju w miejscu zamocowania (model 2.3).

Badania eksperymentalne odkształceń sprężystych części o małej sztywności przeprowadzono na specjalnym stanowisku, wykonanym na bazie tokarki (rys. 2.3).



Rys. 2.2. Zależności analityczne zmiany odkształceń sprężystych wałka

Wałek 1 ustawiony w uchwycie tokarki między wzorcowym dynamometrem ściskania 2 typu DOSM-3-02 (zakres pomiarowy od 196 do 1960 N), zamocowanym, przy pomocy wspornika 3 w imaku nożowym 4 obrabiarki. Promieniową składową F_p siły skrawania symulowano przy pomocy dynamometru 2. Do rejestracji odkształceń sprężystych zastosowano elektromagnetyczny przetwornik przemieszczeń 9 z blokiem 10 aparatury rejestrującej. Przetwornik 9 zamocowano w stojaku 8 na płycie 6 ustawionej na prowadnicach 5 i 7.



Rys. 2.3. Schemat stanowiska eksperymentalnego do badania odkształceń sprężystych części

Na stanowisku badano odkształcenia sprężyste wálka, o średnicach $d = 2 - 18$ mm oraz długościach 100, 200 i 300 mm. Maksymalne odkształcenie części, przy rozciąganiu osiową siłą F_{x1} , zmniejsza się nieliniowo, zgodnie z przytoczonymi wyżej równaniami (tab. 2.2).

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że rozbieżność między wynikami analitycznymi (zgodnie z modelem 2.2) i eksperymentalnymi wynosi 3 – 12%. Obliczenia przeprowadzono zgodnie z modelem 2.4 przy założeniu, że $F_{x1} \neq 0$, $e = 0$ w pełni odpowiadają danym, otrzymanym z modelu 2.1.

Pewne rozbieżności między wynikami mogły być spowodowane przyjętymi założeniami przy wyborze schematów obliczeniowych.

Na podstawie wykonanych obliczeń odkształceń sprężystych, spowodowanych rozciąganiem osiowym, a także na podstawie danych eksperymentalnych można stwierdzić, że w dowolnym punkcie części ($L/d = 15 - 50$ w rozpatrywanym zakresie średnic wálków), w szczególności punkcie obróbki, znajdującym się bezpośrednio pod ostrzem ($x = a$), wartość odkształceń sprężystych badanych wálków, może być istotnie zmniejszona w wyniku doboru odpowiedniej siły rozciągającej F_{x1} i mimośrodu e [13, 59, 60, 61].

Przy opracowaniu sposobów technologicznych sterowania dokładnością szlifowania wálków o małej sztywności, stan sprężystości – odkształcalny może być wywołany ściskającymi siłami wzdłużnymi, przesuniętymi względem osi kłków lub przyłożonymi dodatkowo do końców części momentami zginającymi.

Schemat obliczeniowy działających sił i linia sprężysta wálka jest przedstawiony w tab. 2.2 (wiersz 2.7). Przyłożenie sił ściskających, przesuniętych względem osi kłków, rozpatrywano jako sposób wytworzenia momentu zginającego, przyłożonego do czoła części o małej sztywności i jako przesłanka technologiczna sterowania dokładnością obróbki.

W przypadku belki ściśniętej siłą wzdłużną i przenoszącej dowolną siłę poprzeczną rozwiązanie równania (2.1) może być przedstawione w postaci:

$$y = y_0 + y_0' \alpha x + y_0'' (1 - \cos \alpha x) + y_0''' (\alpha x - \sin \alpha x) + f(x), \quad (2.14)$$

gdzie: y_0 , y_0' , y_0'' , y_0''' – odpowiednio odkształcenie, kąt obrotu, druga i trzecia pochodna z odkształcenia w początku układu współrzędnych; $f(x)$ – funkcja wpływu obciążeń poprzecznych.

Równania linii odkształceń sprężystych na odcinkach I i II mają postać:

$$\begin{cases} y_I = y_0' \alpha x + y_0'' (1 - \cos \alpha x) + y_0''' (\alpha x - \sin \alpha x), \\ y_{II} = y_0' \alpha x + y_0'' (1 - \cos \alpha x) + y_0''' (\alpha x - \sin \alpha x) + f(x). \end{cases} \quad (2.15)$$

Parametry początkowe, zgodnie z wcześniej przyjętymi (tab. 2.1) warunkami, są następujące:

$$y_0' = -\frac{F_{zg}}{\alpha F_{x1}} \left\{ \frac{[\alpha L(\beta - 1 + \cos \beta \alpha L) - \sin \alpha L](\cos \alpha L)}{\alpha L \cos \alpha L - \sin \alpha L} - (1 - \cos \beta \alpha L) \right\} +$$

$$+ \frac{M_2}{F_{x1}} \left[\frac{(\alpha L \sin \alpha L + \cos \alpha L - 1)(1 - \cos \alpha L)}{\alpha L \cos \alpha L - \sin \alpha L} + \sin \alpha L \right], \quad (2.16)$$

$$y_0'' = \frac{F_{zg}}{\alpha F_{x1}} \left[\frac{[\alpha L(\beta - 1 + \cos \beta \alpha L) - \sin \alpha L](\cos \beta \alpha L)}{\alpha L \cos \alpha L - \sin \alpha L} \right] -$$

$$\frac{M_2}{F_{x1}} \left(\frac{\alpha L \sin \alpha L + \cos \alpha L - 1}{\alpha L \cos \alpha L - \sin \alpha L} \right), \quad (2.17)$$

gdzie: $\beta = \frac{L-a}{L}$, F_{x1} – w danym przypadku siła ściskająca.

Po całkowaniu i przekształceniu (2.15) otrzymano równanie momentu zginającego na I odcinku

$$M_1(x) = -\frac{F_{x1}}{\alpha^2} (y_0'' \alpha^2 \cos \alpha x + y_0''' \alpha^2 \sin \alpha x). \quad (2.18)$$

Uwzględniając, że przy $x = 0$, $M_1(0) = M_2$ z (2.18) wynika, że $M_2 = \frac{F_{x1}}{\alpha^3}$ i odpowiednio, $y_0'' = \frac{-M_2}{F_{x1}}$. Po uwzględnieniu funkcji wpływu obciążenia poprzecznego

$$f(x) = -\frac{F_{zg}(x-a)}{F_{x1}} + \frac{F_{zg}}{\alpha F_{x1}} \sin(x-a), \quad (2.19)$$

równanie odkształceń na odcinkach ostatecznie przyjmuje postać:

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1(x) = -\frac{F_{zg}}{F_{x1}} [A(1 - \cos \alpha L) - (1 - \cos \beta \alpha L)] x + \frac{M_2}{F_{x1}} [B(1 - \cos \alpha L + \sin \alpha L)] \alpha x - \\ \quad \frac{M_2}{F_{x1}} (1 - \cos \alpha x) + \left(\frac{F_{zg} A}{\alpha F_{x1}} - \frac{M_2 B}{F_{x1}} \right) (\alpha x - \sin \alpha x), \\ y_{II}(x) = y_I(x) - \frac{F_{zg}}{F_{x1}} (x-a) - \frac{F_{zg}}{\alpha F_{x1}} \sin(x-a). \end{array} \right. \quad (2.20)$$

gdzie:

$$A = \frac{\alpha L(\beta - 1 + \cos \beta \alpha L) - \sin \beta \alpha L}{\alpha L \cos \alpha L - \sin \alpha L}, \quad B = \frac{\alpha L \sin \alpha L + \cos \alpha L - 1}{\alpha L \cos \alpha L - \sin \alpha L}.$$

Do oceny efektywności sposobu sterowania stanem sprężystości – odkształcalnym, przy przyłożeniu momentów zginających do czoła włka i jego możliwości technologicznych, otrzymano zależność, opisującą sprężystą linię włka w postaci (2.15).

Parametry początkowe określane są z zależności:

$$\begin{cases} y_0' = \frac{F_{zg}}{\alpha F_{x1}} \left(\beta - \frac{\sin \beta \alpha L}{\sin \alpha L} \right) - \frac{2M_2}{F_{x1}} \left(\frac{\cos \alpha L}{\sin \alpha L} - \frac{1}{\alpha L} \right), \\ y_0'' = -\frac{2M_2}{F_{x1}}, \\ y_0''' = \frac{F_{zg}}{\alpha F_{x1}} \left(\frac{\sin \beta \alpha L}{\sin \alpha L} \right) - \frac{2M_2}{F_{x1}} \left(\frac{\cos \alpha L}{\sin \alpha L} \right). \end{cases} \quad (2.21)$$

Po uwzględnieniu (2.19) funkcja odkształceń ostatecznie przyjmuje postać

$$\begin{cases} y_I' = \frac{F_{zg}}{\alpha F_{x1}} (\beta - C) x - \frac{2M_2}{F_{x1}} \left(D - \frac{1}{\alpha L} \right) \alpha x - \frac{2M_2}{F_{x1}} (1 - \cos \alpha x) + \\ + \left(\frac{F_{zg} C}{\alpha F_{x1}} + \frac{2M_2 D}{F_{x1}} \right) (\alpha x - \sin \alpha x), \\ y_{II}(x) = y_I(x) - \frac{F_{zg}}{F_{x1}} (x - a) + \frac{F_{zg}}{\alpha F_{x1}} \sin(x - a), \end{cases} \quad (2.22)$$

gdzie: $C = \frac{\sin \beta \alpha L}{\sin \alpha L}$, $D = \frac{\cos \alpha L}{\sin \alpha L}$.

Równania linii odkształceń sprężystych (2.20) i (2.22), a także przedstawione w tab. 2.2, określające położenie i kształt włka o małej sztywności w zależności od jego wymiarów i działających obciążeń, umożliwiają ocenę efektywności sterowania stanem sprężystości – odkształcalnym włka o małej sztywności przy toczeniu.

Sterowanie stanem sprężystości – odkształcalnym, przy zastosowaniu jako oddziaływań regulacyjnych siły rozciągającej F_{x1} i mimośrod e , umożliwiło sformułowanie problemu optymalizacji: określenie wartości siły rozciągającej F_{x1} i mimośrod e jako funkcji parametrów części L i d , składowych sił skrawania F_p , F_f , F_c (a więc i parametrów skrawania v , f , a_p), odległości a od ostrza do miejsca zamocowania części we wrzecionie i bieżącej współrzędnej x , minimalizujące odkształcenie części

$$y = \min_{F_{x1}, e} \varphi(d, l, F_f, v, a_p, f, F_{x1}, e, a, x). \quad (2.23)$$

Funkcję y opracowano na bazie zależności, przedstawionych w tab.2.2 (rubryki 4 i 5). Wartości składowych F_p , F_c i F_f siły skrawania określano warunkami technologicznymi, to znaczy parametrami i geometrią skrawania; u_i ograniczenia technologiczne, nakładane na zmienny parametr F_{x1} , wynikające ze specyfiki konstrukcyjnej urządzeń oraz dopuszczalnych naprężeń na rozciąganie.

$$a \in \{0, L\}, \quad x \in \{0, L\}, \quad e \in \{0, 2d\},$$

$$F_{x1} \in \bar{\sigma} = \{(F_{x1}): g_i(F_{x1}) \leq u_i\}, \quad u_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.24)$$

Najbardziej istotny wpływ na dokładność obróbki ma wartość odkształcenia części bezpośrednio pod ostrzem, wyrażenia (2.23) i (2.24) należy uzupełnić o ograniczenie

$$a = L - x. \quad (2.25)$$

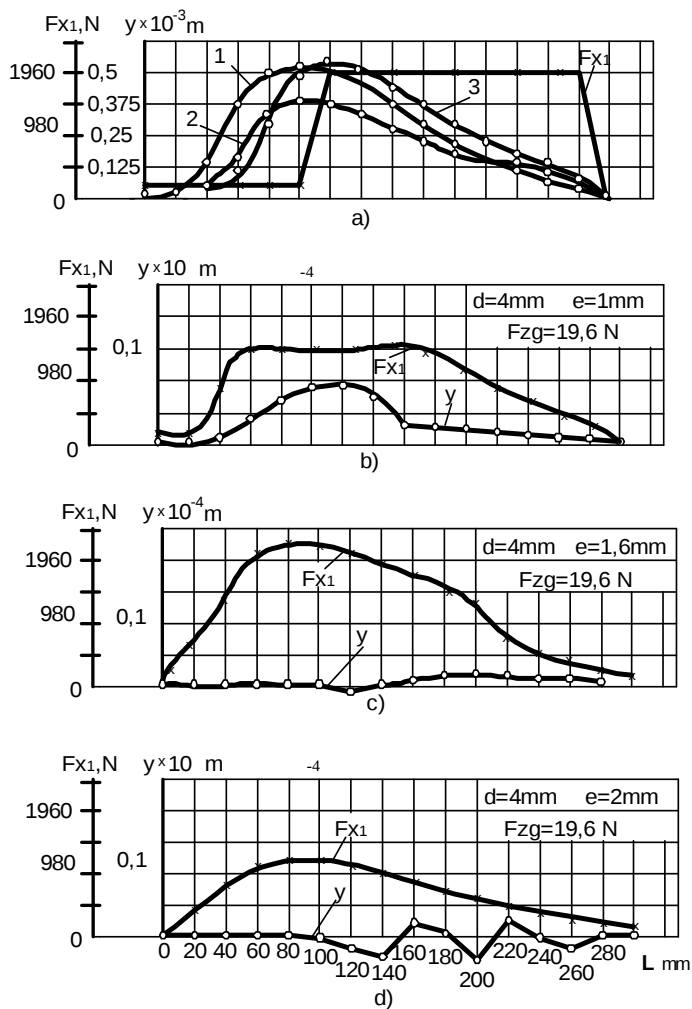
Sformułowany problem odnosi się do zagadnień programowania nieliniowego i może być rozwiązany odpowiednimi metodami [8, 17].

Najprościej można określić odpowiednie wartości wzdłużnej siły rozciągającej F_{x1} , przy rozciąganiu osiowym (model 2.2 lub model 2.4 przy $e = 0$). Do wyboru wartości F_{x1} , odpowiadających zależnościom (2.23), (2.24), (2.25), zastosowano metodę dwudzielności. Badania numeryczne przy pomocy metody siatek (rys. 2.4a) pokazały, że funkcja celu y należy do jednomodalnych [8, 17].

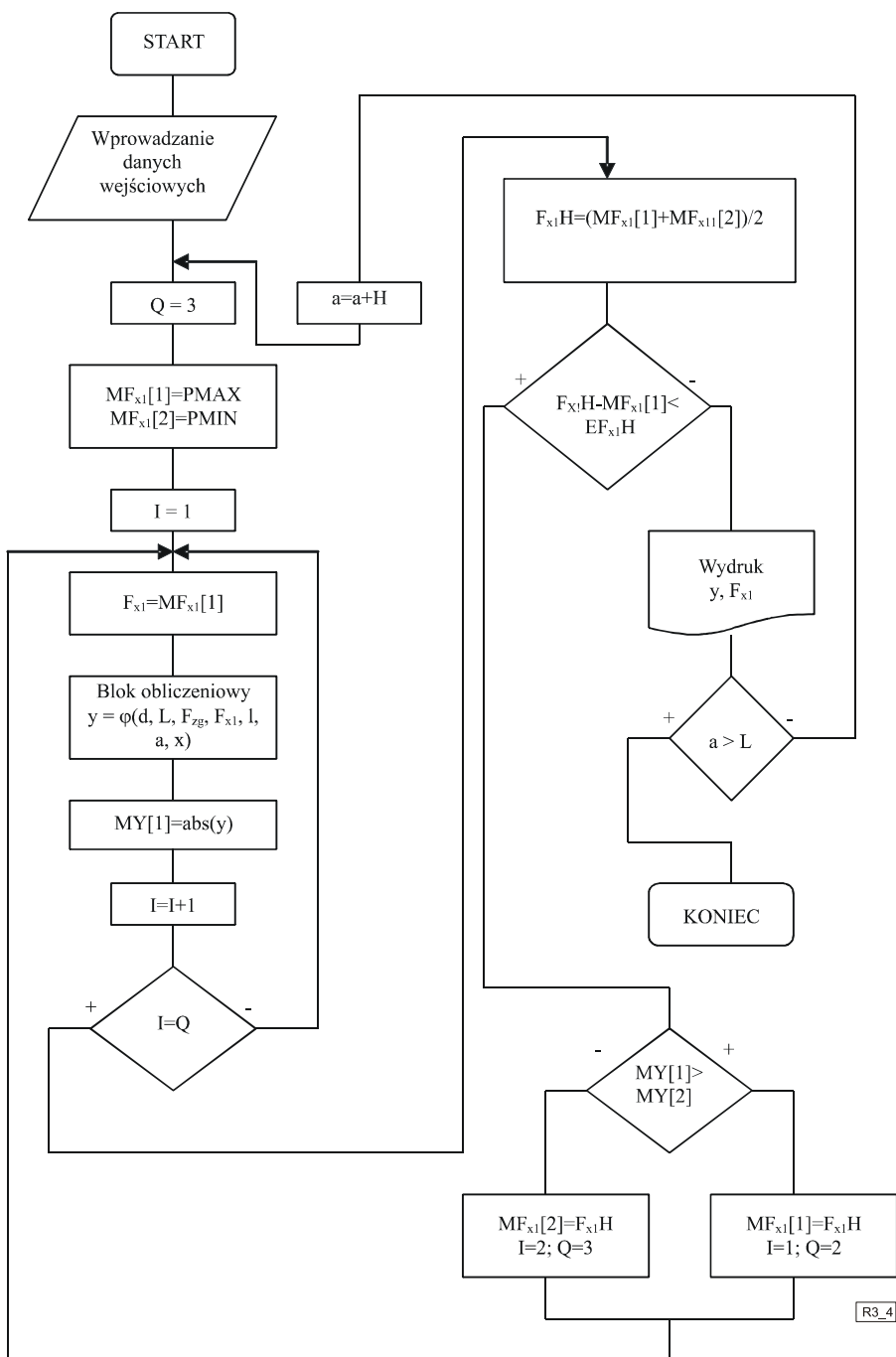
Metoda dwudzielności, której schemat blokowy programu realizacji przedstawiono na rys. 2.5, umożliwia wyznaczenie wartości ekstremalnej F_{x1} w ciągu

$$K_i = \log_2 \left(F_{x1max} - \frac{F_{x1min}}{\Delta F_{x1}} \right) \quad (2.26)$$

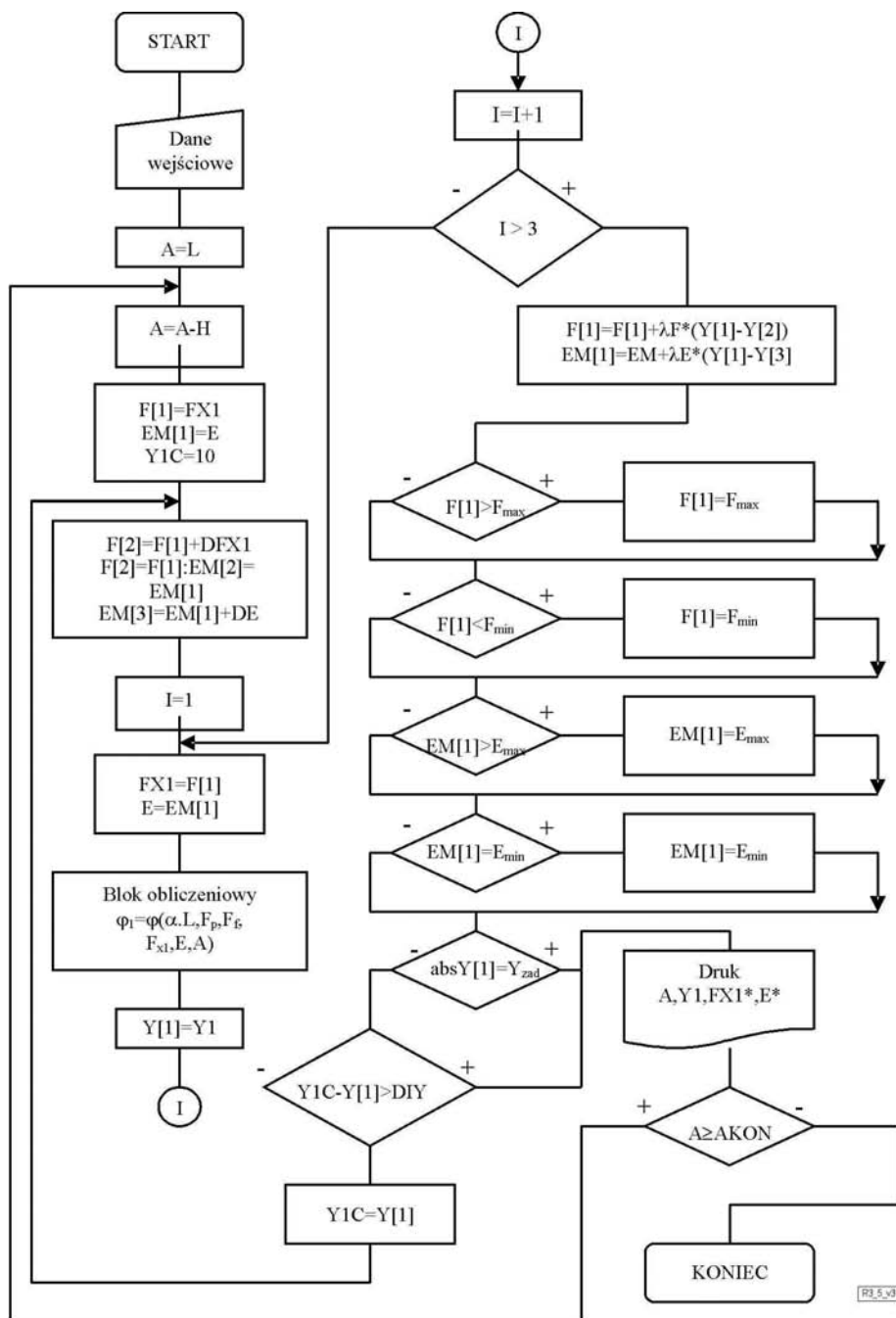
kroków lub drogą $(K - 1)$ – krotnego wyliczania funkcji celu y . W schemacie blokowym programu zastosowano następujące oznaczenia: $FMAX$, $FMIN$ – maksymalne i minimalne wartości siły rozciągającej $F_{x1} \geq \{FMIN, FMAX\}$; $M F_{x1}$ – dwuelementowa tablica granic, kolejno zmniejszającego się zakresu, do którego należy F_{x1} ; MY – dwuelementowa tablica wartości funkcji celu na końcach rozpatrywanego zakresu, $F_{x1}N$ – długość następnego odcinka; $EF_{x1}H = \Delta F_{x1}$; I i Q – robocze zmienne całkowite; H – krok długości części.



Rys. 2.4. Funkcje celu i zmiany siły rozciągającej F_{x1} w zależności od długości obróbki uzyskane w przypadku różnych modeli



Rys. 2.5. Schemat blokowy algorytmu jednowymiarowego poszukiwania metodą dwudzielności



Rys. 2.6. Schemat blokowy realizacji algorytmu dwuwymiarowego poszukiwania metodą gradientu

Wyniki modelowania (rys. 2.4 b, c, d) świadczą o możliwości otrzymania, określonych przez warunki technologiczne, małych wartości odkształceń sprężystych w wyniku sterowania siłą F_{x1} , lecz w związku z warunkiem (2.24), w tych przypadkach celowe jest sterowanie F_{x1} przy danych wartościach mimośrodów e przy badaniu modelu 2.4 [138, 146, 179].

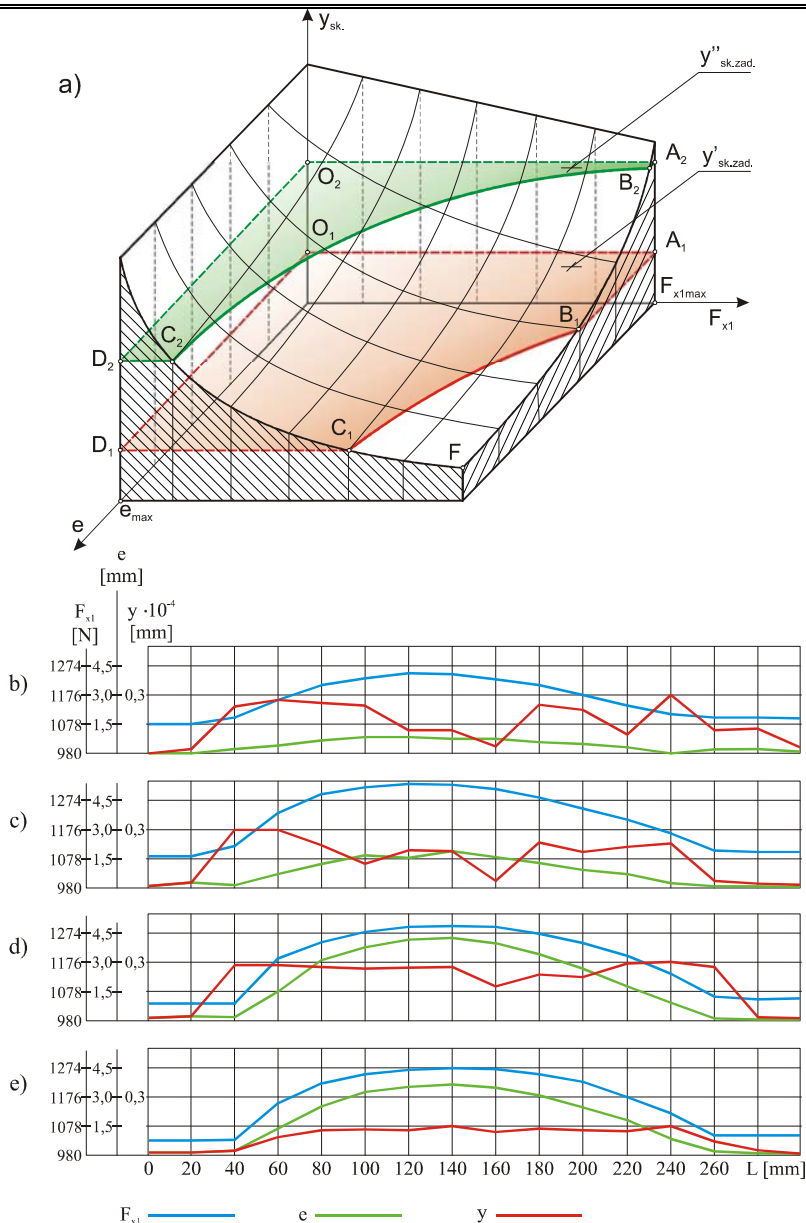
W celu osiągnięcia wymaganej małej wartości odkształcenia można wykorzystać rozciąganie mimośrodowe (model 2.4 przy $e \neq 0$).

Analiza wyników badań numerycznych, otrzymanych z zależności (2.23), (2.24) i (2.25), a także potwierdzające je badania eksperymentalne wykazały, że odkształcenia sprężyste walców o małej sztywności przy sterowaniu rozciąganiem mimośrodowym w przypadku rozpatrywanej klasy części, zmniejszają się od 2 do 20 razy, przy czym w przypadku walców o $d < 6$ mm osiąga się to przy mniejszych wartościach siły rozciągającej. Pokazano, że rozciąganie mimośrodowe bardzo efektywnie zmniejsza odkształcenia sprężyste walców o $d \geq 6$ mm ($L = 300$ mm) w porównaniu z rozciąganiem osiowym. Na przykład przy $d = 8$ mm, $L = 300$ mm, $F_p = 147$ N, $\lambda_1 = F_p/F_f = 0,5$ ($\kappa_r = 90^\circ$) i wartościach $F_{x1} = 980$ N, $e = 2,5$ mm (rys. 2.6d) odkształcenia sprężyste na całej długości obróbki są od 2 do 2,4 razy mniejsze niż przy rozciąganiu osiowym. W tym czasie przy sterowaniu adaptacyjnym wartością mimośrodu e i siłą F_{x1} , wartość odkształceń sprężystych może być zmniejszona 18 razy; wynosi ona $(3 - 4,5) \cdot 10^{-2}$ mm ($L = 300$ mm, $d = 8$ mm, $F_p = 147$ N, $\lambda_1 = 0,5$, $F_{x1} = 1245$ N, $e = 7,8$ mm) i praktycznie jest ustabilizowana na całej długości (rys. 2.7e).

W celu wyznaczenia optymalnych parametrów F_{x1} i e , z uwzględnieniem ograniczeń (2.24), (2.25), mogą być wykorzystane zarówno metody siatek, jak i (w związku z jednomodalnością funkcji odpowiedzi) metoda gradientu.

Na rys. 2.5 pokazano schemat blokowy programu, realizującego algorytm poszukiwania dwuwymiarowego, gdzie przyjęto oznaczenia zgodne ze schematem blokowym programu metody dwudzielności. Dodatkowo oznaczono: EM – macierz, elementami której są parametry F_{x1} i e ; λF i λE – podziałowe współczynniki kroku szukania; MY – macierz, której elementami są $\phi(F_{x1} + DF_{x1}, E)$, $\phi(F_{x1}, E + DE)$; U_1C – wartość bazowa funkcji celu.

Na rys. 2.7a przedstawiono ogólny widok przestrzennej powierzchni odpowiedzi wartości funkcji celu (2.23) z ograniczeniami technologicznymi w postaci F_{x1max} , e_{max} , o ekstremum w punkcie F . W wielu przypadkach nie ma konieczności znajdowania ekstremum, a wystarczy ograniczyć się tylko do wymaganej wartości $y_{sk.zad.}$. Płaszczyzny tnące $O_1A_1C_1D_1$ i $O_2A_2C_2D_2$ odpowiadają żądanym wartościom $y'_{sk.zad.}$ i $y''_{sk.zad.}$, względem których przebiega poszukiwanie zbioru optymalnych wartości F_{x1} i e .



Rys. 2.7. Ogólny widok przestrzennej powierzchni odpowiedzi wartości funkcji celu – a) zależności zmiany funkcji celu $y(0)$, siły rozciągającej $F_{x1}(x)$ i mimośrod e zależnie od długości L przy $x = a - b, c, d, e$; b) $d=6$ mm, $F_{zg}=49$ N, $F_{x10}=980$ N, $L=300$ mm, $F_f=30$ N), c) ($d=6$ mm, $F_{zg}=70$ N, $F_{x10}=980$ N, $L=300$ mm, $F_f=40$ N), d) ($d=8$ mm, $F_{zg}=147$ N, $F_{x10}=980$ N, $L=300$ mm, $F_f=196$ N), e) ($d=8$ mm, $F_{zg}=147$ N, $F_{x10}=980$ N, $L=300$ mm, $F_f=196$ N)

Na rys. 2.7b,c,d,e przedstawiono zależności zmiany funkcji celu y , siły rozciągającej F_{x1} i mimośrodów e przy różnych średnicach wałka i wartościach sił skrawania, otrzymane przy pomocy modelowania w wyniku realizacji algorytmu dwuwymiarowego poszukiwania metodą gradientów. Modelowanie przeprowadzono, przyjmując następujące warunki: $d = 6$ mm, $F_{zg} = 49$ N, $F_{x10} = 980$ N, $F_f = 30$ N (rys. 2.7b); $d = 6$ mm, $F_{zg} = 70$ N, $F_{x10} = 980$ N, $F_f = 40$ N (rys. 2.7c); $d = 8$ mm, $F_{zg} = 147$ N, $F_{x10} = 980$ N, $F_f = 196$ N (rys. 2.7d); $d = 8$ mm, $F_{zg} = 147$ N, $F_{x10} = 980$ N, $F_f = 196$ N (rys. 2.7e).

Z analizy danych przedstawionych na rys. 2.7 wynika, że sterowanie stopniem dokładności obróbki mechanicznej, przy stanie sprężystości – odkształcalnym części o $L/d = 15 - 50$ i więcej, dostatecznie efektywnie można prowadzić drogą sterowania dwoma parametrami: siłą rozciągającą F_{x1} i mimośrodem e ; możliwe jest przy tym uzyskanie teoretycznie założonej dokładności.

Wpływ sił wzdłużnych na drgania przy zginaniu wzdłużno – poprzecznym przedstawiono m.in. w pracach [5, 14].

Obciążenie półfabrykatu siłą rozciągającą, wywołującą stan sprężystości – odkształcalny jest równoważne powstaniu dodatkowej podpory, powodującej zwiększenie sztywności statycznej części. Dlatego bazowanie i zamocowanie półfabrykatów może być realizowane w uchwytach samocentrujących lub w tulei sprężynującej.

2.3. Metody technologiczne podwyższenia dokładności obróbki wałków sprężystości – odkształcalnych na etapie przygotowania produkcji

Do czynników obniżających dokładność obróbki wałków o małej sztywności, w stanie sprężystości – odkształcalnym, zalicza się „Przyrządy mocujące” – niewystarczające warunki mocowania, przemieszczenia osi centrowania części, niedokładność bazowania części, kształt elementów zaciskowych, odkształcenia sprężyste i plastyczne. Przy tym niezawodne mocowanie części podczas obróbki wałków o małej sztywności powinno eliminować wzajemne przemieszczenie powierzchni bazowych i uchwytów oraz uniemożliwiać wyrwanie półfabrykatu ze szczęk uchwytów.

Przy wyznaczeniu niezbędnej siły zamocowania w uchwytach wrzeczona i konika przy obróbce z rozciąganiem uwzględnia się rodzaj półfabrykatu, tolerancje wymiarów półfabrykatu (części), przyjęty proces technologiczny obróbki i siły skrawania, wymagania dokładności, specyfikę konstrukcji obrabiarki. Siły mocowania półfabrykatu w uchwycie muszą zagwarantować wystarczającą sztywność kontaktu powierzchni stykowych, uniemożliwić ich

przemieszczenie podczas obróbki, wyeliminować wzbudzenie drgań, a także zapewnić odpowiednie warunki bhp produkcji, przeciwdziałając wyrwaniu półfabrykatu z uchwytu.

Obciążenie części siłą rozciągającą jest równoważne dodatkowej podporze, zwiększającej jej sztywność statyczną. W tym celu bazowanie i zamocowanie elementu w koniku jest realizowane w uchwytach krzywkowych lub sprężynujących tulejach mocujących.

Przy mocowaniu wałka we wrzecienniku i koniku, przy obróbce z rozciąganiem, uwzględnia się rodzaj półfabrykatu, graniczne i dopuszczalne odchyłki jego wymiarów, materiał, przyjęty proces technologiczny obróbki i działające przy tym siły skrawania, wymaganą dokładność obróbki, specyfikę konstrukcji obrabiarki. Siły zamocowania części w uchwycie powinny gwarantować wystarczającą sztywność styku powierzchni, uniemożliwiać ich przemieszczenie w procesie obróbki oraz powstanie drgań. Poprzeczne siły zamocowania wyznacza się z uwzględnieniem współczynnika zapasu $K_z = 1,5 - 8$ [8].

Współczynnik ten wybiera się w zależności od konkretnych warunków wykonania procesu technologicznego, uwzględnia on m.in. zmienność siły skrawania, niejednorodność materiału części, stopień ostrza oraz zmianę położenia reakcji podpór, w wyniku odchyłeń w granicach tolerancji rzeczywistych baz technologicznych od geometrycznie prawidłowego kształtu.

Przy zamocowaniu części w uchwycie trójszczekowym i występowaniu osiowej siły rozciągającej niezbędna jest dodatkowa siła tarcia, przeciwdziałająca osiowemu przesunięciu części. Siłę zamocowania wyznacza się według zależności

$$T = \frac{2K_z M_s}{3fd} + \frac{K_z F_{x1}}{3f}, \quad (2.27)$$

gdzie: M_s – moment sił skrawania; f – współczynnik tarcia.

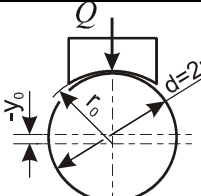
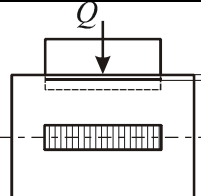
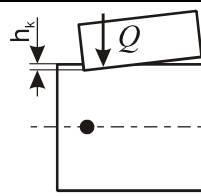
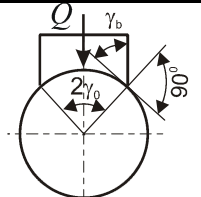
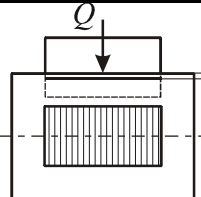
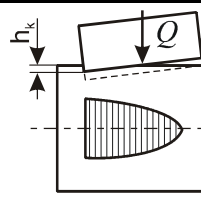
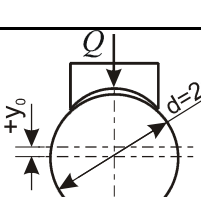
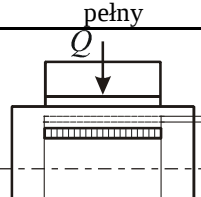
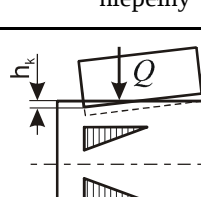
Przy zamocowaniu w tulei sprężynującej o dużej powierzchni mocowania, sumaryczna siła zamocowania, dociskająca zaciski mechanizmu do części, z uwzględnieniem współczynnika zapasu K_z jest równa

$$T_z = K_z \frac{R}{\mu} = \frac{K_z}{\mu} \sqrt{\left(\frac{2M_s}{d}\right)^2 + F_{x1}^2}. \quad (2.28)$$

Współczynnik przyczepności μ pomiędzy szczękami tulei sprężynującej zależy od rodzaju nacięć na szczękach, materiału części i schematu działania sił. Zalecenia odnośnie wyboru współczynnika μ , w zależności od rodzaju naruszenia więzów ciernych (odcisk sprężysty, odcisk plastyczny, mikroskrawanie) podano w pracy [16, 27, 124]. Zwiększenie sztywności układu uchwyt – część i zwiększenie sił zacisku sprzyja zwiększeniu dokładności i wydajności, ale z kolei zwiększenie sił zacisku może prowadzić do znaczących odkształceń stykowych.

Wartość odkształcenia stykowego h_k w połączeniu elementu zaciskającego z częścią, zależy od materiału i kształtu powierzchni współpracujących części, kątów wciśnięcia wzdłużnego ν i poprzecznego γ_b , siły normalnej Q i powierzchni styku F_k (lub naprężeń normalnych σ).

Tab. 2.3. Formy styku elementu zaciskowego z mocowaną częścią

Odchyłka wymiaru półfabrykatu	Widoki styku elementu zaciskowego z mocowaną częścią w przekrojach		
	Przekrój poprzeczny	Przekrój wzdłużny	
		$\nu_0 = 0$	$\nu_0 \neq 0$
$\Delta d < 0$ ($r < r_0$) $y_0 < 0$	 Punktowy	 Liniowy	 Punktowy
$\Delta d = 0$ ($r = r_0$) $y_0 = 0$	 Liniowy	 Powierzchniowy – pełny	 Powierzchniowy – niepełny
$\Delta d > 0$ ($r > r_0$) $y_0 > 0$	 Krawędziowy	 Dwustronny powierzchniowy – pełny	 Dwustronny powierzchniowy – niepełny

W zależności od tych czynników mogą występować różne formy styku (tab. 2.3): punktowy, liniowy, powierzchniowy – pełny lub powierzchniowy – niepełny, krawędziowy, dwuliniowy, dwustronny powierzchniowy – niepełny.

W celu wyznaczenia podstawowych charakterystyk zamocowania: siły, sztywności i dokładności powinno być znane odkształcenie w miejscu styku. Wyznaczenie odkształceń stykowych metodami analitycznymi, w każdym konkretnym przypadku, jest związane z dużą pracochłonnością obliczeń i w niektórych przypadkach może być uzyskane na bazie danych eksperymentalnych. Przy różnorodnych parach tarcia metodą najmniejszych kwadratów otrzymano zależność do obliczania odkształcenia stykowego (μm) w miejscu styku elementu zaciskowego z półfabrykatem [16, 153, 154]

$$h_k = A_m \sigma' + Q[A_d \Delta d + A_v v + A_\gamma (90^\circ - \gamma_b)] \quad (2.29)$$

gdzie: A_m , A_d , A_v , A_γ – współczynniki zależne głównie od: materiału i chropowatości współdziałających powierzchni, odchyłki wymiarów części, charakteru wzdłużnego i poprzecznego wcisku elementów mocujących w półfabrykat; $\sigma = Q/F_k$ – naprężenie normalne przy pełnym styku (przy zamocowaniu półfabrykatu okrągłego $F_k = \pi d \gamma b'/180^\circ$, b' – długość szczęki elementu zaciskającego, γ – połowa kąta opasania) [16, 152].

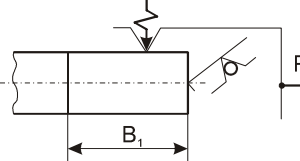
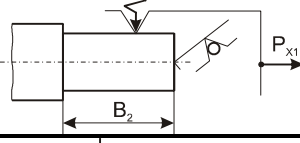
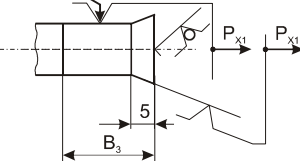
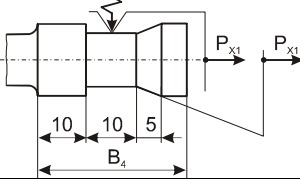
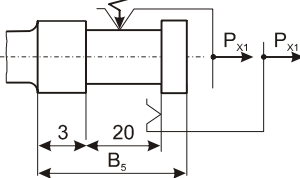
Analiza wartości wielkości obliczeniowych odkształceń stykowych wykazała, że w wielu przypadkach powodują konieczność dodatkowej obróbki odcinka powierzchni części, znajdującego się w strefie zacisku lub odcięcia tego odcinka, a następnie jego wykorzystania lub utylizacji. Odcinki części można odnieść, jak wiadomo z teorii bazowania, do zastępczych baz technologicznych, które są tworzone specjalnie ze względów technologicznych i po obróbce przedmiotu mogą być usunięte.

Analiza procesów technologicznych obróbki części o małej sztywności wykazała, że w przemyśle obrabiarkowym, przy obróbce śrub pociągowych, stosowane są zastępcze bazy technologiczne w celu powtórnego wykonania nakiełków, przy czym bazy te są odcinane. W przemyśle lotniczym przy obróbce wielonożowej również stosowane są podobne bazy, a ich występowanie jest uwarunkowane specyfiką bazowania wałków o małej sztywności i wyposażenia wielonarzędziowego. Rozpatrzona specyfika bazowania i zamocowania wałków o małej sztywności, w procesie zwykłej obróbki wieloprześciowej i obróbki, z przyłożeniem siły rozciągającej, może być przedstawiona jak w tab. 2.4, gdzie w wierszu 1 pokazano schemat bazowania bez obróbki wstępnej, w wierszu 2 z obróbką końca półfabrykatu, a następnie zamocowaniem i obciążeniem go siłą rozciągającą przy wykorzystaniu mechanizmów mocujących, z zamykaniem siłowym wskutek działania sił zewnętrznych w całym okresie pracy; wiersze 3, 4, 5, 6 – przy zastosowaniu zastępczych baz technologicznych i mechanizmów zaciskowych, z zamykaniem geometrycznym i siłowym przy obróbce, tak z rozciąganiem osiowym, jak i przemieszczeniem odnośnie do osi kłków, przy momencie sterującym na czołach części.

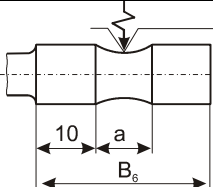
PODSTAWY TEORETYCZNE METOD STEROWANIA DOKŁADNOŚCIĄ ZAUTOMATYZOWANEJ OBRÓBKI WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Takie wykonanie baz technologicznych zwiększa niezawodność zacisku i wyklucza przemieszczenie powierzchni części względem mechanizmu zaciskającego w procesie obróbki.

Tab. 2.4. Specyfika bazowania i zamocowania wałków o małej sztywności przy obróbce konwencjonalnej oraz przy przyłożeniu siły F_{x1}

L.p.	Schematy bazowania końca części przy obciążeniu siłą rozciągającą	Wskaźniki uwzględniane przy wyborze schematu bazowania						Uwagi
		Odstąpienia stykowe	Szerokość przetoczenia	Czas maszynowy	Czas jednostkowy	Koszt przygotowania	Koszt odpadów	
1.		h_{k1}	B_1	—	—	—	C_1''	$d=2÷4 \text{ mm}$ $B=20 \text{ mm}$ $d>4 \text{ mm}$ $B_1=30 \text{ mm}$
2.		h_{k2}	B_2	t_{m2}	t_{j2}	C_2'	C_2''	$d=2÷4 \text{ mm}$ $B_2=20 \text{ mm}$ $d>4 \text{ mm}$ $B_2=30 \text{ mm}$
3.		h_{k3}	B_3	t_{m3}	t_{j3}	C_3'	C_3''	$d=2÷4 \text{ mm}$ $B_3=20 \text{ mm}$ $d>4 \text{ mm}$ $B_3=30 \text{ mm}$
4.		h_{k4}	B_4	t_{m4}	t_{j4}	C_4'	C_4''	$B_4=30 \text{ mm}$
5.		h_{k5}	B_5	t_{m5}	t_{j5}	C_5'	C_5''	$d=18 \text{ mm};$ $B_5=30 \text{ mm}$

PODSTAWY TEORETYCZNE METOD STEROWANIA DOKŁADNOŚCIĄ ZAUTOMATYZOWANEJ OBRÓBKİ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

6.		h_{k_6}	B_6	t_{m_6}	t_{j_6}	C_6'	C_6''	$d < 10 \text{ mm}$ $a = 5 \text{ mm}$ $10 < d < 18$ $a = 10 \text{ mm}$ $d \geq 18 \text{ mm}$ $a = 12 \text{ mm}$ $B_6 = 30 \text{ mm}$
-----------	---	-----------	-------	-----------	-----------	--------	---------	---

Z tab. 2.4 wynika, że schematy bazowania i zamocowania końca przedmiotu, przy obciążeniu siłą rozciągającą, można charakteryzować dużą liczbą wskaźników o różnych wartościach, które należy uwzględnić przy wyborze schematu bazowania.

Parametry geometryczne obrabianych części o małej sztywności, parametry procesu skrawania i wartości składowych sił skrawania, przedstawiono w tab. 2.5, a czasy przygotowania baz technologicznych w tab. 2.6.

Tab. 2.5. Wybrane parametry obróbki

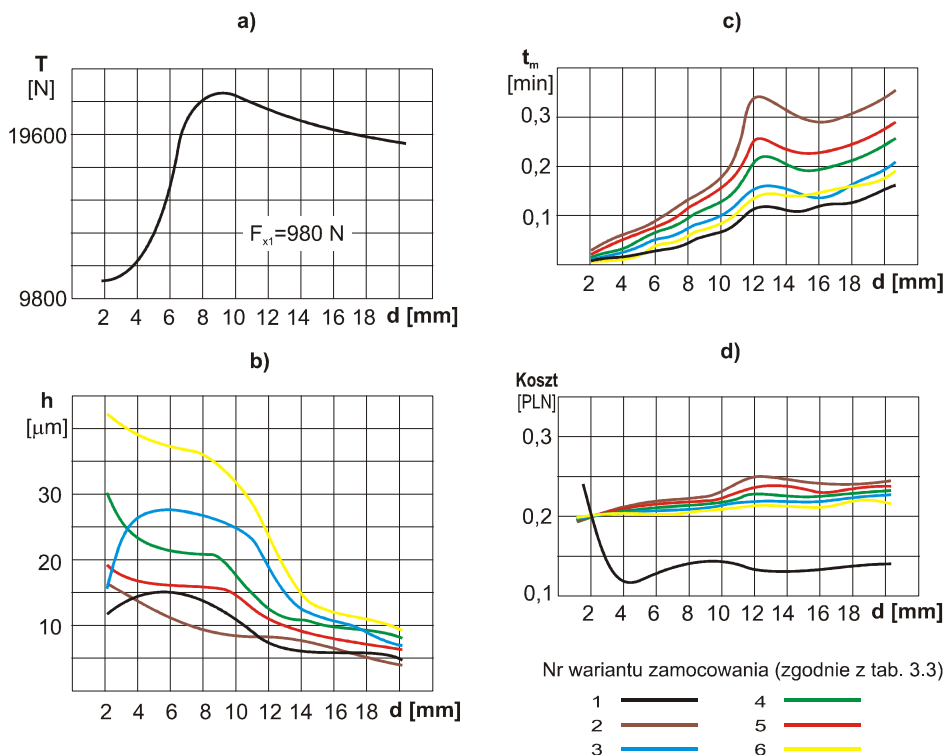
	d [mm]									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
L [mm]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
a_p [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
f [mm/obr]	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,12	0,12
v [mm/min]	105,6	80,3	70,4	62,6	58	53	45,6	39,2	36	31
F_c [N]	16	36,7	65,5	95,3	131,1	174,6	276,6	409	467	534
F_p [N]	12,4	27,9	45,4	66,8	91,4	112,5	178	245	289	323,4
F_f [N]	11,7	28,1	49	70,6	98	127,4	199	274,4	319	358,7

Tab. 2.6. Czas przygotowania baz technologicznych

Nr wariantu	d [mm]									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
1	0,227	0,8	0,91	0,96	0,99	1,01	1	1,01	1,02	1,04
2	1,4265	1,49	1,51	1,56	1,57	1,88	1,84	1,79	1,85	1,88
3	1,4363	1,47	1,48	1,52	1,53	1,69	1,68	1,67	1,69	1,71
4	1,4418	1,48	1,5	1,64	1,55	1,76	1,74	1,69	1,76	1,78
5	1,4286	1,43	1,46	1,48	1,5	1,79	1,77	1,72	1,79	1,81
6	1,4312	1,46	1,47	1,49	1,5	1,68	1,67	1,68	1,69	1,71

Analityczną zależność zmiany warunku zacisku, przy różnych parametrach geometrycznych części, otrzymanych zgodnie z (2.28) i niezbędnych do obliczeń wartości odkształceń stykowych h_{ki} , w miejscu zacisku przedstawiono na rys. 2.8a. Przyjmując, że kontakt elementu zaciskowego z mocowaną częścią

w przekroju poprzecznym jest liniowy, a we wzdluznym – na całej powierzchni, wyznaczono wartości h_{ki} według zależności (2.29), a charakter zmiany wartości odkształceń stykowych, przy różnych schematach bazowania, przedstawiono na rys. 2.8b. Z wykresu wynika, że zakres zmian wartości odkształceń stykowych jest dostatecznie szeroki i zależy od wymiarów i specyfiki konstrukcyjnej elementów zaciskowych, a także zastosowania elementów zaciskowych z zamykaniem siłowym lub geometrycznym i siłowym.



Rys. 2.8. Zależności wybranych wielkości od średnicy części: a) wykres zmiany obliczeniowej siły zacisku, b) analityczne zależności zmiany odkształceń stykowych przy różnych schematach zamocowania, c) zależności zmiany czasu maszynowego t_{mi} w przypadku różnych schematów zamocowania, d) zależności zmiany pełnego kosztu własnego przygotowania baz technologicznych

Wykres zmiany czasu maszynowego $t_m = \frac{L}{nf}$ przedstawiono na rys. 2.8c; przy czym w przypadku wariantu I – t_{m1} jest to czas odcięcia końca półfabrykatu.

Analiza wartości t_{m1} (na przygotowanie baz) pokazuje, że wartość ta, w porównaniu z czasem maszynowym obróbki wieloprześciowej, jest nieznaczna (na przykład przy obróbce wálka o małej sztywności $d = 4$ mm, $L = 95$ mm, $t_m = 1,53$ min, a czas t_m na przygotowanie zastępczych baz technologicznych w przypadku wszystkich wariantów wynosi 0,06 min. Wartości czasu przygotowania baz technologicznych ($t = t_m + t_p + t_o + t_{prz} + t_{mu}/N_i$; $t_{ob.} = t_{prz} = 0,03 (t_m + t_p)$; $t_p = t_u + t_w + t_u + t_n + t_{prz}$) zestawiono w tab. 2.6.

Zależności zmiany wartości pełnych kosztów własnych przygotowania zastępczych baz technologicznych, przy obróbce wálków o małej sztywności z rozciąganiem, pokazano na rys. 2.8d.

Najniższe nakłady są w przypadku wariantu 1, gdzie jest niezbędne tylko odcięcie odcinka części znajdującego się w strefie zacisku.

Koszty przygotowania baz technologicznych w pozostałych wariantach różnią się, ale nie przewyższają 5 – 10 % całego kosztu jednoprześciowej obróbki, z przyłożeniem sił rozciągających.

Z analizy otrzymanych wartości wskaźników, uwzględnianych przy wyborze schematów bazowania i zamocowania końca części, wynika, że:

1. Wartość h_{ki} obliczona według odpowiedniej zależności, zależy od wartości siły zacisku, charakteru styku elementów zaciskowych z powierzchnią części itd.
2. Szerokość przetoczenia B_i wynika z wykonania elementów zaciskowych i może zmieniać się w szerokim zakresie. W ogólnym przypadku $B_1 \neq B_2 \neq B_3 \neq B_4 \neq B_5 \neq B_6$.
3. Czas maszynowy t_{mi} , na przygotowanie zastępczej bazy technologicznej, jest także określany w zależności od konstrukcyjnego wykonania elementów zaciskowych oraz zastosowanego narzędzia; przy tym jest oczywiste, że $t_{m1} \neq t_{m2} \neq t_{m3} \neq t_{m4} \neq t_{m5} \neq t_{m6}$, t_{m1} – odcięcie końca części, wielkości t_{m2} i t_{m3} wchodzą w czas maszynowy obróbki części.
4. Czas przygotowawczy – zakończeniowy zależy od dużej liczby czynników i może mieć różne wartości: t_{pz2} i t_{pz3} wchodzą w t_{pz} wykonania części, $t_{pz3} \neq t_{pz4} \neq t_{pz5} \neq t_{pz6}$.
5. W analogiczny sposób wielkość kosztów własnych przygotowania bazy zależy od dużej liczby czynników i może się zmieniać: C'_2 i C'_3 – wchodzą do kosztów własnych wykonania przedmiotu $C'_3 \neq C'_4 \neq C'_5 \neq C'_6$.
6. Koszt odpadów utylizowanych zależy od rodzaju materiału obrabianego oraz specyfiki konstrukcyjnej elementów zaciskowych, przy tym wielkość C_i'' także zmienia się w zakresie od C_1'' do C_6'' .

Przedstawiony zbiór wskaźników, uwzględniany przy wyborze schematów bazowania i zamocowania, nie jest pełny i może się zmieniać w zależności od posiadanych i stosowanych elementów zaciskowych, asortymentu i wielkości partii obrabianych części oraz parku obrabiarkowego.

Rozwiązanie problemu wyboru procesu technologicznego obróbki walców o małej sztywności i wyboru schematów bazowania, a także zamocowania przy obróbce części sprężyste – odkształczanych, odnosi się do problemu optymalizacji procesów obróbki części na obrabiarkach.

Przy ocenie efektywności procesów technologicznych obróbki oraz ich poszczególnych operacji najczęściej bierze się pod uwagę koszt własny; ocenę różnych wariantów produkcji przeprowadzono według kosztów własnych technologicznych (bez uwzględniania kosztów materiałów, które przy porównywanych wariantach są stałe). Jednak w przypadku, kiedy porównywane warianty różnią się ilością zużywanych materiałów, należy analizować pełne koszty własne części [1].

Jako wskaźniki efektywności procesu technologicznego można zastosować nakłady

$$P_N = E_N K + C_P G, \quad (2.30)$$

gdzie:

E_N – normatywny współczynnik zwrotu nakładów kapitałowych;

K – nakłady kapitałowe (początkowe nakłady);

C_P – pełne koszty własne części;

G – roczna produkcja części.

Pełny koszt własny części

$$C_P = C_1 + C_2, \quad (2.31)$$

gdzie: C_1 , C_2 – części pełnego kosztu własnego zależne od parametrów skrawania i od zużycia materiałów. Tak więc

$$P_N = E_N K + (C_1 + C_2) G. \quad (2.32)$$

Można rozpatrywać dwa rodzaje optymalizacji według tego kryterium: wariantowy i parametryczny.

Optymalizacja wariantowa umożliwia wybór optymalnego wariantu procesu technologicznego obróbki części, ponieważ zagwarantowanie wymaganej jakości części, przy założonej wydajności, może być realizowane różnymi metodami obróbki, różniącymi się zastosowanymi urządzeniami, oprzyrządowaniem, narzędziami, półfabrykatami.

W ogólnym przypadku to samo zagadnienie technologiczne można rozwiązać na J sposobów, w odniesieniu do j – go wariantu ($j = 1, \dots, J$) nakłady można wyznaczyć z zależności

$$P_{Nj} = E_N K + (C_{1j} + C_{2j}) G. \quad (2.33)$$

Parametry E_N , G – ogólne przy wszystkich wariantach, niezależne od j (E_N wybiera się zgodnie z normatywami branżowymi; G – zgodnie z planem), przy czym bardziej wydajne warianty umożliwiają produkcję przy mniejszej ilości urządzeń. Celem optymalizacji wariantowej jest wybór wariantu o najmniejszym P_N , to jest $\min P_{Nj}$ przy $1 \leq j \leq J$.

Nakłady kapitałowe zależą od stosowanych przy j – tym wariantcie środków technicznych. Część kosztów własnych C_{2j} zależy od stosowanych półfabrykatów, materiałów pomocniczych w każdym wariantcie obróbki wieloprześciowej lub obróbki w stanie sprężystości – odkształcalnym przy różnych schematach bazowania i nie może być określona jednoznacznie, dlatego powstaje zagadnienie optymalizacji wariantowej.

Część technologiczna kosztów własnych C_{1j} zależy głównie od parametrów obróbki (v, a_p, f), naddatków międzyoperacyjnych, tolerancji wymiarów i trwałości narzędzia skrawającego (optymalizacja parametryczna). Optymalizacja parametryczna jest to wybór najbardziej odpowiednich ze względu na określone kryteria parametrów technologicznych w przypadku konkretnego sposobu obróbki części. Niech $\vec{Y}_j$ będzie wektorem, którego

składowymi, są wyszczególnione w tab. 2.4 wskaźniki, a $\vec{X}_j$ – wektorem, którego składowymi są parametry technologiczne w j – tym wariantcie. Należy przy tym uwzględniać ograniczenia, określające zamknięte zbiory, do których należy zarówno wektor parametrów technologicznych, jak i wektor wskaźników bazowania

$$\vec{Y}_j \in N_{oj}, \quad \vec{X}_j \in M_{oj}, \quad (2.34)$$

gdzie: N_{oj}, M_{oj} – odpowiednio zamknięty zbiór dopuszczalnych wartości wektora $\vec{Y}_j, \vec{X}_j$.

Zatem przy optymalizacji wariantowej i parametrycznej powinien być spełniony warunek

$$\min_j P_{Nj}(\vec{Y}_j; \vec{Y}_j \in N_{oj}; \vec{X}_j; \vec{X}_j \in M_{oj}). \quad (2.35)$$

Nakłady jako funkcja wariantowych wskaźników i parametrów technologicznych mogą być zapisane jako:

$$P_{Nj}(\vec{Y}_j; \vec{X}_j) = E_N K_j + G C_{2j}(\vec{Y}_j) + G C_{1j}(\vec{X}_j). \quad (2.36)$$

Zgodnie z zasadą podporządkowania jednemu celowi, optymalizację wariantową i parametryczną można przedstawić jako

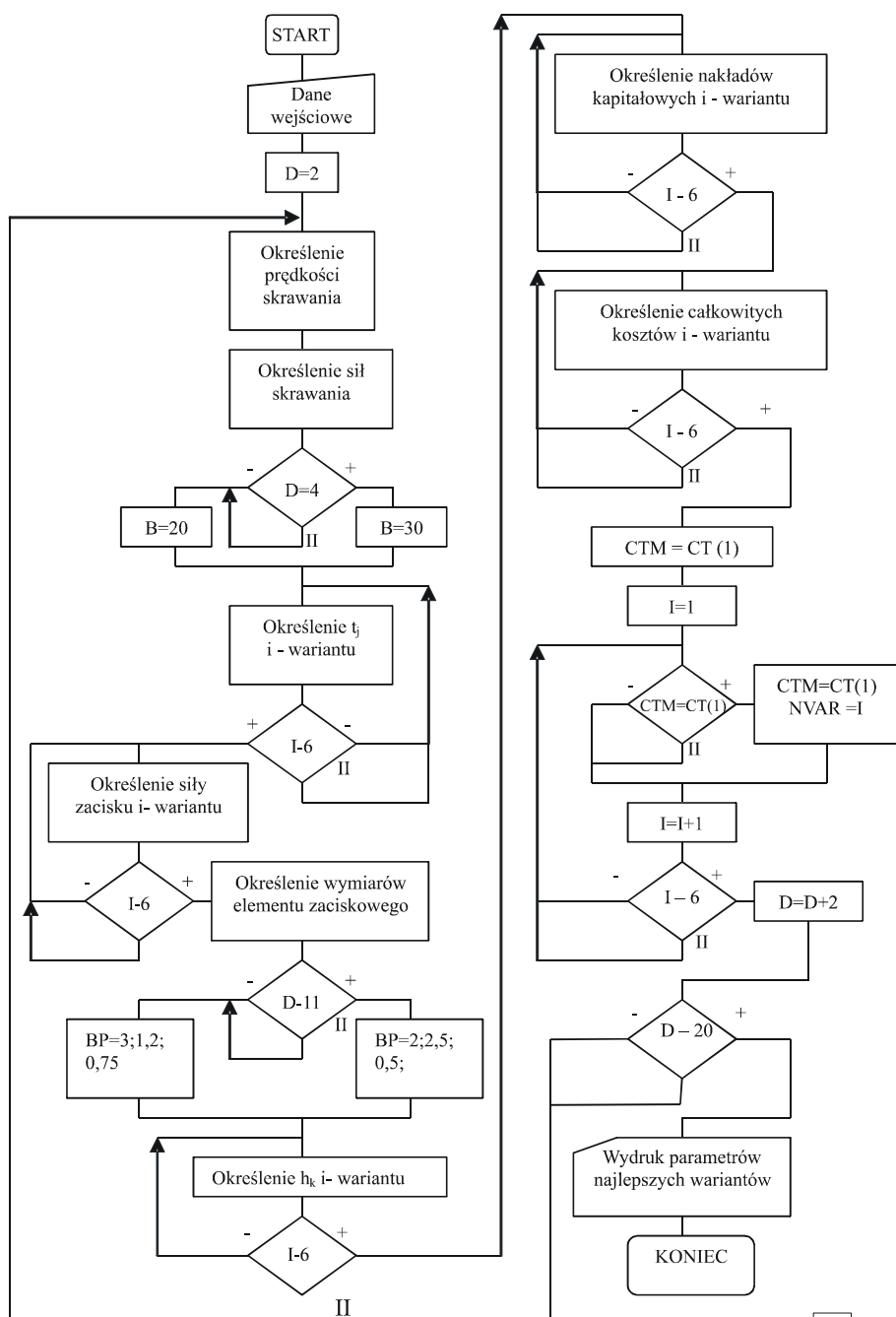
$$\min_{1 \leq j \leq J} \left[E_N K_j + G \min_{\bar{Y}_j \in M_{oj}} C_{2j}(\bar{Y}_j) + G \min_{\bar{X}_j \in M_{oj}} C_{1j}(\bar{X}_j) \right]. \quad (2.37)$$

W tym przypadku rozpatrywany jest pełny koszt własny C_p wykonania części, a więc wyrażenie matematyczne przy jednym celu optymalizacji parametrycznej i wariantowej można zapisać jako:

$$\min_{1 \leq j \leq J} \left[\min_{\bar{Y}_j \in N_{oj}} C_{2j}(\bar{Y}_j) + \min_{\bar{X}_j \in M_{oj}} C_{1j}(\bar{X}_j) \right], \quad (2.38)$$

a dla zagadnienia tylko optymalizacji wariantowej przy wyborze najwłaściwszego schematu bazowania przy obróbce sprężyście – odkształcalnych wałków o małej sztywności

$$\min_{1 \leq j \leq J} \left[\min_{\bar{Y}_j \in N_{oj}} C_{2j}(\bar{Y}_j) \right]. \quad (2.39)$$



Rys. 2.9. Schemat blokowy algorytmu obliczeń parametrów i optymalizacji wyboru schematów zamocowania przy obróbce z rozciąganiem

R3.8

Rozwiązania zagadnienia oraz wszystkie obliczenia pośrednie parametrów i kosztów własnych przy najodpowiedniejszym wariancie bazowania i zamocowania przy obróbce wálka sprężyste – odkształcalnego, w celu otrzymania określonej konfiguracji, były realizowane według algorytmu przedstawionego na rys. 2.9. Część bloków (od 2 do 18) służy do wprowadzanie danych wejściowych do programu i obliczanie parametrów technologicznych procesu obróbki, wymiarów elementów zaciskowych i wartości odkształceń stykowych. Druga część bloków (od 19 do 30) realizuje obliczenia i porównanie pełnego kosztu własnego C_{pj} , przy j – tym wariancie bazowania, w porównaniu z wariantem określonym podczas analizy poprzednich ($j - 1$) wariantów.

Przy obliczeniu czasu początkowego (pierwszy wariant) taka analiza nie była prowadzona. Wariant drugi porównano z pierwszym; trzeci porównywano z najlepszym, z dwóch poprzednich wariantów. Po zakończeniu obliczeń kosztów własnych wszystkich sześciu wariantów określone są parametry technologiczne najlepszego wariantu, według kryterium kosztu własnego.

2.4. Podsumowanie

Przedstawiona została metodologia budowy modeli matematycznych obróbki wálków o małej sztywności w stanie sprężyste odkształcalnym.

Przy opracowywaniu opisu matematycznego obiektu sterowania – funkcji odkształceń wálka o małej sztywności – przy ustalonych parametrach należy uwzględniać wiele czynników: sposoby zamocowania, warunki obciążenia i inne. Model matematyczny, w proponowanym ujęciu, jest zagadnieniem identyfikacji strukturalnej, niezbędne jest, by był wystarczająco prosty do dalszego stosowania w zadaniach sterowania dokładnością i jednocześnie odpowiadał a priori informacjom o mechanizmie, powiązaniach i parametrach zjawisk. Powinny być wyodrębnione czynniki, wykazujące dominujący wpływ na dokładnościowe wskaźniki procesu obróbki.

Wyodrębniono dwa etapy rozwiązania zagadnienia modelowania. W pierwszym opracowuje się model matematyczny, umożliwiający drogą analizy, ustalenie wpływu zestawu czynników na dokładność. W drugim etapie badań, na bazie metod optymalizacji, formułuje się algorytmy sterowania stanem sprężyste – odkształcalnym części z uwzględnieniem powiązań rzeczywistych i opracowuje nowe sposoby sterowania dokładnością obróbki. Przeprowadzone badania teoretyczne (w oparciu o opracowane modele) i eksperymentalne wykazały, że rozbieżności między wynikami analitycznymi i eksperymentalnymi wynoszą od 3 do 12% i mogą być spowodowane przyjętymi założeniami, przy wyborze schematów obliczeniowych.

Sterowanie stopniem dokładności obróbki mechanicznej w stanie sprężystości – odkształcalnym części długowymiarowych można realizować poprzez sterowanie dwoma parametrami: siłą rozciągającą i mimośrodem jej przyłożenia. Obciążenie części siłą rozciągającą wywołującą stan sprężystości – odkształcalny jest ekwiwalentne dodatkowej podporze, powodującej zwiększenie sztywności statycznej części. Dlatego bazowanie i zamocowanie półfabrykatów może być realizowane w uchwytach samocentrujących lub w tulei sprężynującej.

Na podstawie przeprowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych, opracowano sposób obróbki mechanicznej, który umożliwia osiągnięcie dokładności, w czasie toczenia i jednocześnie sterowanie stanem sprężystości – odkształcalnym walców, w układzie technologicznym.

3. ŚRODKI AUTOMATYZACJI I STEROWANIA OBRÓBKĄ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI W STANIE SPRĘŻYŚCIE – ODKSZTAŁCALNYM

3.1. Sposoby obróbki skrawaniem części o małej sztywności w stanie sprężystości – odkształcalnym

Sterowanie automatyczne odkształceniami sprężystymi wałków, w układzie technologicznym w wyniku zastosowania dodatkowych oddziaływań siłowych, zmieniających jej stan sprężystości – odkształcalny, pozwala w istotny sposób podnieść dokładność obróbki przy jednoczesnym zwiększeniu wydajności procesu technologicznego [162, 163].

Badania eksperymentalne układu sterowania automatycznego (UAS), rozpatrywanego typu pokazały, że najprostsze w technicznej realizacji, z punktu widzenia zwiększenia dokładności obróbki części o małej sztywności, są UAS, w których jako oddziaływania sterownicze stosowane są siła rozciągająca, działająca wzdłuż osi części i siła mimośrodowa. Siła rozciągająca F_{x1} , przykładana z przemieszczeniem (mimośrodem e), tworzy dodatkowy moment zginający, w kierunku przeciwnym momentom zginającym pochodzącym od siły skrawania [162, 163].

Na podstawie przeprowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych opracowane zostały sposoby technologiczne obróbki skrawaniem ze sterowaniem stanem sprężystości – odkształcalnym części o małej sztywności w układzie technologicznym. Jeden ze sposobów obróbki skrawaniem części obrotowych, o małej sztywności polega na tym, że siła rozciągająca powstaje, w wyniku wzbudzenia sił odśrodkowych, w obracających się elementach zacisku [162].

Inny sposób polega na tym, że sterowanie stanem sprężystości – odkształcalnym części o małej sztywności w układzie technologicznym, realizowane jest przez rozciąganie części siłą mimośrodową F_{x1} , co powoduje powstanie momentu $M_2 = F_{x1} \cdot e$, w kierunku przeciwnym niż momenty zginające, powstałe od siły skrawania w wyniku zmiany wielkości mimośrodu e wzdłuż wałka [162].

Mimośród siły wzdłużnej, a więc i moment zginający, przeciwdziałający momentowi siły skrawania, można uzyskać w wyniku przyłożenia sił wzdłużnych, o różnej wielkości i kierunkach w minimum trzech punktach, położonych przy czołach i prostopadłych do osi części [162].

Wielkości i kierunki sił są różne, powstaje więc mimośród wzdłużnych sił rozciągających, wywołujący sterowalny moment zginający, zmieniający kształt sprężystej linii części i wnoszący poprawkę korekcyjną do położenia względnego części i ostrza. Wielkość mimośrodu sił rozciągających, a odpowiednio również momentu zginającego, regulowana jest poprzez zmianę wielkości sił oraz kierunku ich działania. Opracowano również sposób obróbki części o małej sztywności z przyłożeniem do nich w procesie skrawania przemieszczającej się siły rozciągającej [162, 164, 165].

Opracowane sposoby obróbki części o małej sztywności mogą być realizowane, zarówno przy zastosowaniu układów otwartych z programową zmianą oddziaływań sterowniczych, w funkcji współrzędnej przyłożenia siły skrawania, wzdłuż osi części, jak i w zamkniętych UAS stabilizacji odkształceń sprężystych, gwarantujących bardziej wysoką dokładność obróbki. Realizacja UAS jest możliwa zarówno na obrabiarkach uniwersalnych, jak i NC.

Przystawione zasady budowy układów sterowania automatycznego odkształceniami sprężystymi układów technologicznych, w wyniku dodatkowych oddziaływań siłowych, były zrealizowane w eksperymentalnych wykonaniach różnych układów UAS na bazie tokarek modeli 1604P, 1E611, 1K62, wyposażonych w czujniki odkształceń sprężystych i koniki o specjalnej konstrukcji.

3.2. Metoda technologiczna sterowania dokładnością obróbki wałków o małej sztywności

Na podstawie przeprowadzonych badań teoretycznych i doświadczalnych opracowano sposób obróbki mechanicznej, który umożliwia osiągnięcie niezawodności technologicznej, w czasie toczenia i jednocześnie sterowanie stanem sprężystości – odkształcalnym wałków w układzie technologicznym.

W czasie obróbki wałków o małej sztywności, działanie zakłóceń losowych powoduje powstanie drgań, a przy pracy w strefie rezonansowej zwiększa się chropowatość powierzchni części, zmniejsza się trwałość ostrza narzędzia, zmienia się geometria warstwy skrawanej, co prowadzi do zwiększenia odkształceń sprężystych układu technologicznego oraz obniżenia niezawodności technologicznej obróbki.

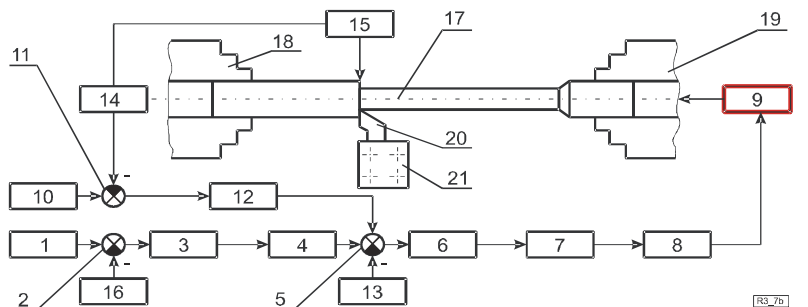
W sposobie obróbki mechanicznej wałków, o małej sztywności, na podstawie pomiaru odkształceń sprężystych części, zmieniana jest wartość napięcia, podawanego na wejście silnika prądu stałego i odpowiednie przemieszczenia katowe i liniowe na jego wyjściu, które przez mechanizm naciągu przekształcane są w osiową siłę rozciągającą, przykładaną do wałka o małej sztywności. Przed rozpoczęciem obróbki należy wytworzyć początkową siłę rozciągającą.

ŚRODKI AUTOMATYZACJI I STEROWANIA OBRÓBKĄ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI W STANIE SPRĘŻYSTOŚCI – ODKSZTAŁCALNYM

W tym celu należy usunąć luzy mechanizmu napinania tak, aby rzeczywista i wymagana wartość siły rozciągania były równe, a po rozpoczęciu procesu obróbki – były równe rzeczywiste i wymagane wartości odkształceń sprężystych części.

Schemat blokowy urządzenia, realizującego sposób obróbki mechanicznej wałków o małej sztywności, przedstawiono na rys. 3.1 [187, 189]. Urządzenie zawiera połączone szeregowo: nastawnik prędkości 1, pierwszy człon porównujący 2, regulator prędkości 3, nastawnik początkowej siły rozciągającej 4, człon porównujący 5, regulator siły rozciągania 6, przetwornik sterowany 7, silnik prądu stałego 8, mechanizm naciągu 9, a także nastawnik odkształceń sprężystych 10, drugi człon porównujący 11, regulator nieliniowy 12 odkształceń sprężystych, czujnik siły rozciągania 13, blok wyodrębnienia wartości bezwzględnej 14, czujnik odkształceń sprężystych 15, czujnik prędkości 16.

Do wejść członu porównującego 5 dodatkowo podłączono czujnik siły rozciągającej 13 i wyjście nieliniowego regulatora odkształceń sprężystych 12. Wejście ostatniego połączone jest przez drugi człon porównujący 11 z nastawnikiem odkształceń sprężystych 10. Czujnik odkształceń sprężystych 15 przez blok wyodrębnienia wartości bezwzględnej 14 podłączony jest do drugiego wejścia członu porównującego 11, a czujnik prędkości 16, połączony z drugim wejściem pierwszego członu porównującego 2. Jeden koniec części obrabianej 17 zamocowany jest w uchwycie 18, a drugi w uchwycie 19, który jest połączony z mechanizmem naciągu 9. Obróbka części wykonywana jest narzędziem 20 zamocowanym w imaku 21.



- | | | |
|---|--|-------------------------------------|
| 1. nastawnik prędkości | 9. mechanizm przyłożenia siły rozciągającej | 15. czujnik odkształceń sprężystych |
| 2. pierwszy węzeł porównania | 10. nastawnik odkształceń sprężystych | 16. czujnik prędkości |
| 3. regulator prędkości | 11. drugi węzeł porównania | 17. wałek obrabiany |
| 4. nastawnik początkowego obciążenia rozciągającego | 12. nieliniowy regulator odkształceń sprężystych | 18. uchwyt I końca wałka |
| 5. węzeł porównania | 13. czujnik siły rozciągającej | 19. uchwyt II końca wałka |
| 6. regulator siły rozciągającej | 14. blok wyodrębnienia modułu | 20. ostrze |
| 7. przetwornik sterowny | | 21. oprawka nożowa |
| 8. urządzenie elektroruchowe | | |

Rys. 3.1. Schemat blokowy urządzenia realizującego obróbkę mechaniczną wałków o małej sztywności

Urządzenie działa w warunkach wytworzenia wstępnej siły rozciągającej. W momencie początkowym, napięcia na wyjściach czujnika odkształceń sprężystych 15 – U_{15} , czujnika prędkości 16 – U_{16} i czujnika siły rozciągania 13 – U_{13} są równe zero. Napięcie U_{12} jest również równe zero na wyjściu nieliniowego regulatora odkształceń sprężystych 12. Na wejście regulatora prędkości 3, przez pierwszy człon porównujący 2 podawane jest napięcie U_1 z nastawnika prędkości 1 i regulator prędkości 3 znajduje się w stanie nasycenia: napięcie wyjściowe (napięcie nasycenia regulatora prędkości 3) przez nastawnik początkowej siły rozciągającej 4, człon porównujący 5, regulator siły rozciągającej 6, przetwornik sterowany 7 i silnik prądu stałego 8 przechodzi do mechanizmu naciągu 9. Następuje gwałtowny wzrost prędkości silnika 8 i mechanizmu naciągu 9. Podczas wzrostu prędkości wzrasta napięcie U_{16} czujnika prędkości 16, a napięcie U_2 na wyjściu pierwszego członu porównującego 2, które jest równe

$$U_2 = U_1 - U_{16} , \quad (3.1)$$

obniża się.

Kiedy wartość prędkości zbliża się do wymaganej (przez nastawnik prędkości 1), wówczas napięcie U_2 na wyjściu pierwszego członu porównującego 2, odpowiadające (3.1), dąży do zera, a regulator prędkości 3 wychodzi ze stanu nasycenia i następnie ustala się wartość prędkości stabilizacji. Tak, więc ruch jałowy mechanizmu naciągu 9 odbywa się z określoną prędkością, co eliminuje niedopuszczalne skoki (zrywy).

Po ruchu jałowym mechanizm 9, przechodzi w stan stabilizacji początkowej siły rozciągającej, której wartość jest proporcjonalna do napięcia wyjściowego U_4 nastawnika początkowej siły rozciągania 4. Etap ten przebiega następująco: napięcie na wyjściu czujnika odkształceń sprężystych 15 i napięcie U_{12} na wyjściu nieliniowego regulatora odkształceń sprężystych 12, pozostaje równe zero. Po wybraniu ruchu jałowego powstaje napięcie U_{13} na wyjściu czujnika siły rozciągania 13 i napięcie na wyjściu członu porównującego 5

$$U_5 = U_4 + U_{12} - U_{13} , \quad (3.2)$$

zaczyna zmniejszać się. Zmniejszeniu ulega napięcie, podawane przez przetwornik sterowalny 7 na silnik 8, co powoduje obniżenie prędkości silnika. Po zakończeniu procesu przejściowego prędkość silnika 8 zmniejsza się do zera, a regulator prędkości 3 ponownie przechodzi w stan nasycenia. Napięcie U_4 na wyjściu nastawnika, początkowej siły rozciągania 4, pozostaje stałe i określa wartość wstępnej siły rozciągania. Po wytworzeniu początkowej siły rozciągającej włączany jest posuw obrabiarki i rozpoczyna się proces obróbki wałka. Na tym etapie urządzenie działa w trybie stabilizacji wymaganej wartości odkształceń sprężystych.

Napięcie U_{15} z czujnika odkształceń sprężystych 15 przez blok 14 wartości bezwzględnej jest podawane na drugi człon porównujący 11, gdzie zestawiane jest z napięciem U_{10} nastawnika odkształceń sprężystych 10. Blok 14 wartości bezwzględnej przekształca napięcie U_{15} czujnika odkształceń sprężystych 15 w napięcie o stałym znaku U_{14} . Jeśli bieżąca wartość odkształceń sprężystych jest mniejsza od wymaganej (wartość odkształceń sprężystych w szczególnym przypadku, może być równa zero), to napięcie na wyjściu drugiego członu porównującego 11

$$U_1 = U_1 - U_4, \quad (3.3)$$

jest większe od zera, a napięcie wyjściowe U_{12} nieliniowego regulatora odkształceń sprężystych 12, w wyniku nieliniowości jego charakterystyki, równe jest zero. Przy tym urządzenie podtrzymuje ustaloną wartość wstępnej siły rozciągającej.

Jeśli wartość odkształceń sprężystych przekroczy wartość założoną, to we wzorze (3.3) zmienia się znak napięcia U_{11} , na wyjściu drugiego członu porównującego 11 i pojawia się napięcie U_{12} , na wyjściu nieliniowego regulatora odkształceń sprężystych 12. Przy tym zgodnie z (3.2) rośnie napięcie U_5 , co powoduje wzrost napięcia na silniku 8 i zwiększenie siły rozciągającej wałek. W wyniku tego odkształcenia sprężyste części obniżają się do założonego poziomu. Wprowadzenie elementu wyodrębnienia wartości bezwzględnej 14 (napięcie o stałym znaku) sprawia, że urządzenie, zgodne z opisanym algorytmem, zwiększa wartość siły rozciągania, przy wzroście wartości bezwzględnej odkształceń sprężystych niezależnie od ich znaku. Daje to możliwość kompensowania odkształceń sprężystych, zarówno w przypadku, kiedy ekwiwalentna siła skrawania powoduje przesunięcie części w kierunku ostrza, jak i wtedy, kiedy część jest odciągana (odpychana) od ostrza.

Dokładność obróbki wałków o małej sztywności można zwiększyć w wyniku stabilizacji odkształceń sprężystych drogą zmian siły rozciągającej przyłożonej do części. Wysoka dokładność stabilizacji odkształceń sprężystych części w stanach ustalonych i przejściowych umożliwia również podwyższenie niezawodności technologicznej obróbki wałków o małej sztywności.

3.3. Układy sterowania automatycznego obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężyscie – odkształcalnym

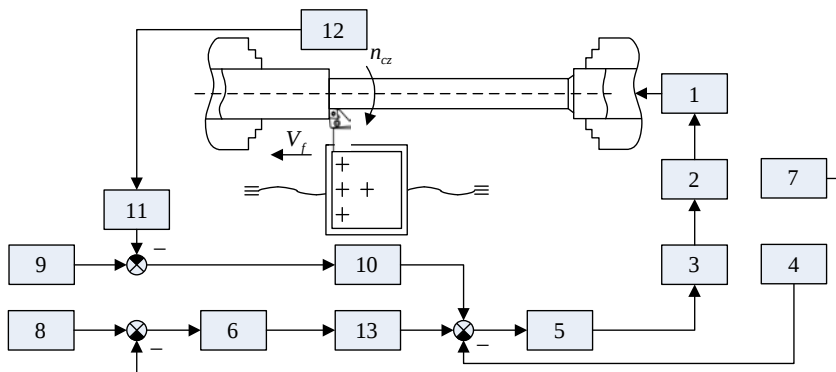
Jako oddziaływania sterujące zastosowano siły przykładane osiowosymetrycznie i mimośrodowo. Syntezę regulatorów, odkształceń sprężystych układu sterowania automatycznego, wykonano na bazie otrzymanych modeli matematycznych obiektu sterowania, z uwzględnieniem właściwości dynamicznych elementów wykonawczych [165, 166].

Podstawowe bloki układu sterowania, z zastosowaniem elementów w postaci pneumatycznego cylindra siłowego, opisano w [162, 163]. W drugim wariantcie układ sterowania automatycznego wykonany jest według schematu regulowania podporządkowanego.

Schemat funkcjonalny układu, z pokazanym elementem wykonawczym, przedstawiono na rys. 3.2 [166]. Siła naciągu części wytwarzana jest przez mechanizm 1 naciągu, przy pomocy regulowanego napędu elektrycznego, z zastosowaniem silnika prądu stałego 2, wzbudzenia niezależnego sterowanego od przetwornika [166]. Obwód wewnętrzny układu sterowania napędem elektrycznym zamknięty jest przez czujnik prądu twornika i regulator prądu. Moment na wale silnika jest proporcjonalny do prądu twornika, co umożliwia zastosowanie, w rozpatrywanym schemacie czujnika prądu jako czujnika siły rozciągającej 4. Odpowiednio regulator prądu wypełnia funkcję regulatora siły rozciągającej 5.

Przy pomocy obwodu zewnętrznego układu sterowania napędem elektrycznym z regulatorem prędkości 6 i czujnikiem prędkości 7 (prądnicą tachometryczną połączoną mechanicznie z wałem silnika 2), uzyskiwana jest stabilizacja wartości prędkości silnika 2, na etapie kształtowania początkowej siły rozciągającej.

Do obwodu regulacji odkształceń sprężystych wchodzi nastawnik odkształceń sprężystych 9, regulator odkształceń sprężystych 10, blok wyodrębnienia modułu 11 i czujnik odkształceń sprężystych 12.



Rys. 3.2. Schemat blokowy układu sterowania automatycznego odkształceniami sprężystymi części o małej sztywności

Do obróbki mechanicznej części osiowosymetrycznych o małej sztywności zastosowano urządzenie umożliwiające zwiększenie dokładności ich wykonania. Części obrabiane są w uchwytach, z których jeden jest połączony z mechanizmem naciągu 1 [165, 166].

W pierwszym etapie urządzenie działa w trybie wytworzenia, określonej początkowej siły rozciągającej. Etap ten przebiega w sposób następujący. Początkowo napięcie na wyjściach czujnika odkształceń sprężystych 12, czujnika prędkości 7, i czujnika siły rozciągającej 4, jest równe zero. Również napięcie na wyjściu regulatora odkształceń sprężystych 10 jest równe zero. Na regulator prędkości 6, przez zespół porównania, podawane jest napięcie z nastawnika prędkości 8 (regulator prędkości 6 osiąga stan nasycenia). Napięcie wyjściowe 6, przez nastawnik początkowej siły rozciągającej 13, zespół sumowania, regulator siły rozciągającej, przetwornik sterowany 3 i silnik elektryczny 2, podawane jest na mechanizm napięcia 1. Intensywnie wzrasta prędkość silnika elektrycznego 2 i mechanizmu naciągu 1. Po osiągnięciu wymaganej prędkości, regulator prędkości 6 wychodzi ze stanu nasycenia i osiągana jest stabilizacja wymaganej wartości prędkości. Przemieszczenie mechanizmu naciągu 1 realizowane jest z określoną prędkością, co wyklucza niedopuszczalne szarpnięcia.

Po osiągnięciu zakładanego przemieszczenia, prędkość silnika 2 ulega zmniejszeniu i regulator prędkości 6 ponownie osiąga stan nasycenia, a urządzenie pracuje w trybie stabilizacji założonej początkowej siły rozciągającej, której wartość jest proporcjonalna do napięcia wyjściowego nastawnika początkowej siły rozciągającej 13. Po osiągnięciu początkowej siły rozciągającej, włączany jest posuw wzdłużny i rozpoczyna się proces obróbki części.

Na tym etapie urządzenie działa w trybie stabilizacji wartości odkształceń sprężystych drogą zmiany wielkości siły rozciągającej. Niezbędna wartość odkształceń sprężystych, w szczególności może być ustalona jako równa zero. Przy tym dzięki wprowadzeniu bloku wyodrębnienia modułu 11, układ sterowania automatycznego zwiększa wartość siły rozciągającej, przy wzroście modułu odkształceń sprężystych niezależnie od ich znaku. Umożliwia to kompensację odkształcenia sprężystego, podobnie jak w przypadku, gdy ekwiwalentna siła skrawania powoduje przemieszczenie części w kierunku ostrza, a także w sytuacji, kiedy ma miejsce odsunięcie części od ostrza.

Regulatory rozpatrywanego urządzenia działają w oparciu o wzmacniacze operacyjne, a ich parametry określone są zgodnie z metodyką syntezy sterowania w układach sterowania podporządkowanego [58].

Poglądowy schemat elektryczny realizacji urządzenia przedstawiono na rys. 3.3. Nastawnik prędkości u oraz nastawnik odkształceń sprężystych 9, wykonano jako potencjometry, odpowiednio RP1 i RP2, podłączone do źródła napięcia U_n . Pierwszy zespół porównania i regulator prędkości 6 wykonano w oparciu o wzmacniacz operacyjny DA1. Na wejściu przetwornikowym wzmacniacza, przy pomocy rezystorów RP1 i RP2, sumowany jest algebraicznie sygnał nastawnika prędkości 8 i sygnał czujnika prędkości 7. Do łańcucha sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego DA1 włączone są R1,

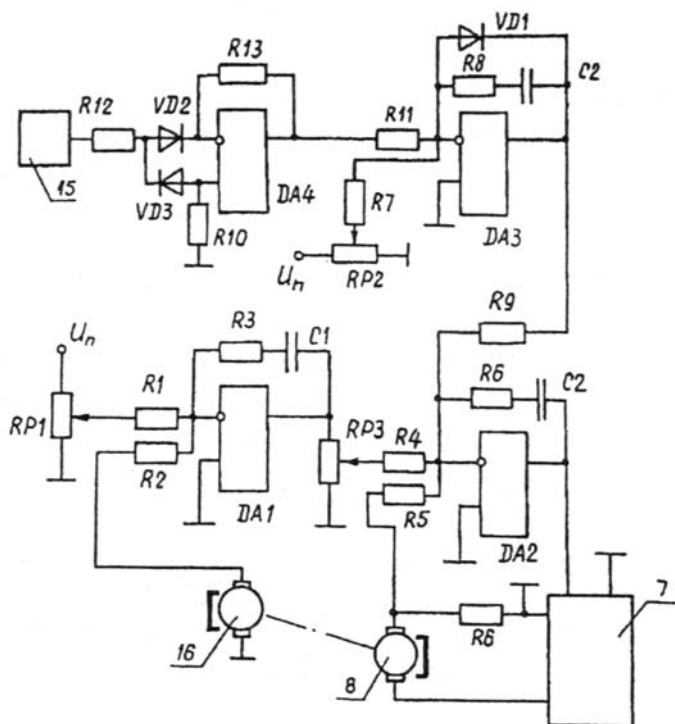
pojemność C1, nadaje to schematowi właściwości regulatora proporcjonalno – całkującego. Zastosowanie takiego regulatora gwarantuje wysoką dokładność sterowania, w trybach ustalonym i przejściowym [58].

Nastawnik początkowej siły rozciągającej 13 wykonano jako potencjometr RP3, włączony do wyjściowego łańcucha wzmacniacza operacyjnego DA1. Po wybraniu swobodnego przemieszczenia mechanizmu naciągu 1, prędkość silnika elektrycznego 2 i odpowiednio sygnał czujnika prędkości 7 są równe zero. Przy tym na wejście regulatora prędkości 6 dochodzi tylko sygnał z nastawnika prędkości 8. Sygnał ten powoduje, że regulator prędkości proporcjonalno – całkujący 6 wykonany na bazie wzmacniacza operacyjnego DA1 znajduje się w stanie nasycenia, czyli napięcie na potencjometrze RP3 pozostaje stałe, odpowiednio pozostaje niezmiennie napięcie, zdejmowane z nastawnika początkowej siły rozciągającej 13.

W regulatorze siły rozciągającej 5 i drugim węźle sumowania zastosowano wzmacniacz operacyjny DA2. Na wejściu przetwornikowym wzmacniacza, przy pomocy rezystorów R5, R4, R9 sumowane są sygnały, odpowiednio czujnika siły rozciągającej, nastawnika początkowej siły rozciągającej 13 oraz regulatora nieliniowego odkształceń sprężystych 10. W łańcuch sprzężenia zwrotnego wzmacniacza włączona jest pojemność C2 i rezystor R6. Schemat charakteryzuje się więc właściwościami regulatora proporcjonalno – całkującego i wysoką dokładność stabilizacji wymaganej wartości siły rozciągającej.

Regulator nieliniowy odkształceń sprężystych 10 i trzeci zespół porównania wykonane są na bazie wzmacniacza operacyjnego DA3. Sumowanie algebraiczne sygnału nastawnika odkształceń sprężystych, zawierającego potencjometr RP2 i sygnał bloku wyodrębnienia modułu 11, realizowane jest na wejściu przetwornikowym wzmacniacza DA3 z pomocą rezystora R8 i pojemności C2, nadaje mu to właściwości regulatora proporcjonalno – całkującego, a także diody VD1, co gwarantuje nieliniowość jego charakterystyki.

Blok wyodrębnienia modułu 11 wykonano na bazie wzmacniacza operacyjnego DA4. Dzięki włączeniu na wejściach przetwornikowych wzmacniacza diod VD2 i VD3, sygnał wyjściowy wzmacniacza ma znak ujemny.



Rys. 3.3. Poglądowy schemat elektryczny układu sterowania automatycznego

Wyjściowy sygnał ujemny bloku wyodrębnienia modułu 11 i sygnał dodatni nastawnika odkształceń sprężystych 9 (potencjometr RP2) są sumowane algebraicznie przez rezystory R7, R11 na wyjściu przetwornikowym wzmacniacza operacyjnego. Przy czym sygnał nastawnika odkształceń sprężystych 9 jest większy od modułu sygnału na wyjściu bloku wyodrębnienia modułu 11. Dioda VD1 blokuje łańcuch sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego DA3 i jego sygnał wyjściowy równa się zero. Jeżeli sygnał na wyjściu bloku wyodrębnienia modułu 11 przewyższa według modułu sygnał nastawnika odkształceń sprężystych 9, to sygnał wyjściowy wzmacniacza operacyjnego DA3 staje się ujemny, a dioda VD1 zamyka się i wtedy schemat na wzmacniaczu operacyjnym działa w trybie regulatora proporcjonalno – całkującego i na jej wyjściu pojawia się napięcie, idące na drugi węzeł sumowania.

Przy przekroczeniu przez odkształcenia sprężyste wymaganej wartości zwiększa się siła rozciągająca i osiągana jest stabilizacja odkształceń sprężystych części.

W trakcie eksperymentu ustalono, że w przypadku wałka o średnicy $d < 6 \text{ mm}$ i stosunku długości do średnicy $\frac{L}{d} > 20$, odkształcenia sprężyste przy

toczeniu, z zastosowaniem układu sterowania automatycznego z oddziaływaniami sterowniczymi w postaci przykładanej osiowo siły rozciągającej, mogą być zmniejszone 20-krotnie. W przypadku wałka o średnicy $d > 6 \text{ mm}$ bardziej racjonalne jest sterowanie jej stanem sprężystości – odkształcalnym, poprzez rozciąganie mimośrodowe, przy tym odkształcenia można zmniejszyć dwukrotnie, w porównaniu do rozciągania osiowego. Przy szlifowaniu oscylacyjnym, części o małej sztywności $\left(d = 6 \dots 14 \text{ mm}, \frac{L}{d} > 20 \right)$, dodatkowe sterowanie momentem zginającym, powstającym wyniku nieosiowego przyłożenia siły rozciągającej, umożliwia zwiększenie dokładności części o rząd wielkości [174, 175].

3.4. Oprzyrządowanie do obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężystości – odkształcalnym

3.4.1. Konik tokarki do obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężystości – odkształcalnym

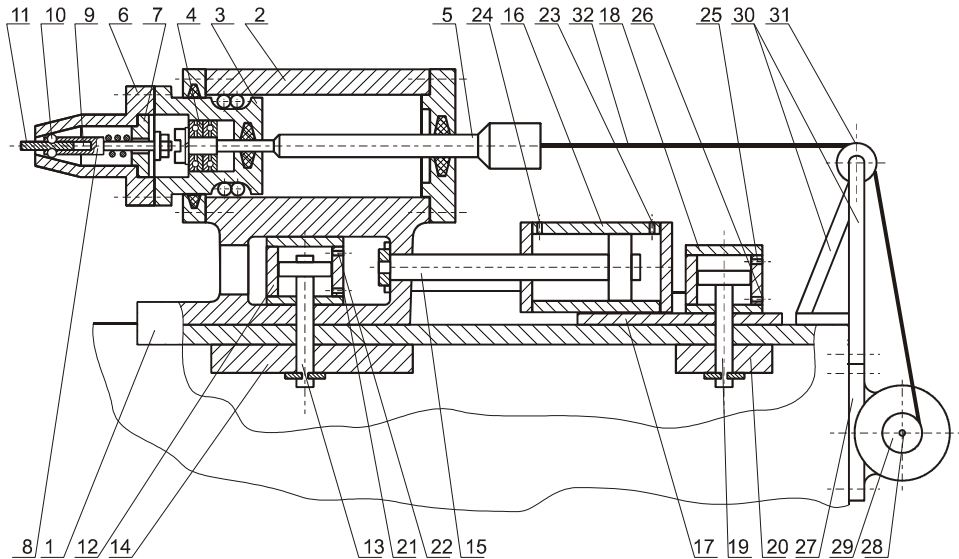
Mechanizm naciągu w rozpatrywanym urządzeniu wykonany jest w postaci konika tokarki [172], którego konstrukcja pokazana jest na rys. 3.3.

Do realizacji sposobu obróbki mechanicznej, umożliwiającego zwiększenie dokładności stabilizacji siły rozciągającej przy stanach ustalonych i przejściowych, opracowano konstrukcję konika, przedstawioną na rys. 3.4.

Na łożu 1 obrabiarki posadowiony jest konik 2, wewnątrz którego znajduje się mająca możliwość obrotu tuleja 3, w której na łożysku oporowym 4 ustawiony jest naciąg osiowy 5. Tuleja 3, na sztywno połączona jest z korpusem 6. W korpusie zamontowano kołnierz 7 z rowkiem, w którym przemieszcza się osadzony na sprężynie wał 8. Na końcu wału 8 w separatorze sprężystym 9 umieszczone są kulki 10. W korpusie konika 2 ustawiony jest siłownik zamocowania konika 12, tłoczysko 13, które przez łożo 1 połączone jest z zaciskiem 14. Korpus konika 2, na sztywno połączony jest z tłoczyskiem 15, siłownika automatycznego przemieszczenia konika do określonego położenia na łożu 1, przy przezbrajaniu do obróbki części o innych wymiarach. Korpus siłownika 16 poprzez płytę 17 jest złączony na sztywno z siłownikiem położenia 18. Tłoczysko tego siłownika przez łożo 1 związane jest z zaciskiem 20. Przez kanały 16 – 21 doprowadzany jest czynnik roboczy do przestrzeni tłokowych odpowiednich siłowników.

Na łożu 1 znajduje się silnik elektryczny 27. Na wale 28 silnika elektrycznego 27 na sztywno zamocowane jest koło cięgnowe 29. Na łożu 1 obrabiarki zamocowany jest również wspornik 30, na którym znajduje się,

posiadający możliwość obrotu, wałek oporowy 31. Naciąg osiowy 5 powiązany jest z kołem ciągnowym 29, wału 28 silnika elektrycznego 27, elastyczną linką 32, stykającą się z wałkiem oporowym 31.



Rys. 3.4. Budowa konika tokarki o napędzie elektromechanicznym

Wstępnie, w zależności od długości części ustawia się konik 2, na obrabiarce, w odpowiednim położeniu, przy tym czynnik roboczy przez kanał 22, zasila przestrzeń tłokową siłownika 12. Tłoczyśko 13, przemieszcza się do dołu i zwalnia zacisk 14. Jednocześnie czynnik roboczy kanałem 26 podawany jest do przestrzeni tłokowej siłownika ustalenia położenia 18, przy tym tłok przemieszcza się i przez tłoczyśko 19 oraz zacisk 20 ustala płytę 17 z siłownikiem 16, a tłoczyśko 15 przemieszcza konik do wymaganego położenia. Czynnik roboczy przez kanał 21 podawany jest do przestrzeni tłokowej siłownika 12, tłoczyśko 13 z zaciskiem 14 przemieszcza się do góry i mocuje konik 2 na łożu 1 obrabiarce. Część umieszczana jest we wrzecionie i koniku o zacisku kulowym 2. Przy tym w wyniku obrotu części i wału 8, część wstępnie jest zaciskana kulkami 10. Na silnik elektryczny podawane jest napięcie od sterownika, przy tym wał 28, zaczyna obracać się i na koło ciągnowe 29, nawijana jest elastyczna lina 32, której drugi koniec łączy się przez wałek oporowy 31, z naciągiem osiowym 5. Osiowa siła rozciągająca przekazywana jest na część przez elastyczną linę 32 i naciąg osiowy 5. Element obrabiany jest ostatecznie zaciskany i obciążany osiową siłą rozciągającą, po czym następuje obróbka.

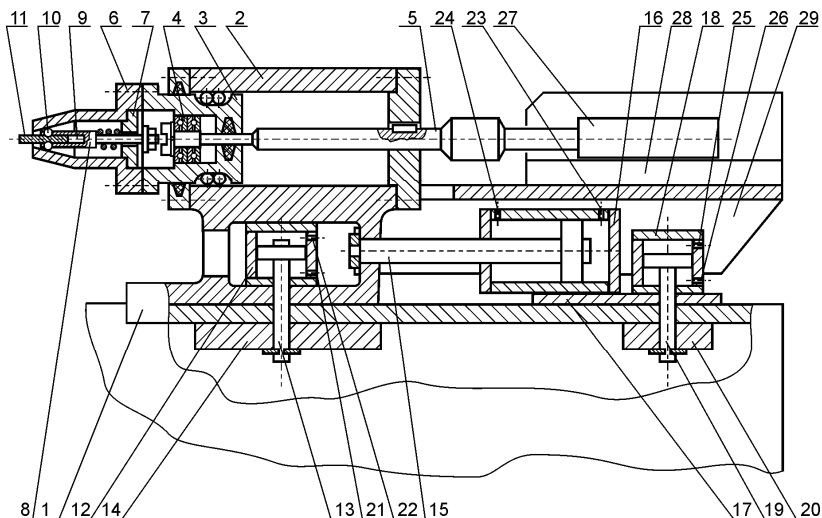
W procesie obróbki zmienia się napięcie na wejściu silnika elektrycznego 27 i jednocześnie stabilizowana jest wartość siły rozciągającej, zarówno przy ustalonym, jak i przejściowym trybie pracy.

Po zakończeniu obróbki zdejmowane jest napięcie z silnika elektrycznego 27 i zacisk części jest zwalniany. Wykorzystanie opracowanej konstrukcji konika tokarki daje możliwość stabilizowania – z dużą dokładnością – wartości osiowej siły rozciągającej.

3.4.2. Konik tokarki o napędzie elektromechanicznym w postaci elektrycznego silnika liniowego

W skład konika obrabiarki (rys. 3.5) wchodzi łożo z korpusem, mechanizm mocowania części z ciągnem osiowym, mechanizm przemieszczania i ustalania korpusu konika na łożu oraz mechanizm rozciągania części, zawierający elektryczny silnik liniowy, którego bieżnik jest sztywno połączony z ciągnem osiowym a induktor sztywno zamocowany na wsporniku korpusu konika [172].

Zaletą konika jest zwiększenie niezawodności jego działania w trakcie długotrwałej eksploatacji, osiągnięcie wysokiej dokładności regulowania i stabilizowania wielkości siły rozciągającej oraz zwiększenie dokładności obróbki części o małej sztywności. Konik ma konstrukcję znacznie prostszą w porównaniu do rozwiązań znanych.



**Rys. 3.5. Budowa konika tokarki o napędzie elektromechanicznym
w postaci elektrycznego silnika liniowego**

Na łożu 1 tokarki zamocowany jest korpus 2 konika, wewnątrz niego znajduje się wydrażona, mająca możliwość obracania się, tuleja 3, w której w łożysku oporowym 4 zamocowane jest ciągnio osiowe 5. Tuleja 3 połączona jest na sztywno ze stożkiem 6, na którym zamontowany jest kołnierz 7, z wpustem bagnetowym, w którym przemieszcza się umieszczony na sprężynach wał 8. Na końcu wału 8, w sprężystym separatorze 9, rozmieszczono kulki 10, umożliwiające wstępne zamocowanie części 11.

W korpusie 2, konika znajduje się cylinder 12, mocowania konika, sworzeń tłoka 13, który poprzez łożę 1 połączony jest z zaciskiem 14. Korpus 2 sztywno połączony jest ze sworzniem 15 cylindra siłowego 16, automatycznego przemieszczenia konika w wymagane położenie poprzez płytę 17, na sztywno jest połączony z cylindrem pozycjonowania 18. Sworzeń 19, tłoka cylindra 18, przez łożę 1, połączony jest z zaciskiem 20. Kanały 21-26 służą do doprowadzania czynnika roboczego do komór odpowiednich cylindrów.

Mechanizm rozciągania części jest wykonany w postaci elektrycznego silnika liniowego, którego bieznik 27, jest sztywno połączony z ciągnem osiowym 5, a induktor 28, zamocowany na sztywno na wsporniku 29, korpusu 2 konika.

Wstępnie, w zależności od długości części, ustawia się w odpowiednim położeniu konik 2, na łożu 1. W tym celu czynnik roboczy przez kanał 22, podawany jest do komory cylindra 12, tłok przemieszcza się do dołu i razem ze sworzniem 13, zwalnia zacisk 14. Jednocześnie czynnik roboczy przez kanał 26, podawany jest do komory trzonowej cylindra 18. Przy tym tłok przemieszcza się i przez sworzeń 19, zacisk 20 ustala płytę 17 z cylindrem 16 przemieszczania konika 2 po łożu 1. Przez kanał 23 czynnik roboczy podawany jest do komory cylindra 16, sworzeń 15, przemieszcza konik 2, do wymaganego położenia.

Czynnik roboczy przepływa kanałem 21 do komory cylindra 12, sworzeń 13 i zacisk 14, przemieszczają się do góry i mocują konik 2, na łożu 1 obrabiarki.

Część 11 umieszczana jest we wrzecionie i w koniku 2 o kulkowym zacisku. Wstępny zacisk jest realizowany kulkami 10, w wyniku obrotu części 11 i wału 8.

Na induktor 28 podawane jest napięcie ze sterowanego przetwornika siłowego, przy tym bieznik 27 zaczyna przemieszczać się w odpowiednim kierunku, przez ciągnio 5, przemieszczania bieznika, wytwarzana jest osiowa siła rozciągająca, przy tym część 11 mocowana jest ostatecznie i obciążana osiową siłą rozciągającą, co zwiększa sztywność układu technologicznego, po czym wykonywana jest obróbka części o małej sztywności 11.

W procesie obróbki regulowane jest napięcie na wejściu induktora 27 silnika liniowego oraz jednocześnie regulowana i stabilizowana wielkość siły rozciągającej zarówno przy ustalonym, jak i przejściowym trybie pracy.

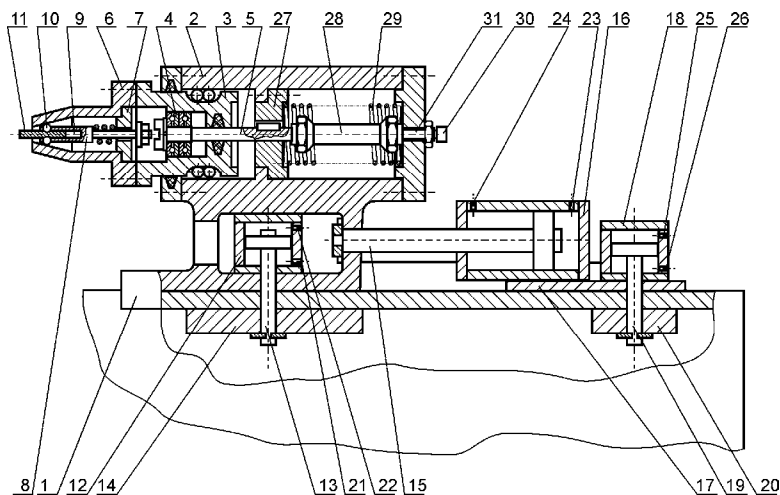
Po zakończeniu cyklu obróbki zdejmowane jest napięcie z induktora 27, silnika liniowego, odpowiednio zdejmowana siła rozciągająca oraz następuje odmocowanie części.

Zastosowanie konika obrabiarki o proponowanej konstrukcji umożliwia, przy osiągnięciu wysokiej dokładności, regulowanie i stabilizowanie wielkości siły rozciągającej, podniesienie dokładności obróbki części o małej sztywności. Konstrukcja konika ulega przy tym znacznemu uproszczeniu, w porównaniu do znanych, co zwiększa niezawodność jego eksploatacji.

Konik może być wykorzystywany na operacjach toczenia, szlifowania oraz frezowania, odpowiednich kształtów wałków o małej sztywności w stanie sprężystości – odkształcalnym.

3.4.3. Konstrukcja konika tokarki z wykorzystaniem muskułu pneumatycznego

Konik (rys. 3.6) ma mechanizm mocowania części z ciągnem osiowym, mechanizm przemieszczania i ustalania korpusu konika na łożu oraz mechanizm rozciągania części, wykonany jako mięsień pneumatyczny umieszczony wewnątrz sprężyny korpusu konika i połączony przez stabilizator z ciągnem [173].



Rys. 3.6. Konik z mięśniem pneumatycznym

Na łożu 1 tokarki zamocowany jest korpus 2 konika, wewnątrz niego umieszczona jest wydrążona, mająca możliwość obracania się, tuleja 3, w której w łożysku oporowym 4, zamocowane jest ciągno osiowe 5. Tuleja 3 połączona jest sztywno ze stożkiem 6, na którym zamontowany jest kołnierz 7 z wpustem bagietowym, w którym przemieszcza się umieszczony

na sprężynach wał 8. Na końcu wału 8, w sprężystym separatorze 9, rozmieszczono kulki 10, za pomocą których części 11 jest mocowana wstępnie.

W korpusie 2 konika znajduje się cylinder 12, mocowania konika, sworzeń tłoka 13, który poprzez łożo 1 połączony jest z zaciskiem 14. Korpus 2 konika jest sztywno połączony ze sworzniem 15, cylindra siłowego 16 automatycznego przemieszczenia konika w żądane położenie i poprzez płytę 17 jest w sposób sztywny połączony z cylindrem pozycjonowania 18. Sworzeń 19, tłoka cylindra 18, przez łożo 1 jest połączony z zaciskiem 20. Kanały 21-26 służą do doprowadzania czynnika roboczego do komór odpowiednich cylindrów.

Mechanizm rozciągania wałka jest wykonany w postaci stabilizatora 27, który eliminuje możliwość obrotu muskułu pneumatycznego 28, umieszczonego wewnątrz sprężyny 29, korpusu 2 konika, i połączony z ciągnem 5. Sprężyna 29 umożliwia powrót w położenie początkowe po wyłączeniu zasilania pneumatycznego przez przyłącze 30 adaptera 31.

W zależności od długości elementu obrabianego, konik 2 ustawiany jest w odpowiednim położeniu na łożu 1. W tym celu czynnik roboczy, przez kanał 22, jest podawany do komory cylindra 12, tłok przemieszcza się do dołu i razem ze sworzniem 13 zwalnia zacisk 14. Jednocześnie czynnik roboczy, kanałem 26, jest podawany do komory trzonowej cylindra 18. Przy tym tłok przemieszcza się i poprzez sworzeń 19, zacisk 20 ustala płytę 17 z cylindrem 16, przemieszczania konika, 2 po łożu 1. Kanałem 23 czynnik roboczy podawany jest do komory cylindra 16, sworzeń 15 przemieszcza konik 2, do wymaganego położenia.

Czynnik roboczy podawany jest kanałem 21 do komory cylindra 12, sworzeń 13 i zacisk 14 przemieszczają się do góry i mocują konik 2 na łożu 1 obrabiarki.

Część 11 umieszczana jest we wrzecionie i w koniku 2, o kulkowym zacisku. Wstępny zacisk jest realizowany kulkami 10 w wyniku obrotu części 11 i wału 8.

Przez przyłącze pneumatyczne 30, adaptera 31, czynnik roboczy jest podawany do muskułu pneumatycznego 28, umieszczonego wewnątrz sprężyny 29 korpusu 2. Ciężno 5 przez stabilizator 27, który eliminuje możliwość obrotu, obciąża siłą rozciągającą tuleję 3, przy czym zachodzi ostateczne zamocowanie części 11 oraz obciążenie jej osiową siłą rozciągającą, co zwiększa sztywność układu technologicznego, po czym wykonywana jest obróbka części o małej sztywności 11.

W procesie obróbki regulowane jest ciśnienie czynnika roboczego, podawanego wewnątrz muskułu pneumatycznego 28 oraz jednocześnie regulowana i stabilizowana jest wielkość siły rozciągającej, zarówno przy trybie pracy ustalonym jak i przejściowym.

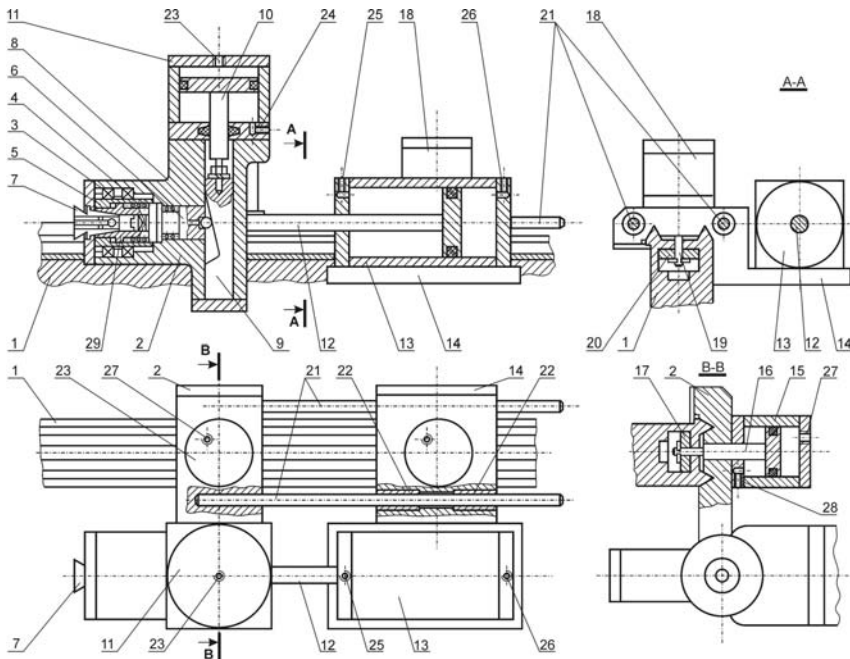
Po zakończeniu cyklu obróbki odłączane jest ciśnienie czynnika roboczego, podawanego wewnątrz muskułu pneumatycznego 28. Pod działaniem sprężyny 29, muskuł 28 powraca w położenie początkowe, odpowiednio zdejmowana jest siła rozciągająca oraz następuje odmocowanie części.

Konik o takiej konstrukcji może być stosowany na operacjach toczenia, szlifowania oraz frezowania odpowiednich kształtów wałków, o małej sztywności, w stanie sprężyscie – odkształcalnym.

3.4.4. Konstrukcja konika tokarki do obróbki wałków w stanie sprężyscie – odkształcalnym

Do realizacji sposobu technologicznego sterowania dokładnością obróbki wałków sprężyscie-odkształcalnych przy zginaniu wzdłużno – poprzecznym opracowano konstrukcję konika tokarki (mod. TPK – 125B), do obróbki wałków o małej sztywności, z napędem pneumatycznym [184].

Konik tokarki do obróbki wałków o małej sztywności, w skład którego wchodzi korpus 2, umiejscowiony jest na łożu 1 (rys. 3.7). Na korpusie 2 jest ustawiona, mająca możliwość obrotu na łożysku 3 (promieniowo – oporowym) i 4 (oporowym), tuleja 5. W tulei 5 umieszczono, posiadający możliwość przemieszczania osiowego, stożek zaciskowy 6, z jednej strony współpracujący z tuleją sprężynującą 7, a z drugiej – poprzez element oporowy w postaci kulki 8, z suwakiem 9. Suwak 9 jest w sposób sztywny połączony z tłoczyskiem 10 siłownika zacisku części 11. Korpus 2 ustawiony jest na podstawie 14, ruchomej względem łoża 1. Do korpusu 2 przymocowany jest siłownik 15 z tłoczyskiem 16, wyposażonym w zacisk 17 do ustalania korpusu 2, konika na łożu obrabiarki 1. Na podstawie 14 znajduje się siłownik 18, do ustalania podstawy 14 na łożu obrabiarki 1. Korpus 2 poprzez prowadnice cylindryczne 21 połączony jest z podstawą 14 i ma możliwość przemieszczania się w tulejach 22 względem podstawy 14 i łoża 1. Kanały 23 – 28 są przeznaczone do doprowadzania czynnika roboczego, do przestrzeni tłokowych odpowiednich siłowników. Sprężyna 29 służy do przemieszczania, po zdjęciu obciążenia, stożka zaciskowego 6, do położenia początkowego.



Rys. 3.7. Konstrukcja konika tokarskiego

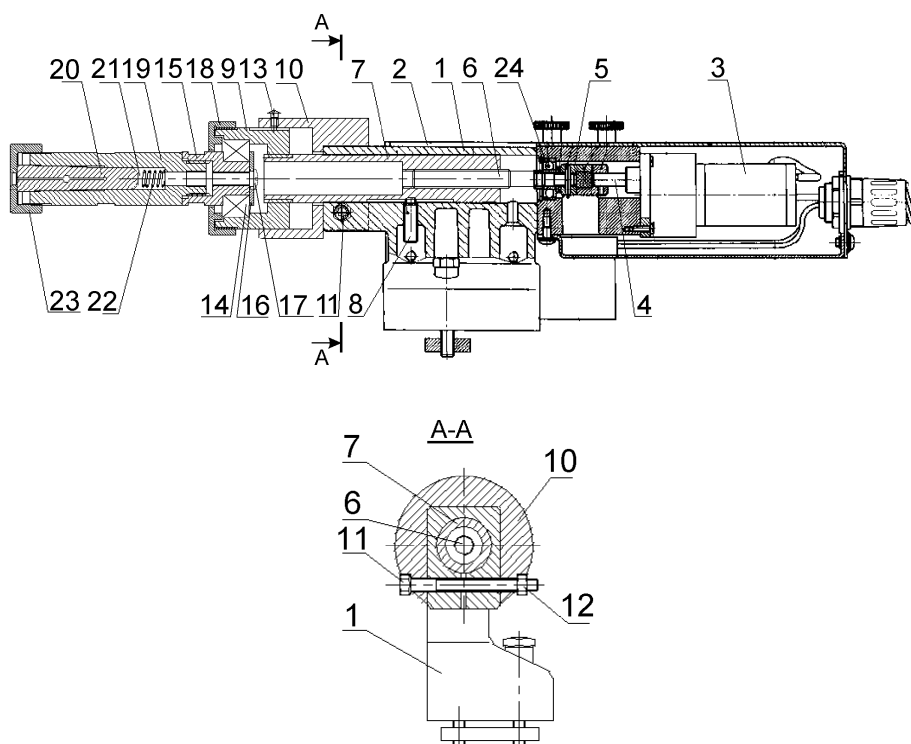
Urządzenie działa w następujący sposób. Wstępnie, w zależności od długości części, podstawa 14 ustawiana jest na łożu 1 obrabiarki. W tym celu czynnik roboczy podawany jest do odpowiedniej przestrzeni tłokowej siłownika 18, przy tym tłoczek z zaciskiem 20 przemieszcza się do góry i zamocowuje podstawę 14, z siłownikiem 13, przemieszczania korpusu 2 i naprężenia części na łożu obrabiarki 1. Przez kanał 26 czynnik roboczy podawany jest do przestrzeni tłokowej siłownika 13, trzpień 12 przemieszcza korpus 2 względem podstawy 14 do wymaganego położenia na łożu 1. Zastosowanie prowadnic cylindrycznych 21, symetrycznych z trzpieniem 12, zapewnia właściwe prowadzenie korpusu 2 na łożu 1. Następnie czynnik roboczy kanałem 28 przepływa do przestrzeni tłokowej siłownika 15, wtedy tłok przesuwają i przez tłoczek 16 i przycisk 17 ustala korpus 2 z cylindrem 11, zacisku części na łożu 1. Część ustawiana jest w przedniej i tylnej tulei sprężynującej 7. Przez kanał 23 czynnik roboczy przepływa do przestrzeni tłokowej siłownika 11, suwak 9, na sztywno połączony z tłoczyskiem 10, przemieszcza się do dołu i przez element oporowy, w postaci kulki 8, powoduje przesunięcie osiowe w lewo stożka zaciskowego 6, w obracającej się tulei 5, przy czym stożek zaciskowy 6, swoją częścią stożkową działa na tuleję sprężynującą 7, do zacisku części w tulei sprężynującej.

Po zaciśnięciu części w tulei sprężynującej 7, czynnik roboczy przez kanał 27 przepływa do przestrzeni tłokowej siłownika 13, jednocześnie trzpień 12, razem z korpusem 2, przemieszcza się na prawo po łożu 1 i prowadnicach cylindrycznych 21, w tulejach 22, podstawy 14. Obrabiana część jest obciążana osiową siłą rozciągającą, ponieważ trzpień 12 jest połączony z korpusem 2, wspólnie z tuleją sprężynującą 7. Po obciążeniu części osiową siłą rozciągającą czynnik roboczy jest podawany kanałem 28, do przestrzeni tłokowej siłownika 15, tłoczysko 16 z zaciskiem 17 przesuwają się do góry i zamocowuje korpus 2 na łożu 1, po czym następuje obróbka wałka. Po zakończeniu procesu obróbki czynnik roboczy podawany jest do odpowiednich przestrzeni tłokowych siłowników, obciążenie jest zdejmowane i część uwalniana z zacisku. Wymiary konstrukcyjne konika umożliwiają przyłożenie siły rozciągającej do 2000 N.

3.4.5. Konik tokarki z napędem elektromechanicznym

Konik przeznaczony jest do obróbki niewielkich wałków precyzyjnych, o małej sztywności, na obrabiarkach skrawających, z zastosowaniem układów sterowania automatycznego oraz na obrabiarkach sterowanych numerycznie [167]. Stosowane dotychczas koniki tokarskie mają nastawianą ręcznie, za pomocą rękojeści ze śrubą, tuleję, w której są mocowane narzędzia skrawające lub kły, przesuwane ręcznie na prowadnicach tokarki. W celu obsługi, koniki wyposażone są w cylinder pneumatyczny, zaciskający korpus konika na prowadnicach tokarki poprzez obracanie nakrętek poszczególnych śrub mocujących konik względem tokarki, bądź za pomocą napędu osobnych zacisków umieszczonych przy prowadnicach. Stosowane jest również niezależne odciążanie konika przy jego posuwie za pomocą wypływu sprężonego powietrza o strumieniu laminarnym wzdłuż prowadnic z magistrali powietrza sprężonego, wykonanej w korpusie konika i napełnianej powietrzem za pomocą odpowiedniego zaworu.

Przekrój konika wzdłużny i poprzeczny w płaszczyźnie A-A przedstawiono na rys. 3.8.



Rys. 3.8. Konik tokarki z napędem elektromechanicznym

Konik obrabiarki składa się z korpusu 1, napędu elektromechanicznego 3 – o wysokomomentowym silniku prądu stałego i reduktorze; sprzęgła 5 i łożysk 14, 24. Na łożu tokarki zamocowany jest korpus 1 konika, w obudowie 2 znajduje się napęd elektromechaniczny 3 z wałkiem 4, który poprzez sprzęgło 5 z wieńcem uzębionym, połączony jest z wałkiem gwintowanym 6 i ciągnem 7. Wałek 6 umocowany jest wewnątrz obudowy 2, w łożysku 24. W rowek wpustowy ciągną 7 wkręcony jest wkręt 8. Cieżno 7 połączony jest z ruchomą tuleją 9, która przemieszcza się liniowo wewnątrz tulei 10. Tuleja 10 zamocowana jest na korpusie 1 śrubą 11 i nakrętką 12. W rowek wpustowy tulei 9 wkręcona jest śruba 13, wewnątrz tulei ruchomej 9, na łożysku promieniowo – oporowym 14, zamocowana jest tuleja 15. Łożysko 14 zabezpieczony jest z jednej strony podkładką 16 i śrubą 17, a z drugiej strony pokrywą 18. W tulei 15 zamocowana jest tuleja 19, w której znajduje się tuleja zaciskowa 20, działająca poprzez podkładkę 21 i sprężynę 22. Na końcu tulei 19 znajduje się gwintowana pokrywa 23.

W zależności od długości obrabianego wałka o małej sztywności, konik 1 jest odpowiednio ustawiany na łożu tokarki. Jeden koniec wałka obrabianego

o małej sztywności mocowany jest w uchwycie obrabiarki, a drugi – umieszczany jest w tulei zaciskowej 20. Przy zakręcaniu pokrywy 23, tuleja zaciskowa 20 wsuwa się w tuleję 19, ściskając sprężynę 22. Napięcie zasilające na silniku elektrycznym 3, wprowadza w ruch obrotowy wał wyjściowy napędu elektromechanicznego 4 i przez sprzęgło 5 oraz wał gwintowany 6, powoduje przesunięcie liniowe cięgna 7. Cięgno 7 przez tuleję 9, łożysko oporowe 14, tuleje 15, 19 przekazuje przemieszczenie liniowe na tuleję zaciskową 20, powodując wstępne obciążenia elementów konika, ściskając przy tym sprężynę 22. Obrabiany wałek wprowadzany jest w ruch obrotowy przez uchwyt obrabiarki. Ten sam ruch przez wałek przekazywany jest na tuleję zaciskową 20 i obracającą się tuleję 19. Łożysko oporowe 14 oraz tuleja 9, zabezpieczona jest przed ruchem obrotowym śrubą 13, co daje tulei 9 tylko możliwość osiowego przemieszczania się.

W trakcie obróbki podawane jest napięcie zasilające na silnik 3 napędu elektromechanicznego, przy tym obracający się wał wyjściowy 4, przez sprzęgło 5, wał gwintowany 6, cięgno 7, tuleje 9, 15 i 19, tuleję zaciskową 20, obciąża obrabiany wałek o małej sztywności siłą rozciągającą, co powoduje zwiększenie jego sztywności i zmniejszenie odkształceń sprężystych oraz zwiększenie dokładności obróbki. W procesie obróbki regulacja napięcia, na wejściu wysokomomentowego silnika prądu stałego napędu elektromechanicznego 3, umożliwia jednocześnie regulowanie i stabilizowanie siły rozciągającej, w stanach ustalonych i przejściowych. Do regulacji wielkości siły rozciągającej zastosowano czujniki kierunku i ilości obrotów, które wchodzi w skład układu sterowania automatycznego, działającego z konikiem obrabiarki. Po zakończeniu cyklu obróbki ma miejsce zmiana polarności, podawanego na silnik 3 napędu elektromechanicznego napięcia, wał 4 zaczyna obracać się w kierunku przeciwnym i przez sprzęgło 5, wał gwintowany 6 przesuwając cięgno 7, w przeciwnym kierunku a następnie przez tuleję 9, łożysko oporowe 14, tuleję 15 przekazuje przemieszczenie liniowe na tuleję 19, tym samym zdejmowane jest obciążenie siłą rozciągającą wałka o małej sztywności, zamocowanego w tulei zaciskowej 20.

Przy odkręcaniu nakrętki 23, pod działaniem sprężyny 22, tuleja zaciskowa 20 przesuwa się w lewo wzdłuż osi tulei 18 i odmocowuje obrabiany wałek o małej sztywności.

Konik posiada dużą niezawodność w ciągu długotrwałej eksploatacji, co umożliwia osiągnięcie wysokiej dokładności regulowania i stabilizacji wielkości siły rozciąganej przy obróbce miniaturowych, precyzyjnych elementów o małej sztywności.

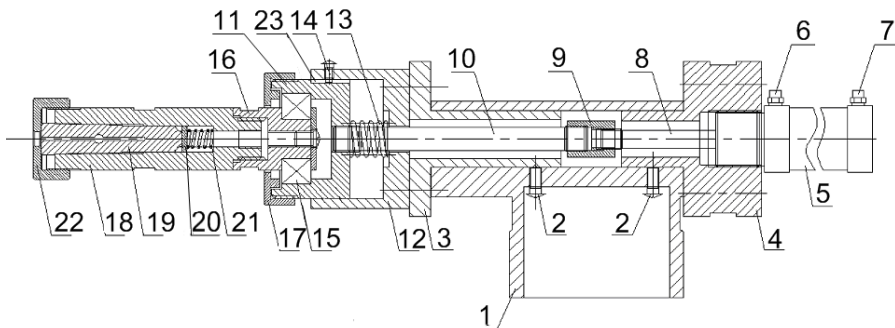
3.4.6. Konik tokarki z napędem pneumatycznym

Konik przeznaczony jest do obróbki niewielkich, precyzyjnych wałków o małej sztywności na obrabiarkach skrawających, z zastosowaniem układów sterowania automatycznego oraz na obrabiarkach sterowanych numerycznie (rys. 3.9) [168].

Stosowane dotychczas koniki tokarskie mają nastawianą ręcznie, za pomocą rękojeści ze śrubą, tuleję, w której mocowane są narzędzia skrawające lub kły, przesuwane ręcznie po prowadnicach tokarki. W celu obsługi koniki są wyposażone w cylinder pneumatyczny, zaciskający korpus konika na prowadnicach tokarki poprzez obracanie nakrętek poszczególnych śrub mocujących konik względem tokarki, bądź za pomocą napędzania osobnych zacisków umieszczonych przy prowadnicach. Stosowane jest również niezależne odciążanie konika, przy jego przesuwie przez wypływ z magistrali (wykonanej w korpusie konika i napełnianej powietrzem za pomocą odpowiedniego zaworu) wzdłuż prowadnic sprężonego powietrza o strumieniu laminarnym.

Do korpusu 1 zamocowane są, za pomocą śrub 2, podstawy 3, 4, przy czym podstawa 4 jest połączona gwintem z cylindrem pneumatycznym 5 z króćcami 6, 7, który za pomocą trzpienia 8, poprzez sprzęgło 9 i ciągnio 10, jest połączony z ruchomą tuleją 11, z rowkiem wpustowym 23, umieszczoną wewnątrz nieruchomej tulei 12.

Na końcu ciągnia 10 znajduje się sprężyna 13, a w tuleję 12 wkręcona jest śruba 14, blokująca poprzez rowek wpustowy 23, ruch tulei 11. Wewnątrz tulei 11 na łożysku promieniowo – oporowym 15, jest zamocowana tuleja 16, zaś łożysko 15 zabezpieczone jest pokrywą 17, a w tulei 16 zamocowana jest tuleja 18, w której znajduje się tuleja zaciskowa 19, działająca poprzez podkładkę 20 i sprężynę 21. Na końcu tulei 18 znajduje się gwintowana pokrywa 22.



Rys. 3.9. Konik obrabiarki z napędem pneumatycznym

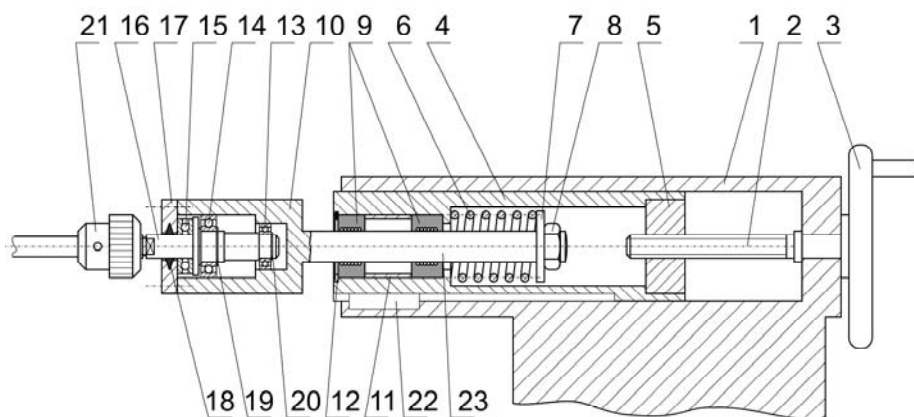
Konik obrabiarki działa w następujący sposób. W zależności od długości obrabianego wałka o małej sztywności, konik 1 jest ustawiany na łożu tokarki. Jeden z końców obrabianego wałka o małej sztywności jest mocowany w uchwycie obrabiarki, a drugi w tulei zaciskowej 19. Przy zakręcaniu pokrywy 22, tuleja zaciskowa 19 wsuwa się w tuleję 18, ściskając sprężynę 20. Przestrzeń cylindra pneumatycznego 5 są otwarte, co pozwala na swobodne przemieszczenie osiowe elementów konika w celu zamocowania wałka. Przez króciec 6, do przestrzeni cylindra 5, jest podawane sprężone powietrze w celu pierwotnego, wstępnego obciążenia elementów konika, przy tym sprężyna 13 jest ściskana. Obrabiany wałek jest wprowadzany w ruch obrotowy przez uchwyt obrabiarki. Ten sam ruch przez wałek przekazywany jest na tuleję zaciskową 19 i obracającą się tuleję 18. Łożysko oporowe 15 oraz tuleja 11 są zabezpieczone przed ruchem obrotowym śrubą 14, co daje możliwość tulei 11 tylko osiowego przemieszczania się. Przy dalszym podawaniu powietrza sprężonego przez króciec 6 do przestrzeni cylindra pneumatycznego 5 realizowane jest rozciąganie osiowe obrabianego wałka o małej sztywności, przekazywane przez trzpień 8 cylindra 5, sprzęgło 9, ciągnio 10, ruchomą tuleję 11, tuleje 16, 18 i tuleję zaciskową 19. W ten sposób obracający się obrabiany wałek o małej sztywności jest obciążony siłą rozciągającą, która powoduje zwiększenie jego sztywności i zmniejszenie odkształceń sprężystych oraz zwiększenie dokładności obróbki. Po zakończeniu cyklu, obróbki sprężone powietrze jest odprowadzane z przestrzeni cylindra 5, przez króciec. Obciążenie elementów konika ulega zmniejszeniu.

Pod działaniem sprężyny 13, ruchoma tuleja 11 obraca się do położenia początkowego. Przy odkręcaniu nakrętki 22, pod działaniem sprężyny 21, tuleja zaciskowa 19 przesuwa się w lewo wzdłuż osi tulei 18 i obrabiany wałek o małej sztywności jest zwalniany.

Korzystnym skutkiem rozwiązania jest prosta i zwarta konstrukcja konika, niski koszt ewentualnego wykonania i jego zastosowania przy produkcji wałków precyzyjnych o małej sztywności na obrabiarkach, z wykorzystaniem układów sterowania automatycznego i obrabiarek sterowanych numerycznie.

3.4.7. Konik tokarki konwencjonalnej do obróbki wałków w stanie sprężyscie – odkształcalnym

W celu podwyższenia niezawodności technologicznej obróbki wałków sprężyscie – odkształcalnych, w warunkach produkcji jednostkowej i małoseryjnej, opracowano kilka koników tokarki o prostej konstrukcji, z wykorzystaniem elementów sprężystych. Zastosowanie tego typu rozwiązań jest mało kosztowne i w zasadzie nie wymaga przebudowy tokarki. Przykładowe rozwiązanie pokazano na rys. 3.10 [174].



Rys. 3.10. Budowa konika tokarki ze sprężynowym mechanizmem wywierania siły rozciągającej

Walek o małej sztywności jest mocowany w uchwycie 21, przy zablokowanym, na łożu obrabiarki, korpusie 1. Przy pomocy pokrętła 3, śruba trapezowa 2 jest wprowadzana w ruch obrotowy, przy tym śruba 2 jest wkręcana w nakrętkę 5. W wyniku tuleja 4 przesuwa się w prawo, napinając sprężynę spiralną 6. Tuleja 4, w korpusie 1, ulega zablokowaniu. Siła wywierana przez sprężynę spiralną 6 jest przenoszona przez walek 23, obudowę 10, łożysko oporowe 15, walek 16 oraz uchwyt 21 na przedmiot obrabiany. Walek 16 wraz z uchwytem 21 wykonują w trakcie obróbki ruch obrotowy, spowodowany przez obracający się przedmiot obrabiany.

Łożyska liniowe toczne 9 umożliwiają przemieszczenie obudowy 10, z wałkiem 23, względem tulei 4 bez luzu promieniowego. Na część obrabianą działa siła rozciągająca, wywołana ściśnięciem sprężyny spiralnej 6. Sztywność części zmniejsza odkształcenia sprężyste podczas obróbki, powodując zwiększenie dokładności obróbki.

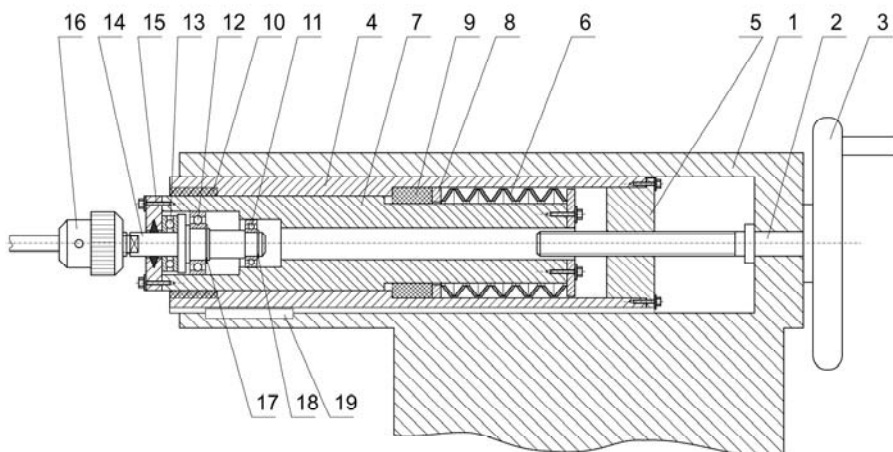
Po zakończeniu procesu obróbki tuleja 4, w korpusie 1 jest odblokowywana, i w wyniku obrotu pokrętła 3, ze śrubą trapezową 2, przez nakrętkę 5 z tuleją 4, jest zwalniany nacisk sprężyny spiralnej 6. Zdejmowane jest obciążenie z obudowy 10, z wałkiem 23 i następuje zwolnienie części o małej sztywności oraz usunięcie jej z uchwytu 21.

Przykład konstrukcji konika obrabiarki z wykorzystaniem sprężyn talerzowych pokazano na rys. 3.11 [175].

W uchwycie 16 mocowana jest część obrabiana o małej sztywności. Korpus 1 konika na łożu obrabiarki ulega zablokowaniu. Przez pokrętło 3 śruba trapezowa 2 wprowadzana jest w ruch obrotowy – jest wkręcana w nakrętkę 5. Tuleja 4 przesuwa się w prawo, napinając sprężyny talerzowe 6 przez tuleję 7.

ŚRODKI AUTOMATYZACJI I STEROWANIA OBRÓBKĄ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI W STANIE SPRĘŻYŚCIE – ODKSZTAŁCALNYM

Tuleja 4 ulega zablokowaniu w korpusie 1. Siła oddziaływania sprężyn talerzowych 6 jest przenoszona przez tuleję 4, łożysko oporowe 13, wałek 14, uchwyt 16, na przedmiot obrabiany. Wałek 14, wraz z uchwytem 16, wykonują w trakcie obróbki ruch obrotowy. Łożyska ślizgowe 9 i 10 umożliwiają przemieszczenie tulei 7 względem tulei 4 bez luzu promieniowego. Część obciążana jest siłą rozciągającą, wywołaną w wyniku ściśnięcia sprężyn talerzowych 6, co zwiększa sztywność części i zmniejsza jej odkształcenie sprężyste podczas obróbki oraz umożliwia zwiększenie dokładności obróbki.

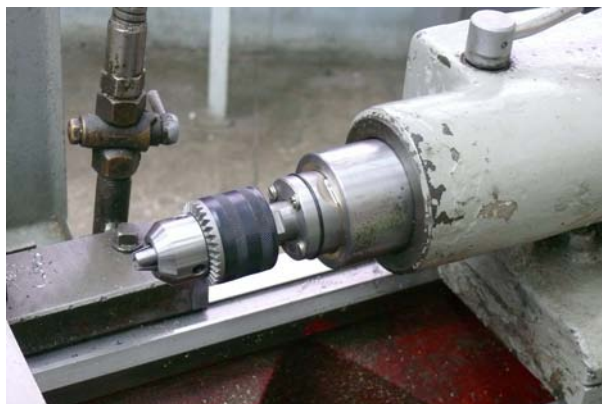


Rys. 3.11. Budowa konika tokarki wykorzystującego sprężyny talerzowe

Po zakończeniu procesu obróbki tuleja 4, w korpusie 1 jest odblokowywana i w wyniku obrotu pokrętła 3 ze śrubą trapezową 2, przez nakrętkę 5, z tuleją 4, zwalniany jest nacisk sprężyn 6. Przy tym zdejmowane jest obciążenie siłą rozciągającą tulei 7 i wałka 14, oraz następuje odmocowanie części o małej sztywności oraz jej usunięcie z uchwytu 16. Widok urządzenia z rys. 3.11, zamontowanego na obrabiarce, pokazano na rys. 3.12.

ŚRODKI AUTOMATYZACJI I STEROWANIA OBRÓBKĄ WAŁKÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI W STANIE SPRĘŻYŚCIE – ODKSZTAŁCALNYM

a)



b)



c)



d)



e)



Rys. 3.12. Konik tokarki do obróbki wałków sprężystości – odkształcalnych:
a) w spoczynku bez obciążenia; b) w spoczynku z ustawioną siłą rozciągającą; c) widok stanowiska z zamocowanym wałkiem o małej sztywności; d) urządzenie w czasie pracy; e) przykłady próbek

Do najważniejszych zalet tego rozwiązania należą: prosta i zwarta konstrukcja, niski koszt wykonania, możliwość zastosowania w każdej tokarce, posiadającej standardowy konik, prosta obsługa, łatwe ustawianie siły rozciągającej, brak czynnika roboczego (np. sprężonego powietrza), łatwy i szybki montaż oraz demontaż.

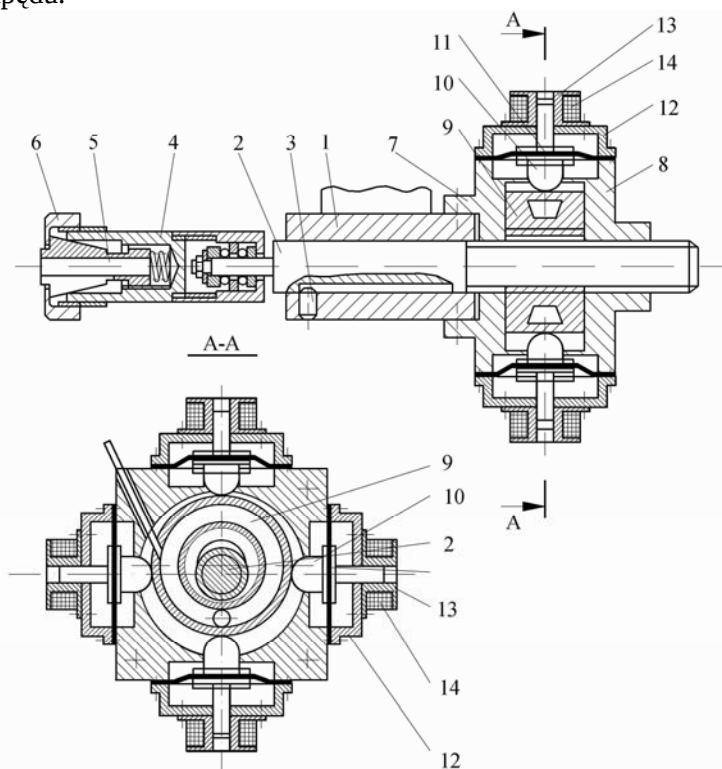
3.4.8. Konstrukcja konika tokarki z drgającym krokowym napędem pneumatycznym o działaniu liniowym

W celach rozszerzenia możliwości funkcjonalnych zautomatyzowanych systemów obrabiarkowych, do obróbki części o małej sztywności, w stanie sprężystości – odkształcalnym opracowano konstrukcję konika obrabiarki, z drgającym napędem krokowym o działaniu liniowym (rys. 3.13) [162].

W korpusie 1, znajduje się element kierunkowy 3, przeciwdziałający jego obrotowi. Z lewej strony trzpienia 2, na łożyskach oporowych umieszczona jest

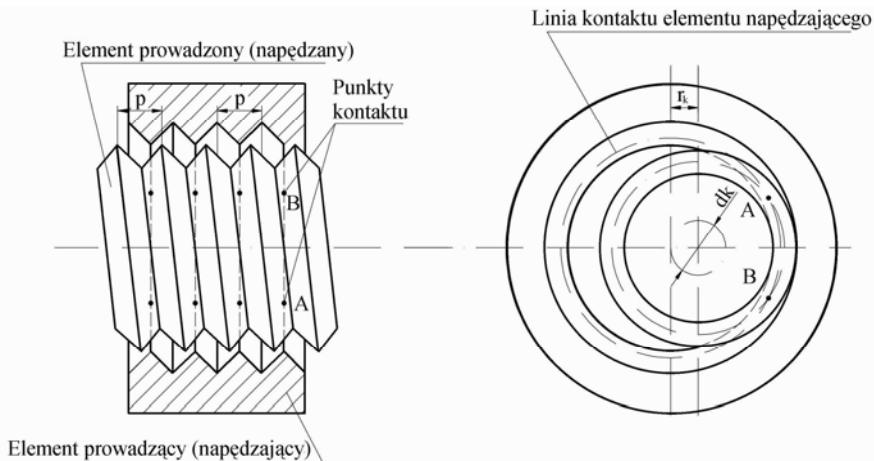
tuleja obrotowa 4, w której znajduje się tuleja 5, ze śrubą zaciskową 6. Tuleja 5 osadzona jest na sprężynie. Z prawej strony korpusu konika 1 znajduje się korpus napędu (połowa lewa 7 i prawa 8). W korpusie umieszczono tuleję (element prowadzący) 9, która ma możliwość przemieszczania się prostopadle do osi części. Na wewnętrznej powierzchni tulei 9 wykonano rowki koncentryczne, identyczne jak profil gwintu trzpienia 2, wchodzące w kontakt z gwintem trzpienia 2 i tworzące z nią przekładnię klinową [162, 163, 187].

Na zewnętrznej powierzchni korpusu znajduje się „n” napędów z małym zasięgiem przemieszczeń (w danym przypadku 4 siłowniki membranowe), składające się z trzpieni 10, membran 11, korpusów 12 – na powierzchni ustawione są cewki 13 z uzwojeniami 14, w których umieszczone są drugie końce trzpieni 10. Obrót elementu wiodącego 9, wokół własnej osi uniemożliwiają zawieszki sprężyste. Cewki 13, z uzwojeniami 14, spełniają rolę czujników położenia. Przekładnia mechaniczna, zastosowana w napędzie w dużym stopniu jest podobna do przekładni falowej, ma jednak w porównaniu z nią wiele zalet: element prowadzący jest sztywny – odkształcają się tylko sprężyste zawieszki [162]. Podobna konstrukcja konika umożliwia zwiększenie niezawodności i mocy napędu.



Rys. 3.13. Konik obrabiarki z drgającym krokowym napędem pneumatycznym

Czynnik roboczy podawany jest przez rozdzielacze elektro – pneumatyczne do siłowników membranowych, przy tym trzpień 10 przyciskają tulejkę 9 z wewnętrznymi rowkami pierścieniowymi do trzpienia gwintowanego 2. Przy prawym gwincie wykonanym na trzpieniu 2 i parzystym włączeniu komór pneumatycznych: I–IV; IV–II; III–II; II–I itd., trzpień 2 przemieszcza się w prawo i część zamocowana w tulei sprężynującej, obciążana jest siłą rozciągającą, wytwarzającą stan sprężyscie – odkształcalny. Jednocześnie mechanizm naciągu konika 1 umożliwia doprowadzenie mechanizmu zacisku części, w wyniku ponownego ustawienia, do obróbki części o innej długości. W tym celu realizowane jest odwrotne przełączenie komór pneumatycznych według schematu: I–II; II–III; III–IV; IV–I itd., przy tym trzpień 2 przemieszcza się w lewo. Komutacja rozdzielaczy elektro – pneumatycznych i zatrzymanie mechanizmu obciążenia jest realizowane przy pomocy układu sterowania, wykonanego na bazie mikroprocesora.



Rys. 3.14. Geometria współdziałania elementów napędzającego i napędzanego

Geometria wzajemnego oddziaływania elementów: napędzającego i napędzanego jest przedstawiona na rys. 3.14. Trzpień 2, o prawym gwincie przemieszcza się w lewo. Ruch przy tym realizowany jest w wyniku wzajemnego oddziaływania w punkcie styku A. Przy komutacji w kierunku odwrotnym ruch odbywa się w wyniku wzajemnego oddziaływania w punkcie styku B (trzpień 2 przemieszcza się w prawo). Przy realizacji jednego pełnego cyklu drgań przez element napędzający, element napędzany przemieszcza się o jeden skok gwintu „p”. Średnica d_k okręgu drgań jest równa $2r_k$ i odpowiada maksymalnemu luzowi między elementami napędzającym i napędzanym.

3.5. Podsumowanie

Sterowanie automatyczne odkształceniami sprężystymi części w układzie technologicznym, w wyniku zastosowania dodatkowych oddziaływań siłowych, zmieniających jej stan sprężystość – odkształcalny, umożliwia zwiększenie dokładności obróbki oraz wydajności procesu technologicznego.

Najprostsze w technicznej realizacji, z punktu widzenia zwiększenia dokładności obróbki części o małej sztywności są układy, w których jako oddziaływania sterownicze stosowane są siła rozciągająca, działająca wzdłuż osi części i siła mimośrodowa. Siła rozciągająca, przykładana z przemieszczeniem (mimośrodowo), tworzy dodatkowy moment zginający w kierunku przeciwnym momentom zginającym, pochodzącym od siły skrawania.

Przedstawiono sposób obróbki mechanicznej, który umożliwia osiągnięcie niezawodności technologicznej w czasie toczenia i jednocześnie sterowanie stanem sprężystości – odkształcalnym wałków w układzie technologicznym.

Do obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężystości – odkształcalnym, w celu uzyskania odpowiedniej dokładności i wydajności opracowano, wiele konstrukcji koników do tokarek, które mogą znaleźć zastosowanie w zakładach przemysłowych, przy produkcji jednostkowej oraz seryjnej.

4. TECHNOLOGIA OBRÓBKİ WAŁÓW DŁUGOWYMIAROWYCH

4.1. Modułowa technologia wytwarzania długowymiarowych wałów o małej sztywności

W wielu współczesnych agregatach, maszynach i przyrządach są stosowane bardzo dokładne części o małej sztywności. Ciągły wzrost liczby tego rodzaju elementów jest uwarunkowany doskonaleniem metod obliczeń wytrzymałościowych, optymalizacją kształtu części i konstrukcji, ciągłym obniżaniem ilości materiału potrzebnego do wytworzenia części i stale wzrastającą produkcją maszyn precyzyjnych.

Doświadczenia przemysłowe wytwarzania takich elementów w produkcji małoseryjnej i seryjnej pokazują, że tradycyjne sposoby obróbki sztywnych części są mało efektywne przy wytwarzaniu wyrobów o małej sztywności, dlatego w praktyce przy ich obróbce zaniżane są parametry obróbki oraz stosowana jest operacja docierania ręcznego. Prowadzi to do zwiększenia pracochłonności obróbki, nie gwarantuje przy tym wymaganej jakości wyrobów [44].

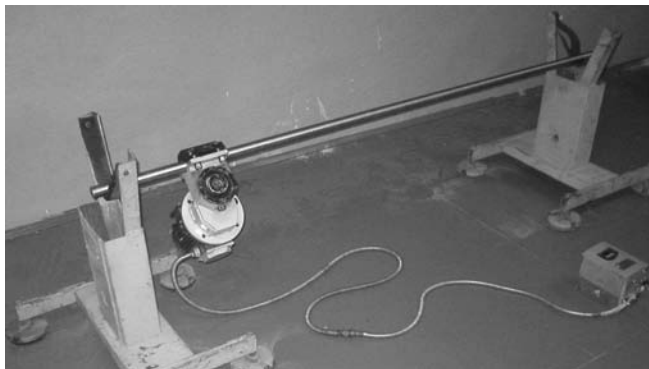
Do wytwarzania długich wałów stosowana jest technologia modułowa, zawierająca takie podstawowe operacje, jak: obróbka cieplna (odpuszczanie i hartowanie) z procesem nagrzewania i stygnięcia, realizowanego w MODUŁ 1; obróbka mechaniczna (toczenie i frezowanie) z zastosowaniem systemu stabilizacji osi półfabrykatu w procesie toczenia (MODUŁ 2); obróbka wibracyjna (MODUŁ 3), stosowana po obróbce cieplnej i przed operacjami końcowymi [44].

Urządzenie MODUŁ 1 jest przeznaczone do obróbki termicznej długich części o wysokiej dokładności, w celu poprawienia ich osi i stabilizacji właściwości fizyko – mechanicznych półfabrykatu, po objętości w wyniku jego odkształcania plastycznego. Urządzenie wykonane jest z tworzywa o większym współczynniku liniowego rozszerzania cieplnego niż materiał półfabrykatu. Z powodu różnicy prędkości odkształcenia cieplnego, przy nagrzewaniu i stygnięciu, półfabrykat ulega określonej odkształceniu plastycznemu, sprzyjającemu poprawieniu jego osi oraz stabilizacji charakterystyk geometrycznych w okresie eksploatacji, w wyniku ujednolicenia własności fizyko – mechanicznych w całej objętości materiału.

System automatycznej stabilizacji osi półfabrykatu jest stosowany przy operacjach obróbki mechanicznej (MODUŁ 2) i zawiera belkę, sztywno umocowaną w uchwycie i koniku tokarki. Na korpusie są zamocowane podtrzymki samocentrujące, ustawiane w strefach i przeciwwęzłach trzeciej formy drgań półfabrykatu. Na korpusie podtrzymki znajdują się trzy rolki (jedna na trzpieniu, dwie na dźwigniach), uruchamiane jednocześnie od napędu hydraulicznego. Dzięki wzornikowi, określającemu przemieszczenie rolek, półfabrykat jest orientowany względem osi podtrzymek, wstępnie ustawionych względem osi obrabiarki. Przy toczeniu podtrzymki stabilizują oś przedmiotu.

Przy posuwie wzdłużnym, narzędzie (nóż) bez problemu przechodzi przez rolki, które z uwzględnieniem dodatkowego stopnia swobody odnośnie do osi y, przemieszczają się z powierzchni nieobrobionej na obrobioną. Zakres średnic obrabianych przedmiotów: 10÷30 mm – I typ; 30÷110 mm – II typ i 100÷210 mm – III typ podtrzymek. Przedmioty w procesie obróbki są mocowane w samocentrujących podtrzymkach (nie są dociskane kłem konika), a moment obrotowy na przedmiot przekazywany jest przez zabierak. Przy tym oś przedmiotu nie pokrywa się z osią obrabiarki, a bazowanie po zewnętrznej powierzchni przedmiotu ujednolica bazy technologiczne i pomiarowe, co gwarantuje równomierność naddatku w kolejnych zabiegach. Dokładność obróbki, w przekroju poprzecznym przedmiotu, mieści się w zakresie od 8 do 12 μm przy średnicach od 30 do 100 mm oraz od 10 do 15 $\mu\text{m}/\text{m}$, przy obróbce wałów o długości do 2 m. Wydajność ograniczona jest tylko mocą obrabiarki.

System automatycznej stabilizacji osi przedmiotu jest wyposażony w układ sterowania podtrzymek samocentrujących, w funkcji parametrów sztywności i tłumienia. Przy zamianie imaka tokarki na głowicę frezarską, a konika na głowicę podziałową, system automatycznej stabilizacji umożliwia, bez ponownego ustawienia przedmiotu, frezowanie rowków wpustowych i ścięć. Uniwersalność takiej technologii, kiedy cała obróbka mechaniczna wykonywana jest w jednym module tokarskim, wydatnie obniża koszty własne produkcji gotowej, przy zwiększeniu dokładności wykonania.



Rys. 4.1. Urządzenie do stabilizacji wibracyjnej

Urządzenie do obróbki wibracyjnej (rys.4.1-MODUŁ 3) wałów długich jest przeznaczone do stabilizacji wibracyjnej parametrów geometrycznych wałów długich, o małej sztywności, po operacjach prostowania, obróbki mechanicznej, odpuszczania oraz normalizowania.

Wibrator drgań zginających jest mocowany na przedmiocie, ustawionym na podporach sprężystych. Podczas działania powstają drgania zginające (do 3-ech składowych harmonicznym), prowadzące do relaksacji naprężeń szczątkowych, w wyniku czego następuje stabilizacja geometrii części i zmniejsza się liczba operacji obróbki cieplnej.

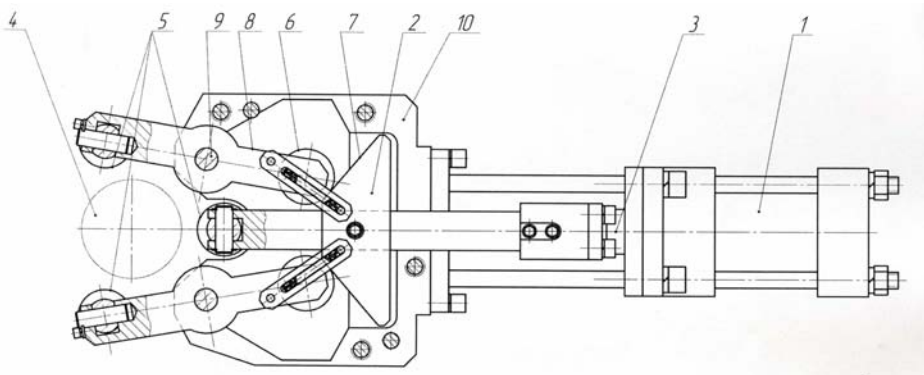
4.2. Obróbki tokarska wałów o małej sztywności

Półfabrykaty wałów o małej sztywności, przy obróbce tokarskiej są mocowane zwykle w uchwycie samoosiującym, z przesuwным kłem konika, przy zastosowaniu podtrzymki nastawianej. Brak współosiowości elementów, bazujących układu technologicznego, może być przyczyną skrzywienia osi półfabrykatu podczas jego docisku kłem konika, w kierunku osiowym. Przy obróbce tokarskiej, z powodu oddziaływania cieplnego i inercyjnego w układzie technologicznym, zwiększa się także ugięcie wału. Stąd problem stabilizacji osi wału wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań. Wysokie wymagania są stawiane również odchyłkom kształtu i rozmieszczenia powierzchni bazowych pod podtrzymki, w tym przypadku konieczne jest ustawienie i wyregulowanie położenia półfabrykatu lub przetoczenie szyjki bazowej. Zmniejszenie wpływu niewyważenia półfabrykatu, na proces skrawania, wiąże się ze zmniejszeniem parametrów obróbki.

Przy obróbce półfabrykatu o małej sztywności należy zmniejszyć jego ugięcie, a także zmniejszyć niewyważenie, obracającej się części oraz zlikwidować oddziaływanie sił, wywołanych dociskiem kła konika [47].

Na kształtowanie powierzchni przy toczeniu i roztaczaniu duży wpływ mają drgania elementów układu technologicznego. Przy tym makro- i mikrozarys powierzchni zależy od drgań poliharmonicznych, ze składową stochastyczną, będących funkcją powiązań przestrzennych i sztywności elementów układu technologicznego. Jeżeli drgania są stabilne i nie zmieniają się w procesie obróbki, zarys powierzchni jest regularny. Harmoniczne składowe drgań zarysu części są określane modami drgań. Przy czym każda z harmonik profilu (lub ich grupa) jest uwarunkowana oddzielną składową drgań, zależną od jakiegoś elementu układu technologicznego. Przy obróbce części o małej sztywności dominujący wpływ na dokładność obróbki ma przemieszczenie podukładu półfabrykat – podpory [48].

Zaprojektowano i wykonano stanowisko do tokarek, przeznaczone do stabilizacji osi części o małej sztywności w procesie obróbki. Podstawowym jego elementem jest podtrzymka samoosiująca o napędzie hydraulicznym [21], umożliwiającą centrowanie części bez wstępnego jej ustawiania. W celu zmniejszenia obciążenia oraz polepszenia charakterystyk dynamicznych układu technologicznego, oś wzdłużną korpusu podtrzymki, wraz z napędem, zamocowano pod kątem alfa, który jest określany w funkcji parametrów geometrycznych noży, zarówno roztaczaka, jak i narzędzi do obróbki zewnętrznej. Podtrzymka samocentrująca (PSH) umożliwia centrowanie części w procesie obróbki (rys. 4.2). Mechanizm wykonawczy w czasie skrawania działa w następujący sposób: przy podaniu czynnika roboczego (olej) do cylindra napędu hydraulicznego 1, kopiał płaski 2, połączony z trzpieniem tłoka napędu 3, przemieszcza się w kierunku części obrabianej 4, a rolki robocze 5 (mogą one być wykonane jako podwójne i mają dwa stopnie swobody: obrót względem osi własnej i osi obrotu 9 dźwigni 8) zaciskają lub zwalniają część poprzez styk rolek 6, ustalających położenie, względem powierzchni roboczej kopiału płaskiego.



Rys. 4.2. Podtrzymka samocentrująca

Podtrzymki rozmieszczane są wzdłuż wału tak, aby uzyskać jego równomierną sztywność, w funkcji ilorazu długości i średnic wału $\left(\frac{l}{d} < 5\right)$

lub też podtrzymki są ustawiane w strefach przeciwwęzłów rozkładu wyższych podstawowych postaci drgań części. Samoosiujące podtrzymki hydrauliczne ustawiane są w węzłach drgań zginających i działają tak, jak podpory o równej sztywności. Ciśnienie doprowadzane do PSH umożliwia zacisk części, a na PSH sterowanych, ustawianych na nieobrabianej w danym zabiegu powierzchni, działających w trybie tłumika, jest wytwarzane ciśnienie umożliwiające tłumienie drgań poprzecznych. W trakcie przemieszczania się wzdłużnego narzędzia, przełączenie PSH pracujących w trybie tłumików na tryb

podpór o równomiernej sztywności (podtrzymek) jest realizowane za pomocą przełącznika, w funkcji drogi, przebytej przez wytaczadło (suport).

Powierzchnie oporowe wału w miejscach ustawienia skrajnych podtrzymek, są wstępnie przetaczane. Umożliwia to zwiększenie dokładności obróbki i wyklucza dziedziczność technologiczną warunków zamocowania.

Tradycyjny sposób mocowania prowadzi do skrzywienia osi części i powstania naprężeń szczątkowych w materiale, które ulegają wzmocnieniu w wyniku odkształcenia plastycznego w czasie obróbki materiału.

Mechanizm wykonawczy podtrzymki pracuje w sposób następujący: przy podaniu czynnika roboczego (oleju) do cylindra hydraulicznego napędu 1, kopiał płaski 2, połączony z tłoczyskiem 3 napędu, przemieszczany jest na część obrabianą 4, a wałeczki robocze 5 (mogą być wykonane jako podwójne, o dwóch obrotowych stopniach swobody, odnośnie do osi własnej i osi obrotu) zaciskają lub zwalniają część w wyniku docisku wałeczków 6, do powierzchni roboczej 7, kopiału płaskiego. Powierzchnia robocza kopiału jest wykonana odpowiednio według linii krzywej, zbliżonej do łuku koła, w zależności od zakresu średnic obrabianej części. Jedna para wałeczków roboczych jest rozmieszczona na trzpieniu kopiału płaskiego, dwie pozostałe pary wałeczków są natomiast przymocowane do dźwigni 8. Obrót dźwigni, na końcach, której rozmieszczone są wałeczki robocze 5, wykonywany jest odnośnie do osi obrotu 9. Dźwignia jest zamocowana w korpusie 10 podtrzymki. Część 4 jest zaciskana wałeczkami, zgodnie z programem sztywnym od kopiału. Zacisk wałeczków jest realizowany z siłą proporcjonalną do siły pochodzącej od napędu. Do odciążenia wałeczków i dźwigni, jak również polepszenia charakterystyk dynamicznych układu technologicznego, oś wzdlużna korpusu podtrzymki, razem z napędem, jest obrócona względem płaszczyzny poziomej o kąt α , określany w funkcji kierunku składowej promieniowej siły skrawania, zależnego od parametrów geometrycznych zastosowanych narzędzi skrawających: noży wytaczadła, noży do toczenia zewnętrznego, wiertel. Podtrzymka, jako dodatkowa podpora, może być zastosowana do toczenia wewnętrznego i zewnętrznego. Liczba podtrzymek i ich rozmieszczenie wzdluż półfabrykatu jest określana z warunku równej jego sztywności, w funkcji stosunku długości l i średnic części d . Powinien być przy tym spełniony warunek $l/d < 5$. Podtrzymki są ustawiane w strefach powstawania węzłów i przeciwwęzłów rozkładu podstawowych postaci drgań (od 2 do 5 harmonik).

Do racjonalnego obciążenia wałeczków i dźwigni, a także polepszenia charakterystyk dynamicznych układu technologicznego, oś wzdlużna korpusu podtrzymki, pokrywająca się z osią jej maksymalnej sztywności razem z napędem obraca się o kąt α , określany w funkcji kierunku wypadkowej siły skrawania.

Mogą być dwa rodzaje działania podtrzymki: sztywny lub tłumiący, w zależności od charakteru i warunków obróbki (zgrubna lub wykańczająca oraz stanu półfabrykatu).

Moment skracający jest przekazywany na półfabrykat przez uchwyt zabierakowy, który może przemieszczać się w kierunku promieniowym w celu wykluczenia nieokreśloności bazowania. Uchwyt ma mechanizm zabezpieczający, sztywne wzdłużne ustalenie wału z dwóch czoł, bez zamykania siłowego.

W stanie początkowym, przed procesem skrawania, wszystkie PSH działają jako tłumiki, oprócz tych, które znajdują się przy wrzecionie i koniku, działających w trybie sztywnych podpór. Jest to niezbędny warunek ustawienia osi części odnośnie do osi technologicznej obrabiarki. Powierzchnie oporowe wału w miejscach ustawienia podtrzymek, są wstępnie nawalcowywane w celu skorygowania kształtu powierzchni bazowej. Przy pomocy przyrządu TAYLOR – HOBSON zbudowano wykresy kołowe w przekrojach poprzecznych półfabrykatu, zastosowanych jako powierzchnie bazowe. Z wykresów kołowych wynika, że odchyłka od okrągłości powierzchni bazowej po walcowaniu zmniejszyła się od 1,3 do 2 razy, w zależności od właściwości fizyko – mechanicznych materiału, jego profilu początkowego, ciśnienia roboczego i czasu walcowania.

W przypadku PSH, ustawianych względem powierzchni nieobrabianej, w danym zabiegu, określane jest ciśnienie, umożliwiające tłumienie drgań, przy czym wraz z przemieszczaniem układu narzędziowego (wytaczadła, przy obróbce otworu lub noża, przy toczeniu powierzchni zewnętrznej) wzdłuż części przełączenie PSH tłumienia w tryb podpór sztywnych jest realizowane za pomocą przełącznika, w funkcji drogi przemieszczenia narzędzia, rejestrowanej przez czujnik. PSH, ustawiane w węzłach drgań zginających, mogą działać jako podpory sztywne.

Przy skrawaniu podpory, między którymi umiejscowiona jest strefa skrawania, w celu stabilizacji osi półfabrykatu, są przełączane w tryb podtrzymek sztywnych. Przy toczeniu powstają różne warianty połączenia podpór sztywnych i tłumiących: ich liczba może wynosić od 7 do 9, w zależności od długości części. Oczywiście liczba kombinacji podpór sztywnych i tłumiących może być również większa. Przy zmianie kombinacji PSH ma miejsce przesunięcie częstotliwości własnej podukładu „półfabrykat – podpory”, w wyniku czego amplituda drgań półfabrykatu, w kierunku poprzecznym, zmienia się, co jest uwarunkowane zmianą współczynnika sztywności i tłumienia podukładu zredukowanego. Należy uwzględnić, że kształt sprężystej osi, obracającego się półfabrykatu, również przy tym ulega zniekształceniu, wraz ze zmianą energii kinetycznej, niewyważonych odcinków wału, przekazywanej do strefy skrawania. Z tego powodu amplituda drgań względnych (ADW) wzajemnie powiązanych podukładów „część – podpory”

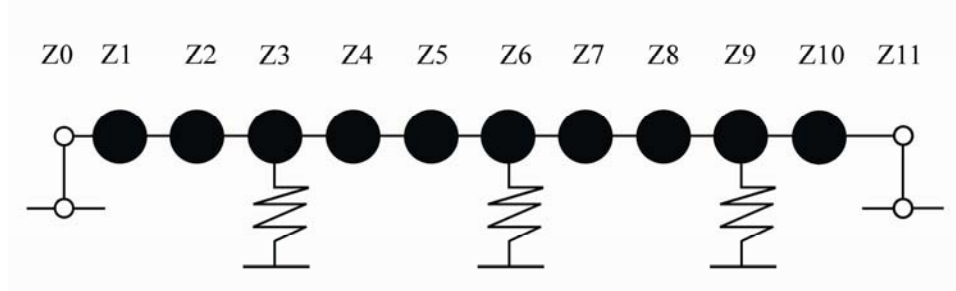
i „nóż - suport” również się zmienia. Powoduje to, że wzdłuż półfabrykatu można wyodrębnić strefy o jednakowym charakterze błędów kształtu i położenia oraz mikrogeometrii, ale różniące się wzajemnie wraz z przejściem do kolejnej strefy.

Sterowania procesem skrawania sprowadza się do sterowania częstością zakłóceń, w funkcji zmieniających się częstotliwości własnych układu, poprzez zmianę parametrów obróbki lub sterowania ciśnieniem czynnika roboczego w PSH. Przy nowych kombinacjach podpór sztywnych i tłumiących częstość własna podukładu zmieniała się minimalnie, stabilizując tym samym zredukowane współczynniki sztywności i tłumienia podukładu „półfabrykat – podpory”.

W celu uzasadnienia zastosowania różnych kombinacji podpór przeprowadzono analizę schematów ustawienia wałów, o małej sztywności na operacji tokarskiej w podtrzymkach stacjonarnych, przy różnych trybach pracy.

4.2.1. Teoretyczne uzasadnienie sterowania obróbką wałów o małej sztywności

W celu określania kształtu osi półfabrykatu przy toczeniu zastosowano metodę parametrów początkowych [76, 121], przy tym w przypadku każdego odcinka są tworzone macierze przejściowe, które następnie są przemnażane. Przy przejściu do podpory pośredniej zestawiana jest macierz podpory pośredniej, która jest mnożona przez poprzedni wynik, następnie zestawiane są macierze kolejnych odcinków i przekrojów. W taki sposób powstaje macierz złożonego wału wielopodporowego.



Rys. 4.3. Schemat obliczeniowy określania kształtu osi półfabrykatu i jej częstotliwości własnych

Schemat obliczeniowy półfabrykatu, ustawionego w pięciu podtrzymkach, przedstawionego w postaci zestawu odcinków prętów nieważkich i mas skupionych, pokazano na rys. 4.3. Podtrzymki zastąpiono odpornymi na przemieszczenia poprzeczne podporami [48].

Macierz przenoszenia schematu obliczeniowego otrzymano przemnażając macierze jej elementów

$$P = G_n M_n Q_n G_{n-1} M_{n-1} G_{n-1, n-2} \dots M_k Q_k G_{k-1} \dots M_0 Q_0, \quad (4.1)$$

gdzie:

G_i, M_i, Q_i – macierze przejściowe nieważkiego odcinka pręta, masy skupionej i sprężystej odnośnie do przemieszczenia poprzecznego podpory;

i – numer odcinka,

$i=0, \dots, n$; – liczba odcinków.

Podstawowe równanie macierzowe, wiążące przekroje graniczne, przyjęte w postaci podpór przegubowych

$$Y_n = P \cdot Y_0, \quad (4.2)$$

lub w postaci rozwiniętej jest następujące

$$\begin{pmatrix} Y_n \\ \varphi_n \cdot l \\ \frac{M_n \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{Q_n \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_0 \\ \varphi_0 \cdot l \\ \frac{M_0 \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{Q_0 \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

gdzie: EJ – odporność na zginanie danego odcinka wału;

l – długość wału;

y_i, φ_i, Q_i i M_i – przemieszczenie poprzeczne, kąt obrotu, siła poprzeczna i moment zginający w i -tym przekroju;

a_{jk} – współczynniki macierzy przenoszenia.

Macierz masy skupionej M_i w i -tym przekroju ma postać:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \nu_i & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.4)$$

gdzie: $\nu_i = \frac{m_i f^2 l^3}{EJ}$, a m_i – masa zredukowana do przekroju i ;

f – częstotliwość drgań własnych.

Macierz przejściowa sztywności nieważkiego odcinka pręta o długości l_i i sztywności EJ_i

$$G_i = \begin{pmatrix} 1 & h_i & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} & \frac{h_i^3}{6 \cdot u_i} \\ 0 & 1 & \frac{h_i}{u_i} & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.5)$$

gdzie: $h_i = \frac{l_i}{l}$, l_i – długość i -go odcinka,

l – długość całej części;

$u_i = \frac{EJ_i}{EJ}$, EJ_i – odporność na zginanie i -go odcinka.

Sztywność danego odcinka wału przyjmowana jest jako stała.

Można przyjąć, że siła skrawania działająca na wał zmienia się sinusoidalnie z częstotliwością, odpowiadającą częstotliwości obrotu półfabrykatu lub krotną do niej. Okresowość zakłócania jest uwarunkowana zmiennym naddatkiem i niewyważeniem półfabrykatu. W przypadku nieważkiego odcinka pręta, obciążonego skupioną siłą harmoniczną (siłą skrawania), zależność wiążąca parametry w przekrojach i i $i-1$ ma postać:

$$Y_i = G_i Y_{i-1} + \psi_i, \quad (4.6)$$

przy czym

$$\psi = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{A_i \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}, \quad (4.7)$$

gdzie A_i – amplituda siły harmoniczej, zmieniającej się z częstotliwością f .

Macierz przejściowa nieważkiego odcinka pręta z podporą sprężystą, względem przemieszczenia poprzecznego ma następującą postać:

$$Q_i = \begin{pmatrix} 1 & h_i & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} & \frac{h_i^3}{6 \cdot u_i} \\ 0 & 1 & \frac{h_i}{u_i} & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ -e_i & -e_i \cdot h_i & -\frac{e_i \cdot h_i^2}{2 \cdot u_i} & 1 - \frac{e_i \cdot u_i^3}{6 \cdot u_i} \end{pmatrix}, \quad (4.8)$$

gdzie: $e_i = \frac{c_i \cdot l^3}{EJ}$; c_i – współczynnik sztywności podpory.

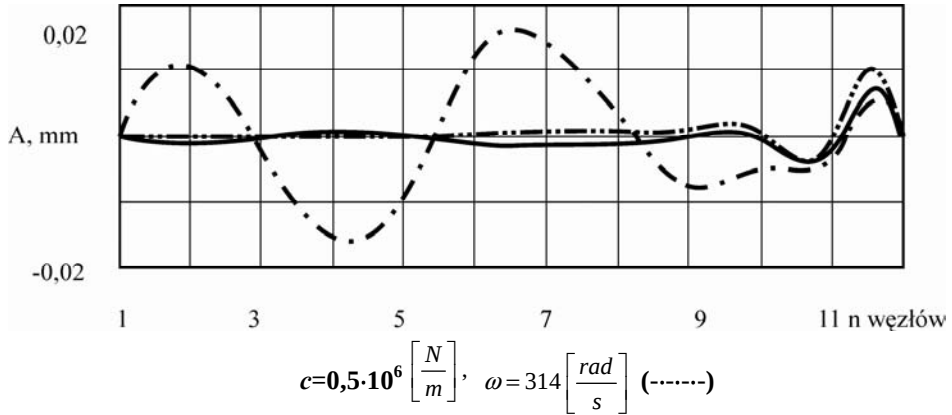
Wyznaczane są cztery składowe macierzy Y_0 i Y_n , dwie z nich w przypadku podpór przegubowych na końcach wału są równe zero. Macierze – kolumny w przekroju zerowym i w n – tym mają postacie:

$$Y_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_0 \cdot l \\ 0 \\ \frac{Q_0 \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}; Y_n = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_n \cdot l \\ 0 \\ \frac{Q_n \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}. \quad (4.9)$$

Z pierwszego i trzeciego wiersza zależności (4.3) wyznacza się:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= a_{12}\varphi_0 \cdot l + a_{14} \cdot \frac{Q_0 \cdot l^3}{EJ} \\ 0 &= a_{32}\varphi_0 \cdot l + \frac{a_{34} \cdot Q_0 \cdot l^3}{EJ} \end{aligned} \right\}. \quad (4.10)$$

W macierzach przejściowych, przy obliczaniu drgań wymuszonych częstotliwość własna f zamieniana jest na częstość zakłócenia ω . W celu wyznaczenia drgań wymuszonych rozwiązywano układ równań (4.10) – są wyznaczane ugięcia i kąty obrotu prawego końca wału.



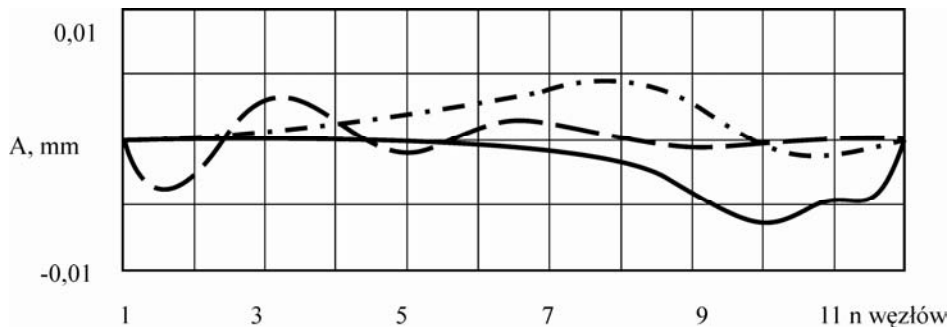
Rys. 4.4. Kształt osi półfabrykatu przy różnych warunkach zamocowania, częstotliwości siły wymuszającej i rozmieszczenia strefy skrawania w węźle Z10: podpora w węźle Z9 sztywna o współczynniku sztywności $c=2 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$, pozostałe współczynniki tłumiące $c=0,5 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$, $\omega = 314 \left[\frac{rad}{s} \right]$ (—); wszystkie podpory sztywne $c=2 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$, częstość wymuszenia ω od 31,4 do 62,8 $\left[\frac{rad}{s} \right]$ (-----); wszystkie opory tłumiące $c=0,5 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$, $\omega = 314 \left[\frac{rad}{s} \right]$ (-·-·-·-)

Według znanych parametrów φ_0 i Q_0 oraz macierzy przenoszenia wykonuje się ich przemnożenie, i określa parametry w dowolnym przekroju. Następnie są wybierane inne wartości częstości i zgodnie z powyższym schematem obliczeń określone są odpowiednie ugięcia. Wszystkie współczynniki i stałe określone są w oparciu o dane eksperymentalne.

Dany algorytm, wykorzystujący metodę parametrów początkowych, w postaci macierzowej, zrealizowano przy zastosowaniu programu Mathcad. W programie tym, w prosty sposób są zmieniane liczba i miejsca rozmieszczenia podpór (podtrzymek), położenie stref skrawania, częstość wymuszania.

Wyniki obliczeń wykonane według danego algorytmu przedstawiono na rys. 4.4 i rys. 4.5 Szczególnie należy odnotować zmienność amplitudy przemieszczenia półfabrykatu w strefie skrawania, w zależności od zmiany charakteru podpór, siły zakłócającej oraz położenia strefy skrawania. Wszystkie te czynniki technologiczne prowadzą również do zmiany kształtu osi półfabrykatu o małej sztywności. Dodatkowo na strefę skrawania oddziałuje niewyważenie półfabrykatu, na odcinkach od niej oddalonych.

Strefa skrawania otrzymuje dodatkową energię kinetyczną, która także wpływa na amplitudę drgań względnych półfabrykatu i noża.



Rys. 4.5. Kształt osi półfabrykatu przy różnych warunkach zamocowania, częstotliwości siły wymuszającej i rozmieszczenia strefy skrawania w węźle Z8: podpory w węzłach Z6 i Z9 sztywne $c=2 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$, pozostałe tłumiące $c=0,5 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$, $\omega = 31,4 \left[\frac{rad}{s} \right]$ (—); wszystkie podpory tłumiące $c=0,5 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$, (-----); wszystkie podpory tłumiące $c=0,5 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$, $\omega = 628 \left[\frac{rad}{s} \right]$ (----)

Analiza długiego wału o małej sztywności, podpartego w 5 miejscach (sztywność od 10 do 100 razy mniejsza od sztywności podpór), obciążonego w strefie skrawania zmienną siłą i obciążeniem harmonicznym, w zależności od częstotliwości drgań pokazała, że w zakresie częstotliwości od 0 do 100 Hz mogą być wzbudzone postacie własne od pierwszej do piątej. Przybliżając podpory można zmniejszyć błędy od odkształceń sprężystych podukładu „półfabrykat – podpory”, do wielkości porównywalnych z błędami sprężystymi, obróbki mechanicznej w tym celu, aby odkształcenia sprężyste półfabrykatu nie dominowały w błędzie sumarycznym.

Przy zastosowaniu dużej liczby podtrzymek, oprócz wysokiego kosztu wykonania, należy uwzględnić, że z powodu błędu wstępnego ustawienia podtrzymek odnośnie do osi technologicznej (dokładność ustawienia podtrzymek do 0,01 mm), powstają dodatkowe zakłócenia kinematyczne, przechodzące do strefy skrawania.

Jeżeli rozpatrywać wał jako masę skupioną, związaną z łóżem obrabiarki więzami sprężystym i dyspatywnym oraz częstością własną ω , to amplituda drgań wymuszonych półfabrykatu jest określana z zależności:

$$A = \frac{F_0}{c \sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{f^2})^2 + \frac{4\omega^2 n^2}{f^4}}}, \quad (4.11)$$

gdzie F_0 – amplituda siły wymuszającej.

Jeżeli przyjąć $F_0 = \text{const}$, to zmiana amplitudy drgań zależy od współczynnika sztywności zredukowanej c i częstotliwości własnej drgań półfabrykatu f . Współczynnik sztywności c zmienia się w funkcji położenia strefy skrawania między podporami. Przy obróbce w podtrzymkach, odcinek półfabrykatu, między sąsiednimi podporami, może być rozpatrywany jako belka jednoprzęsłowa. Z powodu zmiennej sztywności wzdłużnej ugięcie statyczne zmienia się od 1,3 do 2 razy. Zgodnie z warunkami opierania belki, z ogólnej macierzy przejściowej (4.1), określone jest równanie częstotliwości własnych podukładu „półfabrykat – podpory”:

$$\begin{vmatrix} a_{12}a_{14} \\ a_{32}a_{34} \end{vmatrix} = 0. \quad (4.12)$$

Na podstawie równania (4.12) są obliczane częstotliwości własne układu. Stosując opisane modele i algorytmy, są wyznaczone częstotliwości własne drgań zginających części osiowosymetrycznych w układzie stabilizacji osi półfabrykatu, zamocowanego na dowolnych podporach o zmiennych parametrach. Przy zmianie kombinacji połączenia podpór sztywnych i tłumiących, częstotliwość własna zmienia się o 1,6 razy. W eksperymencie na obrabiarce PB106, przy wyznaczaniu częstotliwości własnej metodą pomiaru drgań zanikających od obciążenia impulsowego zaobserwowano zmianę częstotliwości własnej od 30 [Hz] do 44 [Hz].

Drgania stacjonarne niegasnące półfabrykatu opisywane są zależnością:

$$y(t) = A \sin(f \cdot t - \gamma), \quad (4.13)$$

gdzie: $\tan \gamma = \frac{2\omega \cdot n}{f^2 - \omega^2}$ – przesunięcie fazy przemieszczenia od siły.

Jak widać z zależności (4.13), w wyniku przesunięcia częstotliwości własnych ma miejsce zmiana przemieszczenia fazy γ ; co powoduje dodatkową niestabilność błędu obróbki w związku ze zmianą wielkości przemieszczeń.

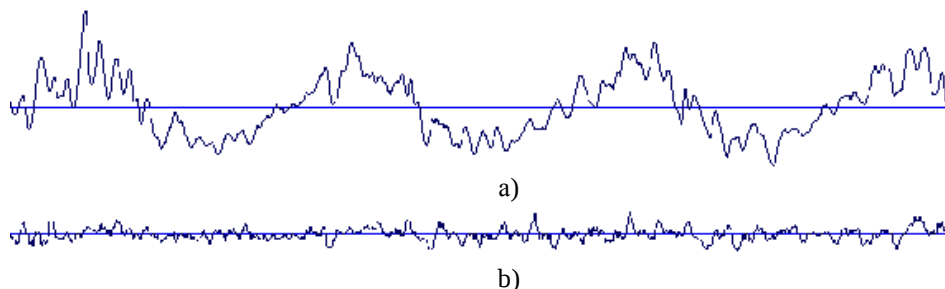
4.2.2. Praktyczna realizacja obróbki długowymiarowych wałów o małej sztywności

Wyznaczenie eksperymentalne odkształcenia osi wału o małej sztywności, w procesie toczenia przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym: obrabiarka

1A616, długość półfabrykatu 600 mm, średnica zewnętrzna 50 mm, średnica wewnętrzna 40 mm. Sygnał z czujnika prądów wirowych BENTLEY – NEVADA podawano przez wzmacniacz do komputera, gdzie był przetwarzany przy pomocy programu Sound Forge.

W czasie eksperymentu odkształcenie osi wału mierzono w trzech przekrojach: na biegu jałowym, następnie w procesie skrawania. Na rys. 4.6 (a, b) przedstawiono wykresy drgań osi wału o małej sztywności, powstające w czasie toczenia, bez układu oraz z układem stabilizacji.

Analiza zależności eksperymentalnych wykazała, że w czasie skrawania kształt osi wału zmienia się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej: przy małej – kształt osi jest zbliżony do statycznego; z jej wzrostem oś odkształca się. W czasie skrawania kształt osi wału o małej sztywności zbliżony jest do kształtu osi półfabrykatu na biegu jałowym, a wielkość odkształcenia osi S_M zależy od charakteru procesu skrawania. Wraz ze zmniejszeniem sztywności na zginanie półfabrykatu zwiększa się nie tylko odkształcenie osi, ale zmienia się również jej kształt: zwiększa się jej różnica od krzywej odkształceń statycznych. W układzie stabilizacji osi wału o małej sztywności, w opisywanych doświadczeniach, zastosowano dwie podtrzymki samocentrujące hydrauliczne (PSH). Toczenie z zastosowaniem układu stabilizacji, jak i bez układu, przeprowadzano w tych samych warunkach skrawania i z wykorzystaniem takich samych półfabrykatów. Badania wykazały, że największe odkształcenie osi części w czasie toczenia z zastosowaniem układu stabilizacji, zmniejszyło się od 4 do 10 razy. Półfabrykaty o długości $l=600$ mm, średnicy $d=42$ mm obrabiano dwuostrzową głowicą rozrzączaka, bez układu i z układem, przy następujących warunkach skrawania: $n=710$ obr/min, $f=0,27-0,5$ mm/obr; bez układu, w dwóch przejściach, z głębokością skrawania $a_{p1}=0,7$ mm i $a_{p2}=0,3$ mm; z układem w jednym przejściu $a_p=1$ mm. Największe odchylenie od walcowości przy zastosowaniu układu zmniejszyło się od 3 do 5 razy. Najważniejsze jest to, że profilogramy pokazują znaczne zbliżenie kształtu wału do walcowości, ale jednocześnie większą rozbieżność średnic w różnych przekrojach. Za pomocą przyrządu TAYLOR – HOBSON otrzymano profilogramy przekrojów poprzecznych wału o małej sztywności.



Rys. 4.6. Stenogram drgań osi półfabrykatu:
a) bez zastosowania PSH, b) z zastosowaniem układu PSH

Z profilogramów wynika, że odchyłka okrągłości powierzchni obrobionej, z wykorzystaniem układu, zmniejszyła się od 1,3 do 2 razy. Z analizy rejestracji drgań ustalono, że przy zwiększeniu obrotów wrzeczona zwiększa się wychylenie odkształceń (od 0,29 do 0,52 mm). Przy zamocowaniu części w PSH odkształcenia zmniejszają się od 0,03 do 0,06 mm.

Analiza drgań pozwala stwierdzić, że niewyważenie półfabrykatu jest przyczyną powstawania składowej niskiej częstotliwości (czas jednego obrotu $T=0,06 - 1,15$ s), na którą nakładają się drgania wysokiej częstotliwości, przy czym w przypadku zastosowania PSH ich częstotliwość się zwiększa, a wychylenie zmniejsza. Wyższe składowe harmoniczne, w spektrum częstotliwości wrzeciennika, są spowodowane niedokładnością wykonania podpór (w tym przypadku łożysk kulkowych wrzeciennika i PSH). Sztywno zamocowany półfabrykat generuje drgania o niskiej częstotliwości. Spektrum częstotliwości przemieszcza się w strefę wysokiej częstotliwości, proporcjonalnie do wzrostu prędkości obrotowej. Częstotliwość drgań własnych elementów oporowych PSH jest większa (zależy od wymiarów konstrukcyjnych łożysk kulkowych wrzeciennika i PSH), a wychylenie zakłóceń – mniejsze. W czasie obrotu półfabrykatu PSH tłumi zakłócenia, pochodzące od elementów oporowych wrzeciennika w zakresie częstotliwości 100-500 Hz (działają jak tłumik drgań wysokiej częstotliwości półfabrykatu). Bez zastosowania PSH częstotliwości te zbliżone są do wyższych składowych harmonicznych drgań wału i w wyniku tego ulegają zwiększeniu. Jeżeli do przekazania momentu obrotowego zastosować uchwyt z zabierakiem o szczękach samonastawnych, to zakłócenia, pochodzące od wrzeciennika w układzie stabilizacji osi wału, są tłumione. Stosując w rolkach PSH łożyska igiełkowe zamiast kulkowych, praktycznie można osiągnąć odkształcenie osi wałów o małej sztywności, w postaci sinusoidy, co powoduje zwiększenie stabilności procesu skrawania.

Badania w warunkach produkcyjnych ukształtowania osi części o małej sztywności, w procesie toczenia i na biegu jałowym, wykonano na tokarko - gwinciarce PB106. Półfabrykat – wał o średnicy 30 mm i długości 3000 mm z materiału 15NiCr13 był ustawiany w pięciu podtrzymałkach. Skrajne podtrzymałki działały jako podpory sztywne, określając oś obrotu półfabrykatu. Centralne podtrzymałki są przełączane z trybu sztywnych podpór, o współczynniku sztywności statycznej $K = 20 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$, w tryb podpór tłumiących,

o współczynniku sztywności $K = 0,5 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m} \right]$.

Sygnał z czujnika drgań wiroprowadowych typu BENTLEY – NEVADA był podawany przez wzmacniacz do komputera. Przemieszczenia osi półfabrykatu, w trakcie eksperymentu, zapisywano w jego przekroju poprzecznym przy biegu jałowym, a następnie w procesie skrawania.

Eksperymenty wykazały, że największe przemieszczenie osi wału przy toczeniu z układem zmniejszyło się od 4 do 10 razy. Kształt osi półfabrykatu przy skrawaniu był podobny jak na biegu jałowym.

Przy pomiarach na biegu jałowym zanotowano zmiany przemieszczeń drgań półfabrykatu, w tym samym przekroju przy zmianie wariantów kombinacji podpór różnego charakteru (od 0,03 do 0,05 mm). Z obliczeń wynika, że przy zmianie położenia strefy skrawania, przy różnych kombinacjach podpór, przemieszczenia wzdłużne półfabrykatu są inne.

Przy zwiększeniu prędkości obrotowej wrzeciona n od 120 do 400 obr/min amplituda przemieszczeń części w PSH zwiększa się od 0,03 do 0,11 mm. Niewyważenie półfabrykatu w trakcie obrotu określa niskoczęstotliwościową składową drgań (czas jednego obrotu $T=0,06-1,15s$), na którą nakładają się drgania wysokoczęstotliwościowe. Wyższe harmoniki siły zakłócającej są uwarunkowane zmiennym naddatkiem w wyniku błędu kształtu półfabrykatu (owalność, graniastość). Wyższe harmoniki, w spektrum częstotliwości układu wrzecionowego są określane błędem wykonania prowadnic podpór (w danym przypadku łożysk kulkowych wrzeciona i PSH). W trakcie obrotu półfabrykatu PSH tłumią zakłócenia od podpór wrzeciona w zakresie częstotliwości od 100 do 500 Hz. Bez PSH dane częstotliwości są bliskie wyższych harmonik wału i wzrastają.

Jeżeli przy wyborze parametrów skrawania zwykle przyjmuje się prędkości kątowe leżące blisko stref częstotliwości własnych podukładu „półfabrykat – podpory”, to zastosowanie danego urządzenia daje możliwość sterowania częstotliwością własną podukładu, w celu odejścia od strefy rezonansowej stosowania optymalnych prędkości skrawania.

4.3. Sterowanie obróbką wibracyjną wałów o małej sztywności

Obróbkę wibracyjną dokładnych części o małej sztywności przeprowadza się w celu obniżenia poziomu technologicznych naprężeń szczałkowych. Sprzyja to stabilizacji parametrów geometrycznych części w procesie wytwarzania oraz w czasie eksploatacji. Zwiększenie efektywności obróbki wibracyjnej jest związane z bardziej równomiernym przygotowaniem półfabrykatu, wg wymiarów wzdłużnych oraz diagnostyką procesów relaksacyjnych w czasie obróbki [45].

4.3.1. Podwyższenie stabilności wałów o małej sztywności przy obróbce wibracyjnej

Obróbka wibracyjna półfabrykatu może odbywać się nie tylko za pomocą drgań giętnych, ale również z wykorzystaniem drgań wzdlużnych oraz skrętnych. Opracowano stanowiska do obróbki wibracyjnej, wykorzystujące wszystkie rodzaje drgań. Przy tym oddziaływanie na półfabrykat może być realizowane drganiami kompleksowymi.

W wyniku takiego postępowania w materiale półfabrykatu powstają dwie fale odkształceniowe: odkształceń wzdlużnych i stycznych. Z powodu różnych prędkości rozprzestrzeniania się tych odkształceń, przy tej samej częstotliwości oddziaływania, umiejscowienie strzałek i węzłów tych fal jest różne. Dzięki temu obróbka wzdluż osi półfabrykatu przebiega bardziej równomiernie [44]. Generowane są drgania kompleksowe za pomocą przetwornika falowego, wykonanego w postaci pręta z rowkami śrubowymi [146]. Jednym z czoł konwertyor falowy sztywno mocowany jest do półfabrykatu. Na drugie czoło oddziałuje wibrator elektromechaniczny (na przykład bijak młotka pneumatycznego). W wyniku zastosowania rowka śrubowego, przemieszczenie wzdlużne swobodnego końca konwertyora jest przekształcane w kompleksowe wzdlużno – skrętne drgania półfabrykatu.

Na stabilność kształtu i wymiarów części największy wpływ mają osiowe naprężenia szczątkowe, które są eliminowane w czasie obróbki wibracyjnej drganiami giętnymi. Wibrator giętny składa się z silnika elektrycznego, połączonego elastycznym napędem z multiplikatorem, z regulowanymi mimośrodami, które wytwarzają oddziaływanie wymuszające. Jednoczesne zastosowanie wibratorów, działających na półfabrykat drganiami giętnymi oraz kompleksowymi, zmniejsza ogólny stan naprężeń w półfabrykacie.

Sterowanie obróbką wibracyjną może być oparte na wykorzystaniu procesów cieplnych w postaci kanału diagnostycznego.

Proces relaksacji naprężeń jest związany z mikroskopijnymi poślizgami, powstającymi dzięki energii, doprowadzanej w trakcie drgań, zachodzącymi nierównomiernie w objętości półfabrykatu. Energia drgań w materiale półfabrykatu rozprasza się, przekształcając w energię cieplną. Część energii odkształcenia sprężystego przekształca się w energię odkształcenia plastycznego, co powoduje relaksację naprężeń szczątkowych. Im bardziej energia ta jest pochłaniana przez materiał półfabrykatu, tym intensywniej zachodzi proces relaksacji. Mechanizm przekształcenia energii sprężystej w cieplną można objaśnić tarcie wewnętrznym, które jest charakteryzowane współczynnikiem pochłaniania [117]:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (4.14)$$

gdzie: ΔW – energia, rozproszona w jednym okresie drgań w całej objętości próbki;

W – energia wibracji, określana wielkością wartości naprężeń i odkształceń.

Wielkość tarcia wewnętrznego w czasie obróbki wibracyjnej jest określana ze wzoru na drgania skrętne wzdłużne i poprzeczne:

$$Q^{-1} = c \frac{I}{f_0^2 \cdot A}, \quad (4.15)$$

gdzie: c – stała konstrukcji;

I – natężenie prądu w napędzie;

A – amplituda rezonansu odkształceń;

f_0 – częstotliwość rezonansu.

Tarcie wewnętrzne układu liniowego również określone jest zależnością:

$$Q^{-1} = \frac{\Delta f}{f_0 \cdot 2\pi}, \quad (4.16)$$

gdzie Δf połowa szerokości pików rezonansowych.

Na podstawie tych zależności jest przeprowadzana diagnostyka procesu obróbki wibracyjnej, wg zmian natężenia prądu lub zmian szerokości pików rezonansowych oraz jest kontrolowana relaksacja naprężeń, w zależności od zmian tarcia wewnętrznego. Obróbka odbywa się w amplitudowo – zależnej strefie tarcia wewnętrznego, przy zachowaniu warunku zmiany wielkości tarcia wewnętrznego, z upływem czasu (przebiega proces odkształceń mikropłastycznych).

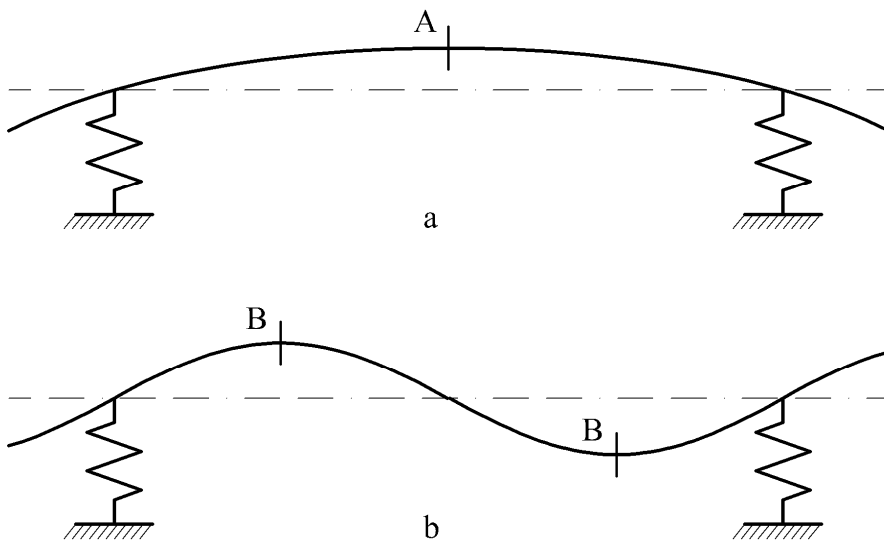
Ważne jest prawidłowe rozmieszczenie operacji obróbki wibracyjnej w procesie technologicznym. Obróbkę wibracyjną przeprowadza się przed operacjami wykańczającymi, metodami odkształcania plastycznego. Warstwa, z wysoką wytrzymałością relaksacyjną, jest kształtowana podobnie jak umocniona warstwa wierzchnia półfabrykatu.

Główny efekt obróbki wibracyjnej zostaje osiągnięty w wyniku doboru częstotliwości rezonansu drgań. Obróbka na wyższych składowych harmonicznych jest bardziej efektywna, ponieważ współczynnik pochłaniania ψ wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości drgań własnych, z którymi wchodzi w rezonans obciążenie wymuszające [66, 70, 152, 153], czyli

$$\psi = \frac{2\pi \cdot \eta}{E} f_n, \quad (4.17)$$

gdzie: ψ – współczynnik pochłaniania,

η – współczynnik ciągliwości materiału.



Rys. 4.7. Miejsca lokalnego nagrzania w czasie obróbki wibracyjnej przez 1 min: a – z częstotliwością 39 Hz, b – z częstotliwością 98 Hz

Mimo że amplituda rezonansu jest mniejsza na wyższych częstotliwościach harmonicznym, to w wyniku obróbki półfabrykatu w kierunku wzdłużnym drgania są rozłożone bardziej równomiernie.

Energia dostarczana jest uwarunkowana parametrami napędu wibratora. Dzięki znanej mocy napędu elektromechanicznego i sprawności multiplikatora jest określona ilość energii drgań doprowadzanej do półfabrykatu. Według temperatury, występującej w przekrojach wału określana jest energia cieplna, powstająca w wyniku mechanizmów tarcia wewnętrznego oraz procesów odkształceń plastycznych.

W czasie obróbki wibracyjnej, przy oddziaływaniu na wał wymuszającej siły harmonicznnej o amplitudzie $F = 400\text{ N}$ i częstotliwości $f = 1, \dots, 120\text{ Hz}$, w czasie jednej minuty nastąpiło lokalne nagrzanie półfabrykatu w miejscach przesunięcia węzłów fali, powodujące wzrost temperatury w stosunku do otoczenia (około 20°C) do 90°C (temperatura maksymalna).

W węzłach przesunięć temperatura wzrosła nieznacznie. Przy obróbce z częstotliwością 39 Hz rozgrzanie wystąpiło w przekroju A (rys. 4.7a).

W trakcie obróbki z częstotliwością 98 Hz rozgrzanie nastąpiło w przekroju B (rys. 4.7b). Po 10 minutach obróbki wibracyjnej temperatura wału wzdłuż jego osi stopniowo wyrównywała się dzięki przewodności cieplnej. Kontrola położenia stref nagrzania umożliwia określenie miejsca relaksacji naprężeń.

4.3.2. Uzasadnienie metody obróbki wibracyjnej wałów o małej sztywności

Proces relaksacji naprężeń jest powiązany z przemieszczeniami mikroskopijnymi wskutek energii dostarczanej przez drgania. Największe naprężenia mechaniczne powstają w strefach maksymalnych odkształceń sprężystych. Relaksacja naprężeń przebiega w nich bardziej intensywnie niż w węzłach drgań. Odkształcenia rozkładają się nierównomiernie wzdłuż półfabrykatu.

Energia drgań w materiale półfabrykatu ulega rozproszeniu, przekształcając się w energię cieplną. Część energii sprężystej odkształceń ulega przekształceniu w energię odkształceń plastycznych i powoduje relaksację naprężeń szczałkowych. Im większa jej ilość jest pochłaniana przez materiał półfabrykatu, tym szybciej przebiega proces relaksacji. Na tych odcinkach proces wydzielania ciepła przebiega intensywniej. Daje to możliwość kontroli procesu obróbki wibracyjnej z uwzględnieniem rozkładu odcinków o różnej intensywności procesów relaksacyjnych, a niekoniecznie integralnie w całej objętości części.

Mechanizm przekształcenia energii sprężystej w cieplną określany jest tarciem wewnętrznym, które charakteryzuje się współczynnikiem pochłaniania ψ [20, 21]:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (4.18)$$

gdzie: ΔW – energia, rozproszona w ciągu jednego okresu drgań w całej objętości próbki,

W – energia drgań, określana wartościami amplitudowymi naprężeń i odkształceń.

Wielkość tarcia wewnętrznego podczas obróbki wibracyjnej może być określona według zależności [20]:

$$Q^{-1} = c \frac{I}{A_0 \cdot f_0^2}, \quad (4.19)$$

gdzie: c – stała;

I – natężenie prądu napędu wibratora;

A_0 – amplituda rezonansowa odkształceń;

f_0 – częstotliwość rezonansowa.

Przy diagnostyce procesu obróbki wibracyjnej na podstawie zmiany natężenia prądu jest kontrolowana relaksacja naprężeń, związana ze zmianą tarcia wewnętrznego.

Diagnostyka temperaturowa procesu umożliwia sterowanie parametrami technologicznymi stanowiska oraz przemieszczenie odcinków o temperaturze maksymalnej (stref przeciwwęzłów). Obróbka jest prowadzona do momentu, kiedy wielkość tarcia wewnętrznego zmienia się w czasie (zachodzi proces odkształceń mikroplastycznych).

Efekt obróbki wibracyjnej można zwiększyć w wyniku zastosowania maksymalnego wychylenia odkształceń na odcinkach rezonansowych.

Obróbka wibracyjna półfabrykatu może być prowadzona przy wykorzystaniu różnorodnych drgań: zginających, wzdłużnych i skręcających. Wykonano stanowisko wibracyjne do obróbki wałów o małej sztywności, umożliwiające wykorzystanie wszystkich postaci drgań. Zastosowano wibrator elektromechaniczny jako najprostszy w sterowaniu i o niewysokich wymaganiach eksploatacyjnych.

Oddziaływanie na półfabrykat jest realizowane poprzez kompleksowe wibracje wzdłużno – skręcające i poprzeczno – skręcające. W wyniku tego, w materiale półfabrykatu, powstają dwie fale odkształceń wzdłużnych i przemieszczeniowych. W związku z różnymi prędkościami rozprzestrzeniania się tych odkształceń, przy tej samej częstotliwości oddziaływania, wynikających z rozmieszczenia przeciwwęzłów i węzłów tych fal, różnią się one wzajemnie.

Generowane są kompleksowe drgania wzdłużno – skręcające, przy pomocy przemiennika falowego, wykonanego w postaci pręta z rowkiem śrubowym [76, 113], który na sztywno zamocowano na półfabrykacie. Działanie wibratora elektromechanicznego i rowka śrubowego przemiennika falowego powoduje, że wzdłużne przemieszczenie czoła, na które działa wibrator, przekształcane jest w kompleksowe wzdłużno – skrętne drgania półfabrykatu.

Wibrator kompleksowych drgań skrętno – giętnych jest mocowany na półfabrykacie w określonym przekroju. Składa się z napędu elektrycznego – silnika o maksymalnej prędkości obrotowej 3000 obr/min, przymocowanego do kołnierza reduktora – multiplikatora, który zwiększa prędkość obrotową wału roboczego do 6000 obr/min. Do wału roboczego przymocowano dwie masy mimośrodowe. Płaszczyzny działania niewyważenia są symetrycznie przesunięte odnośnie do osi wzdłużnej półfabrykatu. W wyniku regulacji, wzajemnego położenia mas mimośrodowych, wytwarzane są momenty zginający i skręcający. Przesunięcie mimośrodu umożliwia uzyskanie siły zakłócającej w szerokim zakresie od 0 do 9000 N. Do silnika podłączony jest blok sterowania, w postaci przetwornika częstotliwościowego, umożliwiający regulowanie częstości obrotowej mimośrodów, a także diagnostykę procesu obróbki wibracyjnej.

Półfabrykat umieszczony jest na podporach podwieszanych, o regulowanej sztywności, na których jest ustawiany sprężystość tak, aby nie mógł się obracać i przemieszczać w kierunku poprzecznym.

Zwiększenie amplitudy drgań, przy wysokich częstotliwościach roboczych, umożliwia zastosowanie dodatkowych mas, zamocowanych sprężysto do półfabrykatu w określonym przekroju.

Regulując wielkość mas dodatkowych i współczynnik sztywności ich powiązania z półfabrykatem, można sterować obróbką wibracyjną w taki sposób, aby węzły i przeciwwęzły przemieszczały się wraz z długością, a intensywność drgań, w każdym przekroju przy tej samej częstotliwości, była jednakowa. Dąży się do tego, aby w każdym przekroju poprzecznym wału przy danej częstotliwości, był rozmieszczony przeciwwęzeł drgań o przykładowo równej amplitudzie.

Przy obróbce partii półfabrykatów, jako dodatkową masę, można zastosować element, podwieszony do półfabrykatu, do którego przymocowano wibrator (do drgań zginających). W wyniku tego, zmniejszeniu ulega czas obróbki, wzrasta wydajność i równomierność procesu obróbki półfabrykatu.

Miejsca rozmieszczenia podpór lub zawieszki należy wybrać z uwzględnieniem parametrów konstrukcyjnych półfabrykatu (długości i średnicy szyjek). Wibrator nie powinien tworzyć przegubów sprężystych, ponieważ w tym przypadku, w wyniku działania ciężaru własnego półfabrykatu i wibratora, powstają naprężenia, które po zsumowaniu się z naprężeniami okresowymi wibratora mogą przekroczyć granicę sprężystości. Przy tym rozkład stanu naprężonego, powstałego w przekroju poprzecznym półfabrykatu, nie jest równomierny z powodu oddziaływania ciężaru półfabrykatu i wibratora. Miejsce umieszczenia wibratora jest uzależnione od częstotliwości roboczej obróbki. Częstotliwość oddziaływania wibracyjnego jest wybierana z uwzględnieniem częstotliwości własnych półfabrykatu. Najbardziej efektywna jest obróbka materiału przy 2 lub 3 harmonice drgań własnych półfabrykatu. Jeżeli specyfika konstrukcyjna półfabrykatu powoduje, że ma on niskie częstotliwości własne, to obróbka wibracyjna może być realizowana na 3 harmonice, ale większość półfabrykatów można obrabiać na 2 harmonice. Umieszczenie wibratora w miejscach przeciwwęzłów umożliwia uzyskanie maksymalnej amplitudy podczas obróbki wibracyjnej, przy której powstają niezbędne naprężenia okresowe, przy minimalnej energochłonności. W tym przypadku na sam wibrator działają znaczne obciążenia dynamiczne. Do przedłużenia czasu eksploatacji urządzenia wibracyjnego celowe jest umieszczanie go w węzłach drgań, lecz intensywność drgań w tym przypadku jest mniejsza. Umieszczenie wibratora w innych miejscach jest mniej efektywne z powodu intensyfikacji fal przemieszczeń poprzecznych i ich wzajemnego gaszenia. Natomiast miejsca podpór należy wybierać w węzłach przemieszczeń.

Częstotliwość oddziaływania zakłócającego jest zmieniana przy pomocy bloku sterowania (przekształtnika częstotliwościowego), w sposób płynny od zera do maksymalnie możliwej wartości.

Obróbka jest wykonywana do momentu zmniejszenia, przy każdej z częstotliwości rezonansowej mocy prądu o 15–20%. Obróbką wibracyjną można sterować według prędkości przemieszczania się szczytu rezonansowego [121], rejestrując ekstremum mocy napędu i prędkość jego zmiany.

Jeżeli moc prądu nie zmniejsza się lub prędkość przemieszczania ekstremum obniża się poniżej ustalonej granicy, to kończy się obróbkę na danej częstotliwości. Zmniejsza się płynnie częstotliwość oddziaływania do zera, rejestrując zmianę częstotliwości własnych, po czym wibrator jest ustawiany w innym przekroju.

Uwzględniając częstotliwość oddziaływania, można stwierdzić, że obróbka przy wyższych częstotliwościach harmoniczných jest bardziej efektywna, ponieważ współczynnik absorpcji ulega zwiększeniu, ze wzrostem częstotliwości harmonicznej własnej, z którą rezonuje obciążenie zakłócające [112]:

$$\psi = \frac{2\pi \cdot \eta}{E} f_n, \quad (4.20)$$

gdzie: η – współczynnik lepkości materiału;

f_n – n -ta częstotliwość harmoniczna.

W przypadku obróbki wibracyjnej przy wyższych harmonikach, rozkład węzłów i przeciwwęzłów wraz z długością półfabrykatu jest częstszy. Wychylenie rezonansowe na wyższych harmonikach ma mniejszą wartość, a więc naprężenia powstające przy odkształceniach będą mniejsze. Jednak w tym przypadku wzrasta współczynnik pochłaniania, co powoduje, że obróbka półfabrykatu jest bardziej równomierna. W celu uzyskania rezonansu przy wyższych harmonikach, należy zastosować wibrator wysokoobrotowy. Niewyważenie, niezbędne do zwiększenia amplitudy drgań, ograniczone jest przyczynami konstrukcyjnymi (obciążenia łożysk, ograniczona moc napędu), co oznacza, że aby uzyskać maksymalną relaksację naprężeń szczątkowych, należy optymalizować przy obróbce wibracyjnej stosunek amplitudy i częstotliwości.

Efektywność obróbki wibracyjnej zależy od wartości i miejsca przyłożenia siły wymuszającej, kształtu geometrycznego części, częstotliwości i kształtu drgań roboczych. Metodą parametrów początkowych przeprowadzono badanie wpływu podpór dodatkowych i mas dodatkowych, zamocowanych sprężystość na półfabrykacie oraz ich rozmieszczenia, a także częstości oddziaływania na położenie stref przeciwwęzłów i węzłów drgań giętnych, jako maksymalnie wpływających na relaksację naprężeń.

Przy sterowaniu z zastosowaniem macierzy, wiążącym przekroje graniczne, przyjęto podpory sprzężyste [66]:

$$\begin{pmatrix} y_n \\ \varphi_n \cdot l \\ \frac{M_n \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{F_n \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ \varphi_0 \cdot l \\ \frac{M_0 \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{F_0 \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}, \quad (4.21)$$

gdzie:

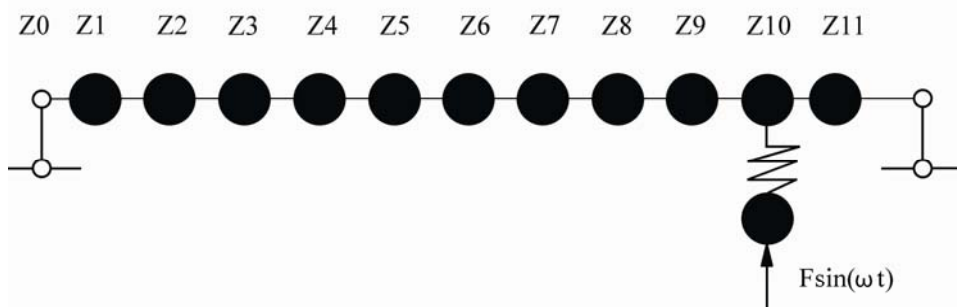
EJ – wytrzymałość na zginanie odcinka wału;

l – długość wału;

y_n , φ_n , F_n i M_n – przemieszczenie poprzeczne, kąt obrotu, siła poprzeczna i moment zginający w n przekroju;

y_0 , F_0 – siła poprzeczna i moment zginający w 0 przekroju

a_{jk} – współczynniki macierzy.



Rys. 4.8. Schemat obliczeniowy obróbki wibracyjnej

Wibrator, oddziałujący siłą zmienną na półfabrykat, jest przyjmowany jako masa sprężystość podwieszona do wału (rys. 4.8). Współczynnik sztywności powiązania masy i wału jest określany wielkością zaciśnięcia mechanizmu mocującego i jego specyfiką konstrukcyjną. Amplituda siły jest określana wielkością niewyważenia masy mimośrodowej.

W przypadku odcinka pręta z dwiema masami skupionymi: jedna zamocowana na sztywno, a druga sprężysto, na który oddziałuje skupiona siła harmoniczna, zależność między parametrami w przekrojach i i $i-1$ ma postać:

$$Y_i = J_i Y_{i-1} + \Lambda_i, \quad (4.22)$$

przy czym:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{A_i \cdot c_i \cdot l^3}{EJ(-m_i \cdot f^2 + c_i)} \end{pmatrix}, \quad (4.23)$$

gdzie: A_i – amplituda siły harmoniczej zmieniająca się z częstotliwością f ;

m_i – masa, zamocowana sprężysto na wale, do której przyłożona jest siła harmoniczna;

c_i – współczynnik sztywności zamocowania sprężystego:

$$J_i = \begin{pmatrix} 1 & h_i & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} & \frac{h_i^3}{6 \cdot u_i} \\ 0 & 1 & \frac{h_i}{u_i} & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ \tau_i & \tau_i \cdot h_i & \frac{\tau_i \cdot h_i^2}{2 \cdot u_i} & 1 + \frac{\tau_i \cdot u_i^3}{6 \cdot u_i} \end{pmatrix}, \quad (4.24)$$

gdzie: $h_i = \frac{l_i}{l}$, gdzie l_i – długość i -go odcinka,

l – długość całej części;

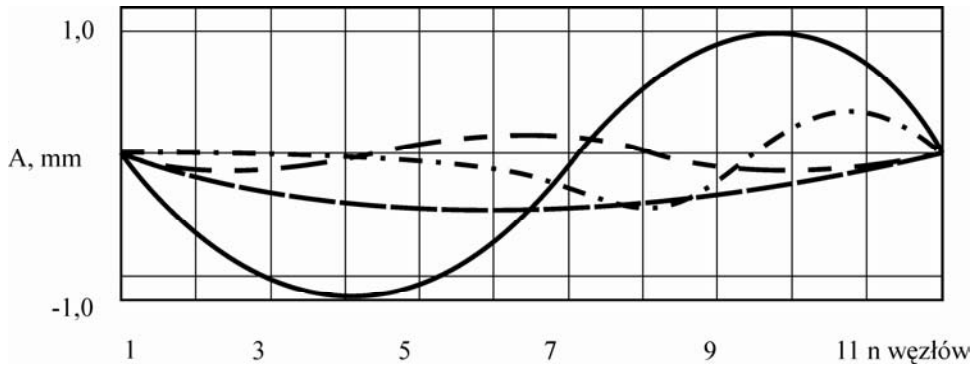
$u_i = \frac{EJ_i}{EJ}$, gdzie EJ_i – odporność na zginanie i -go odcinka;

$$\tau = \frac{m_i^* \omega^2 l^3}{EJ} + \frac{c_i m_i \omega^2 l^3}{EJ(c_i - m_i \omega^2)},$$

gdzie m_i^* – masa na sztywno zamocowana na wale.

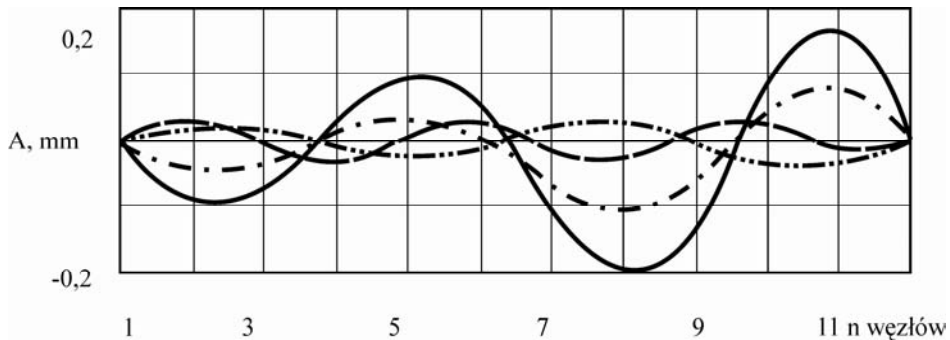
Algorytm, w którym zastosowano metodę parametrów początkowych, w postaci macierzowej, w przypadku różnych schematów ustawienia półfabrykatu i parametrów obciążenia, umożliwia określenie ugięć osi półfabrykatu.

Metodą parametrów początkowych uzyskano ugięcia osi półfabrykatu przy różnych parametrach technologicznych obróbki wibracyjnej [21], przedstawione na rys. 4.9 i 4.10.



Rys. 4.9. Ugięcia osi półfabrykatu przy różnych warunkach obróbki (częstości):

- a) drgania o częstości $\omega = 2 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, siła zakłócająca $F=10 \text{ N}$, $m=5\text{kg}$, sztywność powiązania $k=100000 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$, węzeł rozmieszczenia wibratora - Z10 (----); b) $\omega = 5 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, $F=10\text{N}$, $m=5\text{kg}$, $k=100000 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$, Z10 (—); c) $\omega = 5 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, $F=100\text{N}$, $m=5\text{kg}$, $k=1000 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$, Z6 (— · — · —); d) $\omega = 15 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, $F=100 \text{ N}$, $m=5 \text{ kg}$, $k=100000 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$, Z10 (— · — · —)



Rys. 4.10. Ugięcia osi półfabrykatu przy różnych warunków obróbki (położenia

- wibratora i zastosowania mas dodatkowych): e) $\omega = 25 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, $F=100\text{N}$, $m=5 \text{ kg}$, $k=100000 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$, Z10, węzeł zamocowania dodatkowej masy Z5 (---); f) $\omega = 25 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, $F=100\text{N}$, $m=5\text{kg}$, $k=100000 \text{ N/m}$, Z10 (— · — · —);

- g) $\omega = 25 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$, $F=100\text{N}$, $m=8\text{kg}$, $k=100 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$, Z6, węzły zamocowania mas dodatkowych Z3, Z10 (— · — · —);
- h) $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$, $F=100\text{ N}$, $m=25\text{kg}$, $k=1000 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$, Z6; węzeł zamocowania masy dodatkowej Z4 (—)

W wyniku zmiany częstotliwości oddziaływania, przemieszczenia wibratora, wzdłuż półfabrykatu i zastosowania mas dodatkowych, można uzyskać przesunięcie stref przeciwwęzłów. Do uzyskania równomierności obróbki materiału wału w przekroju poprzecznym należy obracać półfabrykat wokół jego osi wzdłużnej.

4.3.3. Sposób obróbki wibracyjnej wałów długowymiarowych

Zwiększenie efektywności obróbki długowymiarowych wałów osiowosymetrycznych jest związane ze stabilizacją ich parametrów geometrycznych.

Uzyskanie stabilności wymiarowej wałów długowymiarowych, o małej sztywności o stosunku długości do średnicy powyżej 10, nie jest możliwe bez wyrównywania w przekrojach i zmniejszenia wartości naprężeń wewnętrznych, które są określane przez naprężenia początkowe i naprężenia szczątkowe technologiczne. Szczególnie jest to aktualne w odniesieniu do klasy stali nierdzewnych, w których naprężenia szczątkowe, z powodu temperatury i czynników siłowych przy wytwarzaniu, ulegają sumowaniu z naprężeniami szczątkowymi, pochodzącymi od przekształceń strukturalnych.

Znane są metody cieplne obniżenia naprężeń szczątkowych (wyżarzanie, odpuszczanie, starzenie sztuczne), które jednak są dosyć kosztowne oraz energochłonne. Obróbka wibracyjna charakteryzuje się natomiast niewielką energochłonnością, prostotą i ekonomicznością.

Proces obróbki wibracyjnej polega na nałożeniu obciążeń zmiennych, według znaku o określonej amplitudzie, częstotliwości i postaci drgań. Efektywność i równomierność obróbki wibracyjnej wzdłuż półfabrykatu można zwiększyć, w wyniku diagnostyki i sterowania procesami relaksacyjnymi, w procesie drgań, z uwzględnieniem parametrów technologicznych, nie tylko częstotliwości i amplitudy obciążenia harmonicznego, lecz również rozmieszczenia wzdłuż wału podpór i wibratora, zastosowania mas dodatkowych ze sterowanymi współczynnikami sztywności oraz ich powiązań z półfabrykatem.

Przejęcie struktury metalu w stan równowagi zachodzi przy zwiększaniu się jej energii ogólnej, w wyniku dostarczonej części energii, w postaci cieplnej lub mechanicznej.

Przy tym należy rozpatrywać zmianę naprężeń szczątkowych pierwszego rzędu, określających geometrię wału, od których ona zależy.

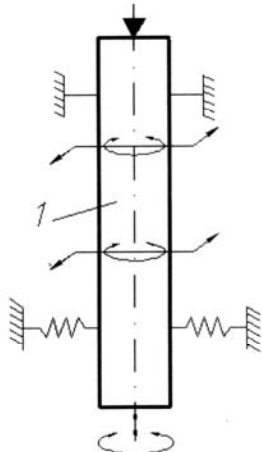
Przy zsumowaniu naprężeń szczątkowych od obciążenia cyklicznego, w przypadku przewyższenia przez ich sumę granicy proporcjonalności w wyniku odkształceń mikroplastycznych, naprężenia szczątkowe ulegają zmniejszeniu. Granica proporcjonalności przy obciążeniach cyklicznych jest niższa o 20%, niż przy statycznych z powodu efektu Bauschingera.

Są sposoby obróbki wibracyjnej części bez usuwania lub wyrównywania naprężeń szczątkowych w częściach różnego typu.

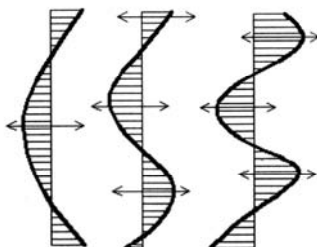
Na przykład sposób usuwania naprężeń w elementach metalowych, polegający na wstępnym ich obciążeniu masą skupioną o wielkości od 0,03 do 0,5 wielkości masy części obrabianej a następnie poddaniu jej drganiom przy częstotliwości rezonansowej [121]. Wadą tego sposobu obróbki wibracyjnej jest możliwość jego zastosowania tylko do obróbki wałów długościowych, o małej sztywności, z powodu dużych ugięć, pod wpływem działania masy skupionej. W innym rozwiązaniu technicznym obciążenie wibracyjne wału momentami skręcającymi jest przykładane mimośrodowo względem osi wzdłużnej, przy czym w różnych przekrojach nie muszą one być takie same [85, 107]. W tym przypadku obróbka wału realizowana jest tylko w wyniku drgań skrętnych o takiej samej częstotliwości, co ogranicza jej efektywność.

Dlatego w tym sposobie obróbki wibracyjnej, wał jest ustawiany w przyrządzie specjalnym pionowo i obciążany momentami zginającymi oraz skręcającymi, przykładanymi mimośrodowo odnośnie do jego osi. Wytwarzane jest wstępne obciążenie statyczne, o określonej wartości w podporach, przykładane są drgania zginające i skręcające o częstotliwościach rezonansowych w przekrojach poprzecznych wału, w których znajdują się strefy przeciwwęzłów, określonych częstotliwości drgań, przy tym do jednego wału przykładane są dodatkowo drgania skręcające wzdłużne. Częstotliwość drgań, przykładanych w przekrojach poprzecznych wału, może być równa lub krotna częstotliwości trzech niższych harmonik, w miejscach węzłów przemieszczeń innych harmonik. Rozmieszczenie stref przeciwwęzłów wzdłuż wału można zmieniać w warunkach przyłożenia obciążenia statycznego.

Schemat obciążenia półfabrykatu wału długowymiarowego przedstawiono na rys. 4.11, a wykresy naprężeń na rys. 4.12.



Rys. 4.11. Schemat obciążenia półfabrykatu wału długowymiarowego



Rys. 4.12. Wykresy naprężeń

Obróbka wibracyjna wałów długowymiarowych o małej sztywności przebiega w sposób następujący. Półfabrykat wału długowymiarowego 1 (rys.4.11) przed obróbką jest wstępnie obciążany siłą wzdłużną, w celu wytworzenia określonej sztywności układu i odpowiednio częstotliwości własnej. W przekrojach wału 1, odpowiadającym strefom przeciwwęzłów, generowane są z określoną częstotliwością i amplitudą momenty skręcające i zginające (rys. 4.12). Proces relaksacji ulega intensyfikacji, w wyniku różnych częstotliwości obróbki wibracyjnej, postaci drgań oraz ich maksymalnych amplitud na różnych częstotliwościach rezonansowych. W rezultacie zmiany sztywności układu, drogą regulacji docisku osiowego, obróbka może być wykonywana przy różnych częstotliwościach rezonansowych z przesunięciem odpowiednio stref przeciwwęzłów wzdłuż półfabrykatu wału 1. Naprężenia cykliczne są sumowane z wewnętrznymi naprężeniami szczątkowymi, co prowadzi do przekroczenia granicy plastyczności materiału półfabrykatu. Powoduje to zarówno odkształcenie mikroplastyczne (przesunięcia dyslokacji, przesunięcie atomów w węzłach siatki krystalicznej), jak i odkształcenie makroplastyczne (ruch niektórych bloków materiału). Przy tym struktura metalu przechodzi w stan równowagi.

Pionowe ustawienie wału zwiększa dokładność, ponieważ wał nie ulega ugięciu pod wpływem ciężaru własnego. Wstępne obciążenie statyczne wału stabilizuje parametry obróbki wibracyjnej w wyniku uzyskania stałej sztywności układu. Umieszczenie wału na podporach zapewnia określoną orientację, względem oscylatorów, bez zmiany sztywności układu w procesie obróbki wibracyjnej.

Drgania giętne stabilizują strukturę półfabrykatu w wyniku przemieszczeń poprzecznych, poprzez zmniejszenie osiowych naprężeń szczątkowych. Obciążenie wału drganiami skrętnymi analogicznie do giętnych umożliwia zmniejszenie stycznych naprężeń szczątkowych, przy tym oddziaływanie kompleksowe drgań giętnych i skrętnych na półfabrykat umożliwia maksymalnie efektywną obróbkę materiału półfabrykatu we wszystkich przekrojach. Drgania giętne i skrętne w przekrojach poprzecznych wału, w których znajdują się strefy przeciwwęzłów o określonych częstotliwościach drgań, umożliwiają zwiększenie równomierności obróbki wzdłuż półfabrykatu w wyniku jednakowej ich amplitudy we wszystkich przekrojach.

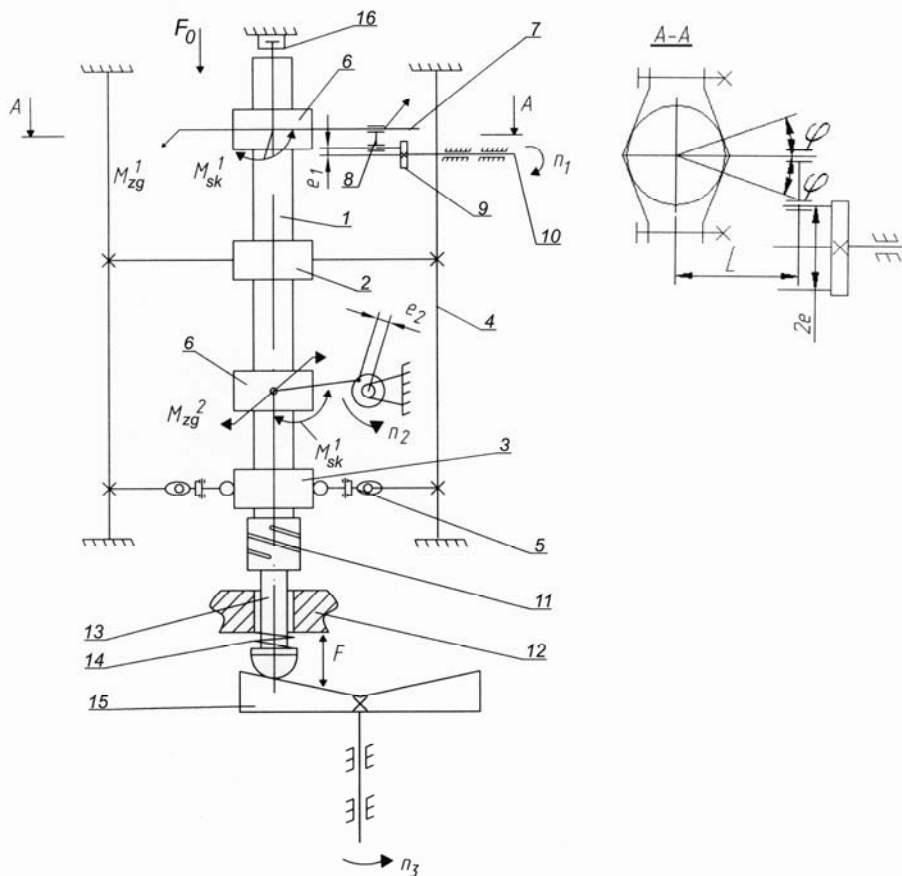
Przy częstotliwościach rezonansowych można uzyskać w trakcie obróbki maksymalne odkształcenia przy minimalnej energii. Przyłożenie drgań do czoła wału upraszcza konstrukcję mechanizmu wzbudzania drgań, w wyniku rozdzielenia mechanizmów wzbudzania różnych rodzajów drgań. Drgania skrętne wzdłużne oddziałują na półfabrykat wału w bardziej równomierny sposób w wyniku zróżnicowanego rozmieszczenia przeciwwęzłów i składowych drgań wzdłużnej oraz skręcającej. Przyłożenie drgań o takiej samej częstotliwości intensyfikuje proces relaksacji naprężeń w wyniku kompensacji tłumienia drgań wzdłuż wału.

Przyłożenie drgań w przekrojach, w których znajdują się strefy przeciwwęzłów drgań, zmniejsza energochłonność procesu obróbki wibracyjnej w wyniku wyeliminowania interferencji. Obciążenia o różnej częstotliwości umożliwią bardziej równomierną obróbkę wzdłuż wału, w wyniku różnorodnego rozkładu przeciwwęzłów o różnych harmonikach. Częstotliwości drgań, będące wielokrotnością jednej z częstotliwości trzech najniższych harmonik, umożliwiają obróbkę rezonansową przy minimalnej energii bez komplikowania konstrukcji wibratora.

Obciążenie w węzłach przemieszczenia innych harmonik powoduje większą równomierność właściwości półfabrykatu wału, w wyniku wytworzenia odkształceń na wszystkich jego odcinkach. Zmiana rozmieszczenia przeciwwęzłów wzdłuż wału umożliwia jego równomierną obróbkę, poprzez jednakowe odkształcenia cykliczne we wszystkich przekrojach. Przyłożenie obciążenia statycznego zmienia sztywność układu, co prowadzi do zmiany jego częstotliwości rezonansowej.

4.3.4. Urządzenie do obróbki wibracyjnej wałów długowymiarowych o małej sztywności

Urządzenie do obróbki wibracyjnej wałów długowymiarowych o małej sztywności (rys. 4.13) zawiera sztywne podpory 2 i inne podpory 3, umiejscowione w prowadnicach 4.



Rys. 4.13. Widok ogólny urządzenia do obróbki wibracyjnej wałów długowymiarowych

Podpory sztywne 2 są zamocowane na stałe, a podpory sprężyste 3, przez wał przegubowy 5, są powiązane sprężystością z prowadnicami 4. Na wale 1 zamocowane są pryzmy 6, w które wstawione są trzpienie 7, przez korbowody 8, połączone z mechanizmem korbowym 9, ustalonym na wale napędowym 10. Trzpienie 7, w pryzmach 6 są ustawione w kierunkach prostopadłych. Na dolnym końcu wału 1 jest umieszczony przetwornik sprężysty 11, który opiera się o płytkę 12. Przetwornik sprężysty 11 jest dociskany śrubą 13, która przez

sprężynę 14 jest odciągana do tarczy kształtowej 15. Od góry wał 1 jest obciążany dociskiem hydraulicznym 16. Urządzenie działa w następujący sposób.

Docisk hydrauliczny 16 generuje w półfabrykacie obciążenie wstępne F_0 , w celu wytworzenia określonej sztywności układu. Wał 1 jest na sztywno zamocowany w podporach ślizgowych 2 (w przypadku stosunku długości do średnicy $L/d \geq 12$ takich podpór powinno być kilka), w węzłach przemieszczeń. Do zachowania stabilności wału 1, przy obróbce jest on dodatkowo mocowany przy pomocy podpór sprężystych 3, które mają możliwość: przemieszczania się w kierunku wzdłużnym i obrotu względem osi wału 1. Na zamocowane w określonych przekrojach poprzecznych wału 1, pryzmy 6, poprzez korbówód 8, od mechanizmu korbowodowego 9, są przekazywane momenty zginający M_g i skręcający M_s , powodujące ugięcia wału oraz jego skręcanie z częstością równą prędkości obrotowej n_1 wału napędowego 10. Amplituda drgań: – giętych jest określana poprzez regulację mimośrodów e_1 korbowodu, względem osi obrotu, – skręcających w wyniku zmiany długości L ramienia przemieszczenia korbowodu 7.

Przy zastosowaniu kilku pryzm 6, rozmieszczonych wzdłuż wału 1, z umieszczonymi w nich pionowo trzpieniami 7, obróbka drganiami giętymi jest realizowana w dwóch płaszczyznach. Zmieniając amplitudę przemieszczeń poprzecznych, można obrabiać wał we wszystkich płaszczyznach wzdłużnych. W wyniku różnorodnych częstości obrotowych mechanizmów korbowodowych 9 wał 1 jest obrabiany przy różnorodnych harmonikach. Obroty tarczy kształtowej 15 oddziałują na bijak 13, ślizgający się po występach tarczy kształtowej 15, prowadząc do przemieszczeń wzdłużnych czoła przetwornika sprężystego 11, który przekształca je w drgania skrętno – wzdłużne na czole wału 1. Pryzmy 6 są przesuwane wzdłuż półfabrykatu wału 1 i rozmieszczane w strefach przeciwwęzłów odpowiednich częstotliwości.

Przyłożenie obciążenia poprzez element sprężysty umożliwia wytworzenie kompleksowych drgań skrętno – wzdłużnych.

Podpory umożliwiają przeprowadzenie obróbki wibracyjnej w położeniu pionowym; półfabrykat wału jest orientowany względem mechanizmu wzbudzania ruchu drgającego. Podpory sztywne umożliwiają ustalenie półfabrykatu, w określonych przekrojach i jego kompleksowe obciążenie wibracyjne, a podpory sprężyste – stabilizację procesu obróbki wibracyjnej w wyniku orientacji osi półfabrykatu wzdłuż prowadnic, bez tłumienia wszystkich rodzajów drgań roboczych. Podpory sprężyste są ustawiane tak, że jest możliwość obrotu poprzecznego osi półfabrykatu i przemieszczeń skrętnych, a także przemieszczeń wzdłuż osi, co umożliwia ustawianie półfabrykatu przy kompleksowym obciążeniu wibracyjnym.

Węzeł obciążenia rozszerza możliwości technologiczne urządzenia, poprzez zmianę częstotliwości własnych układu, pryzmy zwiększają natomiast uniwersalność urządzenia, ponieważ umożliwiają zamocowanie półfabrykatów o różnych średnicach.

Mechanizm korbowodowy umożliwia wzbudzenie drgań giętnych w dowolnym przekroju wału z wymaganą częstotliwością i amplitudą. Mechanizm korbowodowo – dźwigniowy przekazywania wibracji generuje drgania giętno – skrętne, w wyniku mimośrodowego przyłożenia siły poprzecznej. Korbowód jest ustawiony tak, że ma możliwość przemieszczania się wzdłuż dźwigni, co rozszerza możliwości technologiczne urządzenia, dając możliwość regulowania amplitudy drgań skręcających.

Zamocowanie na czole półfabrykatu przetwornika sprężystego zwiększa prędkości relaksacji umożliwiając kompleksową obróbkę przy zastosowaniu drgań skrętno – wzdłużnych. Wibrator elektromechaniczny powoduje, że urządzenie jest ekologiczne, niezawodne i prostsze w eksploatacji.

4.4. Technologiczna dziedziczność przy obróbce wałów i zalecana kolejność operacji

Badania technologii obróbki części typu „wał” pokazują złożony charakter ich odkształceń, we wszystkich fazach procesu technologicznego [12, 30, 31, 160]. W związku z tym charakter rozkładu naprężeń, i powstających przy tym odkształceń, należy rozpatrywać z uwzględnieniem dziedziczności technologicznej od poprzednich operacji. Mechanizm odkształcenia części typu wał najbardziej poglądowo można zilustrować za pomocą modelowania prawidłowości dziedziczności z zastosowaniem teorii grafów [85, 112].

4.4.1. Modelowanie prawidłowości dziedziczenia z zastosowaniem teorii grafów

Zastosowanie grafu zorientowanego daje możliwość przedstawienia kolejności obróbki wałów i charakteru wzajemnego związku badanych parametrów, na kluczowych etapach obróbki. Schemat stanu naprężeniowo – odkształceniowego wału na kluczowych etapach obróbki przedstawiono na rys 4.14. Przekazanie właściwości w kierunku od σ_i do y_i oznaczono przez P , odwrotny związek przez Q . Właściwości początkowe półfabrykatu oznaczone są przez A . Naprężenia i odkształcenia początkowe początkowo są oznaczone odpowiednio jako σ_0 i y_0 . Właściwości końcowe gotowej części przez B i odpowiednio naprężenia σ_n i odkształcenia y_n .

Naprężenia szczątkowe na i-tym etapie są określone zależnością: [51, 78]

$$\sigma_i = \sigma_0 - K\rho^2, \quad (4.25)$$

a odkształcenia jako:
$$y_i = \frac{\sigma_0 a L^2}{2R^2 E}. \quad (4.26)$$

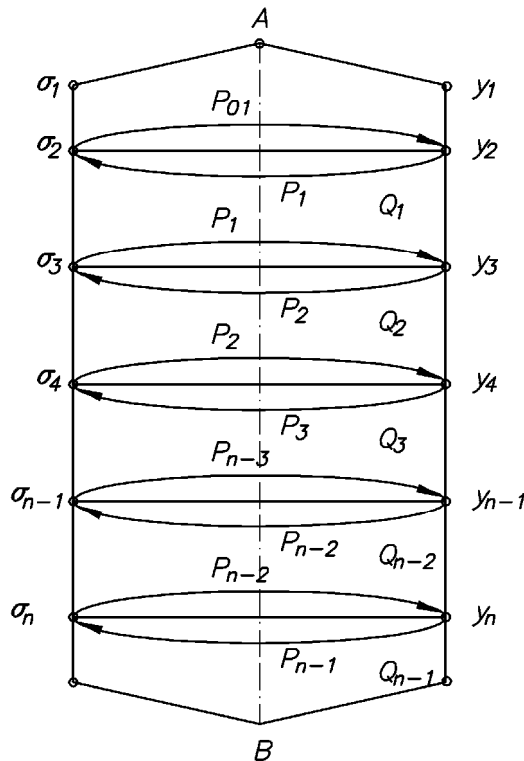
Po wykonaniu każdej operacji, w wyniku usunięcia nierównomiernego nadatku i rozkładu początkowych naprężeń szczątkowych, pojawiają się odkształcenia szczątkowe, odzwierciedlone na rysunku związkami $P_1, P_2, \dots, P_n$. W konsekwencji odkształcenia wału powodują zmianę naprężeń wypadkowych: pozostających po poprzednich operacjach i po usunięciu nadatku w bieżącej operacji:

$$\sigma_{wyp} = \sigma_{i-1} \pm \sigma_i. \quad (4.27)$$

W przypadku odkształceń:

$$y_{wyp} = Ky_{i-1} \pm y_i, \quad (4.28)$$

gdzie K – współczynnik zmniejszenia błędu.



Rys. 4.14. Graf – schemat obróbki wału

Zgodnie z właściwościami grafu zorientowanego, zależność liniową układu równań, w kolejnych operacjach określa się równaniami:

$$\begin{aligned} y_2 &= C_1 y_1, \\ y_3 &= C_2 y_2 = C_1 C_2 y_1, \\ y_4 &= C_1 C_2 C_3 y_1, \\ y_i &= C_1 C_2 C_3 \dots C_{i-1} y_1, \end{aligned} \quad (4.29)$$

gdzie $C_1, C_2, C_3 \dots C_{i-1}$ – współczynniki odkształceń na różnych etapach obróbki.

W przypadku operacji obróbki mechanicznej, współczynniki dziedziczności są określane w wyniku obliczeń [69, 71]. Na przykład z (4.29) przy uwzględnieniu wyrażenia (4.26), otrzymano:

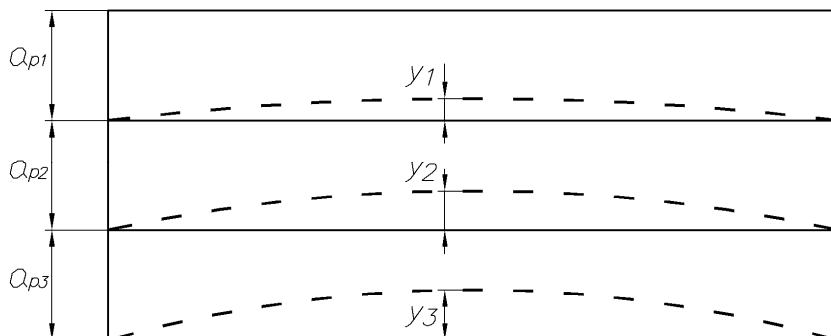
$$C_1 = \frac{y_2}{y_1} = \frac{\sigma_2 R_1^2}{\sigma_1 R_2^2}, \quad (4.30)$$

i odpowiednio:

$$C_i = \frac{y_{i+1}}{y_i} = \frac{\sigma_{i+1} R_i^2}{\sigma_i R_{i+1}^2}. \quad (4.31)$$

Współczynniki dziedziczenia w wyrażeniach (4.30) i (4.31) precyzują błąd, powstały w poprzednich operacjach.

Współczynniki te na różnych etapach procesu technologicznego mogą być większe lub mniejsze od jedności. Na przykład przy wieloprześciowej obróbce (operacje tokarskie lub szlifierskie) wałów, o małej sztywności, współczynnik poprawkowy z reguły jest mniejszy od jedności.



Rys. 4.15. Schemat narastania niedokładności obróbki w kolejnych przejściach

Schemat powstawania niedokładności w czasie obróbki wieloprzejściowej pokazano na rys. 4.15. Po pierwszym przejściu, z powodu odkształceń sprężystych półfabrykatu, naddatek rzeczywisty jest mniejszy od założonego o wielkość ε_1 . W drugim przejściu wielkość odkształcenia sprężystego wzrasta. W wyniku usunięcia nadmiaru w drugim przejściu, błąd kształtu ε_2 przewyższa ε_1 . W następnych przejściach następuje dalsze zwiększenie błędu początkowego. W czasie obróbki wałów względnie sztywnych, współczynnik zmniejszenia błędu początkowego po i -tym przejściu jest określany zależnością [68]:

$$K_i = \frac{(C_{F_p} \cdot f^{y_n} \cdot HB^n)^i}{J_c^2}, \quad (4.32)$$

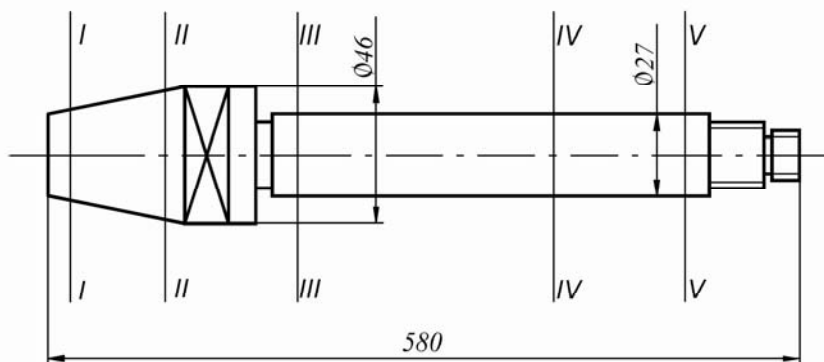
gdzie:

- C_{F_p} – stały współczynnik przy określonych warunkach obróbki;
- f – posuw w i -tym przejściu,
- y_n – wskaźnik potęgi przy posuwie,
- HB – twardość materiału półfabrykatu,
- J_c – sztywność układu technologicznego.

Rozwiązanie zagadnienia opisanego wyrażeniem (4.31), po podstawieniu w miejsce współczynników $C_1, C_2, C_3 \dots C_{i-1}$ ich wartości, okazuje się dosyć pracochłonne w związku z dużą liczbą zmiennych i równań. Rozwiązuje się je metodą programowania liniowego. Procedura obliczeniowa składa się z kilku następujących po sobie kroków [45, 47, 48].

4.4.2. Przykład wpływu dziedziczności technologicznej w czasie wytwarzania części precyzyjnych

Dziedziczność technologiczna szczególnie widoczna jest w czasie wytwarzania części precyzyjnych. Jako przykład jej wpływu rozpatrzono technologię wytwarzania opravek o podwyższonej niezawodności technologicznej z materiału X19NiCrMo4, w przypadku frezarek do nacinania uzębienia w produkcji seryjnej, w zakładach produkujących obrabiarki – rys. 4.16.



Rys. 4.16. Przekroje, w których wykonano pomiary odchyłek oprawek

Wymagania stawiane oprawkom, względem osi kłków są następujące: odchylenie zewnętrznej powierzchni oprawki – 0,015 mm; odchylenie bazowej powierzchni czołowej – 0,005 mm; pochylenie stożka – 0,006 mm; odchylenie od prostopadłości – 0,075 mm; odchylenie od okrągłości – 0,006 mm; odchylenie od prostoliniowości – 0,004 mm. Istniejące procesy technologiczne obróbki oprawek zawierają operacje: wyżarzania izotermicznego; planowania czoła odkuwek a następnie nakiełkowania, przy czym nakiełki są wykonywane po znakowaniu na roztaczarkach poziomych; zgrubnej obróbki tokarskiej wykonywanej przy zamocowaniu w uchwycie z podparciem tylnym kłmem; obróbki cieplnej – wysokie odpuszczanie z późniejszym prostowaniem; obróbki kształtującej tokarskiej i frezarskiej z nadładkiem na obróbkę cieplną; nawęglania na głębokość 1,2 – 1,5 mm z późniejszym prostowaniem; powtórnego poprawiania nakiełków i obróbki powierzchni niepodlegających hartowaniu; obróbki cieplnej – hartowanie z następnym odpuszczaniem do twardości HRC 59 – 63; prostowania oprawek; poprawy nakiełków na tokarce; szlifowania powierzchni obrotowych z pośrednimi operacjami starzenia termicznego. Po każdym starzeniu dokonywane jest docieranie nakiełków.

Pomimo tak złożonej technologii, która zawiera do 45 operacji, jakość wytwarzanych oprawek nie odpowiada stawianym wymaganiom. W celu określenia czynników, wpływających na końcową dokładność obróbki, przeprowadzono badania rzeczywistej dokładności w całym procesie technologicznym.

Podstawowym czynnikiem, określającym dokładność położenia, jest odchylenie powierzchni względem osi, a więc podstawowe badania polegały na pomiarze odchylenia powierzchni zewnętrznej oprawki względem osi kłków, po każdej operacji, a także na pomiarze dna rowka wpustowego. W sumie przebadano ponad 90 oprawek.

Pomiary przeprowadzono w warunkach produkcyjnych, po ustawieniu elementu w kłach tokarki, za pomocą mikrometrów z dokładnością do 0,001 mm, w przekrojach, pokazanych na rys. 4.16. Każdą oprawkę analizowano oddzielnie i w przypadku każdej sporządzano tabelę błędów. Odchyłki od prostoliniowości powierzchni zewnętrznych, po obróbce rowka wpustowego, zapisywano w tabelach. Położenie dna rowka wpustowego określano za pomocą głębokościomierzy. Pomiar parametrów dokonywano po obróbce, a także po 2–3 dobach. Po każdej operacji, wykonywano pomiary tych samych parametrów, notowano oprzyrządowanie, narzędzia, naddatek, bazy technologiczne, parametry obróbki. Procesy technologiczne obróbki części typu „wał” zaczynają się od operacji toczenia powierzchni czołowych i nakiełkowania półfabrykatu. W zależności od rodzaju produkcji są realizowane na specjalnych frezarko–nakiełczarkach, poziomych roztaczarkach lub na zwykłych tokarkach.

Jak wykazały badania eksperymentalne, błąd osi nakiełków półfabrykatów, przy obróbce na frezarko–nakiełczarkach mieści się w przedziale 0,2–0,8 mm, w przypadku wyrobów walcowanych i 1,2–3 mm – w przypadku odkuwek. Błąd nakiełkowania na roztaczarkach poziomych wynosił: przy półfabrykatach walcowanych 1,2–2 mm, a przy odkuwkach – 2,8–6 mm. Odpowiednio na tokarkach, w przypadku półfabrykatów walcowanych, wynosił 0,3–1,4 mm, a odkuwek – 2,5–4,7 mm. Przeciętny błąd nakiełkowania oprawek zawierał się w przedziale 2–2,5 mm.

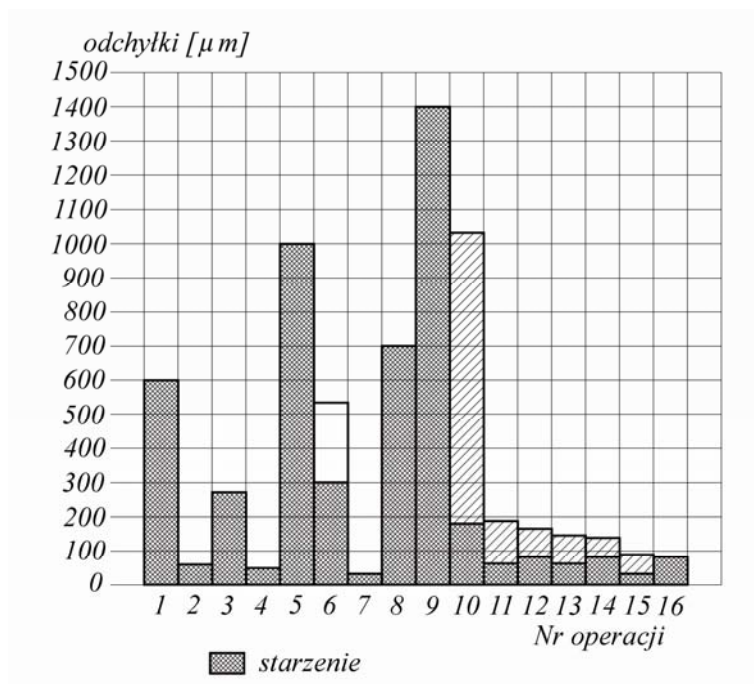
Po każdej operacji określano maksymalne odkształcenie każdej oprawki. Najczęściej występowało ono w przekroju IV–IV. Wyniki pomiarów wykazały, że odchyłki wymiarów serii oprawek w poszczególnych operacjach są niestabilne. Zgodnie z numerami operacji i ich nazwami z tab.4.1. opracowano wykresy, przedstawiające rozkład odchyłek bicia promieniowego na podstawowych operacjach.

Tab. 4.1. Bicie promieniowe oprawek po operacjach

Nr operacji	Nazwa operacji	Zakres odchyłek
1.	Kucie	0,6 – 0,7
2.	Tokarska zgrubna	0,05 – 0,4
3.	Wysokie odpuszczanie	0,25 – 0,6
4.	Tokarska	0,03 – 0,1
5.	Nawęglanie	1,4 – 2,6
6.	Prostowanie	0,3 – 2,1
7.	Tokarska	0,002 – 0,05
8.	Frezerska	0,6 – 2,0
9.	Hartowanie	1,8 – 6,0
10.	Prostowanie	0,3 – 2,2

Tab. 4.1. c.d.

11.	Szlifowanie powierzchni obrotowych	0,04 – 0,06
12.	Ciepłna i I starzenie	0,1 – 0,15
13.	Szlifowanie powierzchni obrotowych	0,03 – 0,05
14.	Ciepłna i II starzenie	0,06 – 0,015
15.	Szlifowanie powierzchni obrotowych	0,001 – 0,005
16.	Po dwóch dobach	0,04 – 0,15



Rys. 4.17. Ogólny charakter rozkładu odchyłek bicia promieniowego na operacjach podstawowych

Z analizy otrzymanych wyników badań wynika, że największy błąd ostatecznie obrobionych opravek występuje w wałach, które w czasie obróbki zgrubnej miały największy zakres zmian naddatku. Można to zademonstrować na dwóch przykładach:

Bicie 1 oprawka:

- po zgrubnej tokarskiej operacji 0,050 mm
- po wysokim odpuszczaniu 0,250 mm
- po operacji tokarskiej wykańczającej 0,030 mm
- po nawęglaniu 1,400 mm
- po prostowaniu 0,250 mm

Bicie II oprawka:

- po zgrubnej tokarskiej operacji 0,400 mm
- po wysokim odpuszczaniu 0,600 mm
- po tokarskiej wykańczającej operacji 0,100 mm
- po nawęglaniu 2,600 mm
- po prostowaniu 1,400 mm

Przy próbie późniejszego prostowania, jedna oprawka pękła w przekroju IV–IV. Było to spowodowane różnicą wytrzymałości relaksacyjnej materiału oprawki. Jak wiadomo [39, 47], wytrzymałość relaksacyjna charakteryzuje się możliwie maksymalnymi naprężeniami, nie powodujących w materiale odkształceń plastycznych. Przy obróbce półfabrykatów, z minimalnym zakresem zmian naddatku, dodatkowe momenty zginające nie mogą sprzyjać rozwojowi procesów relaksacyjnych; i odwrotnie, przy pojawieniu się dużych momentów zginających, związanych z rozkładem naprężeń w czasie obróbki oprawki, wytrzymałość relaksacyjna zostaje zaburzona i proces odkształcenia przebiega do momentu ustalenia się równowagi naprężeń. Na rys. 4.20 wyraźnie zauważa się kilka kolejnych odcinków, składających się z obróbki mechanicznej i cieplnej (22, 65, 66, 68, 69, 85) oraz prostowania (44, 67). Z przedstawionych wyników widać, że kolejność powstawiania błędów na wszystkich etapach jest jednakowa: zmniejszenie błędów po obróbce mechanicznej, zwiększenie po obróbce cieplnej, zmniejszenie po prostowaniu, zwiększenie po starzeniu.

Wyniki badań eksperymentalnych wykazują, że ułożenie operacji obróbki części o dużej dokładności, z kilkoma pośrednimi obróbkami cieplnymi, nie daje oczekiwanych efektów, ponieważ po pierwsze ma miejsce dziedziczenie błędów, otrzymanych w poprzednich operacjach, po drugie jest wyraźna cykliczność w powstawianiu błędów, ograniczona operacjami: obróbki cieplnej, prostowania, poprawiania nakiełków i obróbki powierzchni zewnętrznych.

Po obróbce cieplnej powstają duże odchyłki bicia promieniowego. Prostowanie umożliwia poprawienie błędów, ponieważ następująca po prostowaniu obróbka mechaniczna zwiększa bicie oprawek. Wybiórcza kontrola bicia oprawek, dobę po prostowaniu wykazała, że zastosowanie prostowania nie daje oczekiwanych efektów.

W celu zwiększenia dokładności obróbki części typu „wał”, przez zmniejszenie ich odkształceń, konieczne jest w pierwszej kolejności zmniejszenie naddatku, w wyniku polepszenia jakości odkuwek, stosowanie nowoczesnych metod otrzymywania półfabrykatów: walcowanie poprzeczno – ukośne, matrycowanie.

Przy obróbce mechanicznej zalecana jest określona kolejność operacji, która zawiera operacje na frezarko–nakielczarkach, toczenie zgrubne wszystkich powierzchni, obróbkę cieplną (hartowanie z następnym odpuszczaniem), szlifowanie i obróbkę rowków wpustowych oraz ścięć. Przed obróbką rowków wpustowych należy przeprowadzić kontrolę dokładności kształtu powierzchni cylindrycznych i przy występowaniu odkształceń osi, obróbkę rowków należy wykonać na wypukłej stronie powierzchni. Ma to związek z tym, iż w czasie usuwania naddatku, kierunek odkształcenia jest taki, że obrobiona powierzchnia staje się wklęsła.

Stosowanie pośrednich operacji cieplnych w celu usunięcia naprężeń szczątkowych w warstwie wierzchniej jest niecelowe, ponieważ błędy, powodowane naprężeniami szczątkowymi w warstwach wierzchnich, w trakcie następnej obróbki, są mniejsze od błędów powstających w czasie poprawiania nakielków.

Podczas szlifowania powierzchni zahartowanych często zachodzi potrzeba usuwania większego naddatku, jeśli po hartowaniu następuje skrzywienie osi. Na przykład w czasie szlifowania oprawek należy usunąć naddatek 1,5 mm, jeśli bicie powierzchni szlifowanych osiąga wartość 0,6 – 0,7 mm.

Tab. 4.2. Wykaz operacji procesu technologicznego

Nr operacji	Nazwa operacji
1.	Kucie
2.	Toczenie zgrubne
3.	Cieplna (wysokie odpuszczanie)
4.	Toczenie
5.	Nawęglanie
6.	Toczenie
7.	Frezowanie
8.	Cieplna (hartowanie)
9.	Starzenie
10.	Szlifowanie powierzchni walcowych
11.	Szlifowanie powierzchni walcowych

Jak wiadomo szlifowanie charakteryzuje się dużym wydzielaniem ciepła, które odprowadzane jest przez płyn chłodzący, co sprzyja powstawaniu dużych naprężeń szczątkowych.

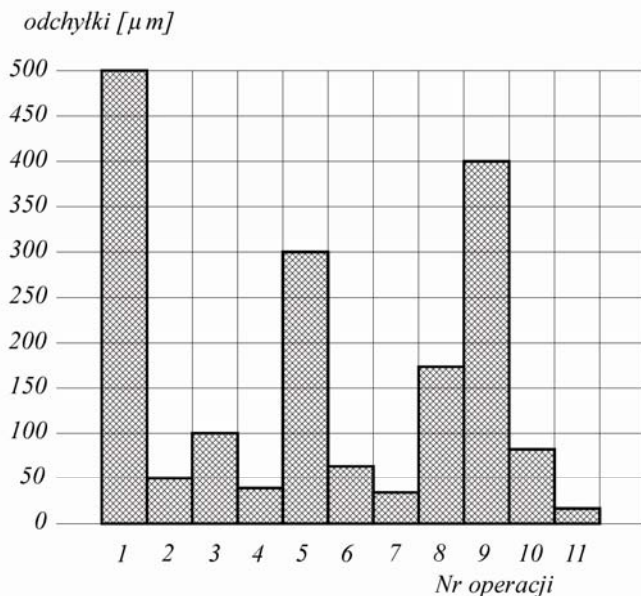
Celowe jest wstępne usunięcie naddatku z powierzchni zahartowanej, za pomocą ostrego narzędzia, wykonanego z najtwardszych materiałów. Wysoką ocenę mają noże z płytkami WK60M, WK100M do obróbki wałów zahartowanych ze stali wysokostopowych. W trakcie obróbki ostrym narzędziem, temperatura w strefie skrawania jest 1,5 – 2 razy niższa niż w czasie szlifowania i odpowiednio niższy jest poziom naprężeń szczątkowych. Naddatek w końcowej operacji szlifowania nie powinien być większy od 0,3 – 0,4 mm na średnicę.

W celu sprawdzenia podanych zaleceń opracowano nową technologię, listę podstawowych operacji, którą wyszczególniono w tab. 4.2. Zgodnie z nią wykonano doświadczalną partię opravek. Badania dokładności wytwarzania opravek przeprowadzono analogicznie do opisanego.

Tab. 4.3. Wyniki pomiarów błędów rowków wpustowych

Strona wału	Odchylenia w przekrojach [mm]						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Wypukła	0,001	0,003	0,006	0,008	0,007	0,004	0
Wklęsła	0,005	0,065	0,195	0,205	0,156	0,070	0,015
Boczna	0,003	0,010	0,030	0,045	0,021	0,014	0,006

Na rys. 4.18 przedstawiono wyniki pomiarów, z których wynika, że po pierwsze: nie występują cyklicznie powtarzające się strefy błędów, po drugie: ogólna niedokładność jest znacznie mniejsza nie tylko w końcowej, ale i w operacjach pośrednich.



Rys. 4.18. Wyniki pomiarów próbnej partii opravek

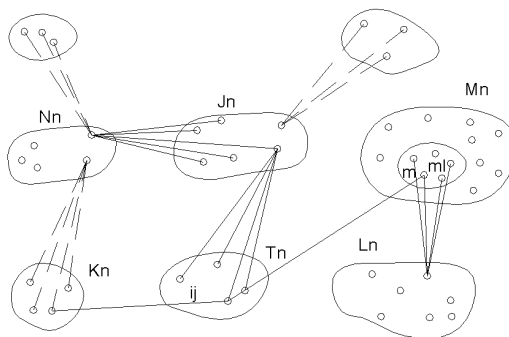
W czasie obróbki rowków wpustowych uwzględniono przedstawione zalecenia i wypróbowane warianty rozmieszczenia rowków, w zależności od skrzywienia osi, powstającego w czasie poprzednich operacji. Rowek wpustowy umieszczono w dwóch przekrojach: na stronach wypukłej i wklęsłej. Wyniki pomiarów błędów rowków wpustowych przedstawiono w tab. 4.3. Wynika z nich, że rozmieszczenie rowka wpustowego jest najbardziej pożądane na stronie wypukłej, wtedy błąd, powstający w operacjach poprzednich, jest mniejszy.

4.5. Kształtowanie struktury operacji procesu technologicznego obróbki wałów

Przy rozwiązaniu zagadnienia sterowania dokładnością obróbki szczegółowo rozpatrzono poszczególne operacje, do których opracowano odpowiednie zalecenia i środki sterowania automatycznego. Kompleksowe rozwiązanie zagadnienia sterowania dokładnością kształtowania wału, o małej sztywności jest utrudnione tym, że w następnych operacjach część dziedziczy i stopniowo gromadzi błędy z poprzednich operacji, które trudno jest ocenić. Jedną z dróg kompleksowego rozwiązania problemu sterowania dokładnością obróbki jest rozpatrzenie technologicznego procesu wytwarzania elementu, jako systemu jednolitego, łączącego zbiór podsystemów - operacji. W związku z tym problem optymalizacji może być rozwiązany poprzez określenie racjonalnych wartości sterujących parametrów technologicznych, a następnie zbudowanie odpowiedniej kolejności i struktury operacji w procesie technologicznym.

W istniejących dokumentach normatywnych dokładnie określono podstawowe pojęcia technologiczne: proces technologiczny, operacja, ustawienie, zabieg, przejście, uzbrojenie. Na podstawie metod matematycznych należy skonkretyzować podstawowe pojęcia, w przypadku produkcji małoseryjnej, kiedy w sytuacji charakterystycznej są ustalone zestawy wyposażenia i narzędzi oraz asortyment części, które koniecznie trzeba obrobić w określonym czasie. Przy tym analizowana jest obróbka N części na L obrabiarkach M narzędziami. Taki proces może być przedstawiany jako zestaw J kompleksów technologicznych I powierzchni, to znaczy zbiór, na którym określono relacje (związki wymiarowe między powierzchniami) (rys. 4.19) [67].

Jeżeli w przypadku zbioru powierzchni części określone są naddatki, z uwzględnieniem założonej na rysunku jakości i dokładności ich rozmieszczenia i powstałemu w taki sposób zbiorowi powierzchni przypisane zostaną wierzchołki, a zbiorowi wiążących ich wymiarów żebra, to powstanie graf obróbki mechanicznej.



Rys. 4.19. Zbiór odwzorowań określających uzbrojenie

Powierzchnie, utworzone przez naddatki, odnoszące się do jakiejkolwiek powierzchni części i półfabrykatu, są nazywane kompleksem technologicznym powierzchni lub po prostu kompleksem technologicznym [10].

Każda powierzchnia i -tego kompleksu technologicznego, j -ej części jest obrabiana od odpowiedniego kompletu baz technologicznych $K \in K_n \subset K$ na l -ej obrabiarce m - narzędziem.

Gdzie: K_n – zbiór kompletów baz technologicznych n -tej części,

K – zbiór kompletów baz N części.

Zatem konkretne przejście można przedstawić następującym uporządkowanym zbiorem danych

$$P = \langle n, i, j, k, l, m, A, T, Z, v_c, f \rangle, \quad (4.33)$$

gdzie: A – wymiar międzyoperacyjny,

T – tolerancja wymiaru A ,

Z – naddatek,

v_c – prędkość skrawania,

f – posuw.

W przejściu, określonym w taki sposób można wyróżnić część strukturalną

$$\langle n, i, j, k, l, m \rangle \quad (4.34)$$

i parametryczną

$$\langle A, T, Z, v, f \rangle. \quad (4.35)$$

Część strukturalna przejścia jest określona na następujących zbiorach: I_n, J_n, K_n, L_n, M_n , gdzie indeks n wskazuje konkretną część.

Zabieg technologiczny jest uporządkowanym zbiorem przejść:

$$ZT = \langle P_1 \langle P_2 \langle \dots \rangle \rangle. \quad (4.36)$$

Ustawienie jest uporządkowanym zbiorem zabiegów technologicznych:

$$U = \langle ZT_1 \langle ZT_2 \langle \dots \rangle \rangle. \quad (4.37)$$

Operacja technologiczna jest uporządkowanym zbiorem ustawień:

$$OT = \langle U_1 < U_2 < \dots \rangle. \quad (4.38)$$

Proces technologiczny jest uporządkowanym zbiorem operacji technologicznych:

$$PT = \langle OT_1 < OT_2 < \dots \rangle. \quad (4.39)$$

Proces technologiczny składa się nie tylko z operacji technologicznych, zawiera również operacje kontrolne, transportowanie części itp. Do celów pracy w zupełności wystarczą przytoczone określenia, które można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} PT &= \langle O_{PT}, R_1 \rangle, \\ OT &= \langle U_{OT}, R_2 \rangle, \\ U &= \langle ZT_U, R_3 \rangle, \\ ZT &= \langle P_Z, R_4 \rangle, \end{aligned} \quad (4.40)$$

gdzie:

O_{PT} – zbiór operacji danego procesu technologicznego;

U_{OT} – zbiór ustawień danej operacji;

ZT_U – zbiór zabiegów danego ustawienia;

P_Z – zbiór przejść danego zabiegu;

R_1, R_2, R_3, R_4 – relacja kolejności operacji, ustawień, zabiegów i przejść w procesie technologicznym, $ZT \in ZT_U$, $U \in U_{OT}$, $OT \in O_{PT}$.

Na podstawie przedstawionych oznaczeń wprowadzono pojęcie struktury procesu technologicznego, określanej jako

$$SPT = \langle ((P_Z, R_4) R_3) R_2) R_1 \rangle. \quad (4.41)$$

Kolejność przejść w procesie technologicznym, określana strukturą (4.36), jest nazywana trasą technologiczną, w odróżnieniu od procesu technologicznego, określonego strukturą (4.39), który zawiera zarówno część strukturalną, jak i parametryczną [68, 69].

Przyjęta powszechnie metodyka projektowania procesów technologicznych przewiduje: wybór i uzasadnienie metod otrzymywania półfabrykatu, obliczenia naddatków na obróbkę, wybór baz technologicznych (do obróbki zgrubnej i wykańczającej), określenie metod i kolejności obróbki; obliczenia dokładności z uwzględnieniem błędów bazowania, błędów obróbki (zużycie, stępienie, odkształcenie narzędzi, nierównomierna twardość, odkształcenia układu technologicznego itp.).

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano metody sterowania kształtowaniem stanu naprężeniowo – odkształceniowego, umożliwiające opracowywanie podstawowych zasad budowy procesów technologicznych obróbki wałów, gwarantujące minimalne odkształcenie powierzchni [20].

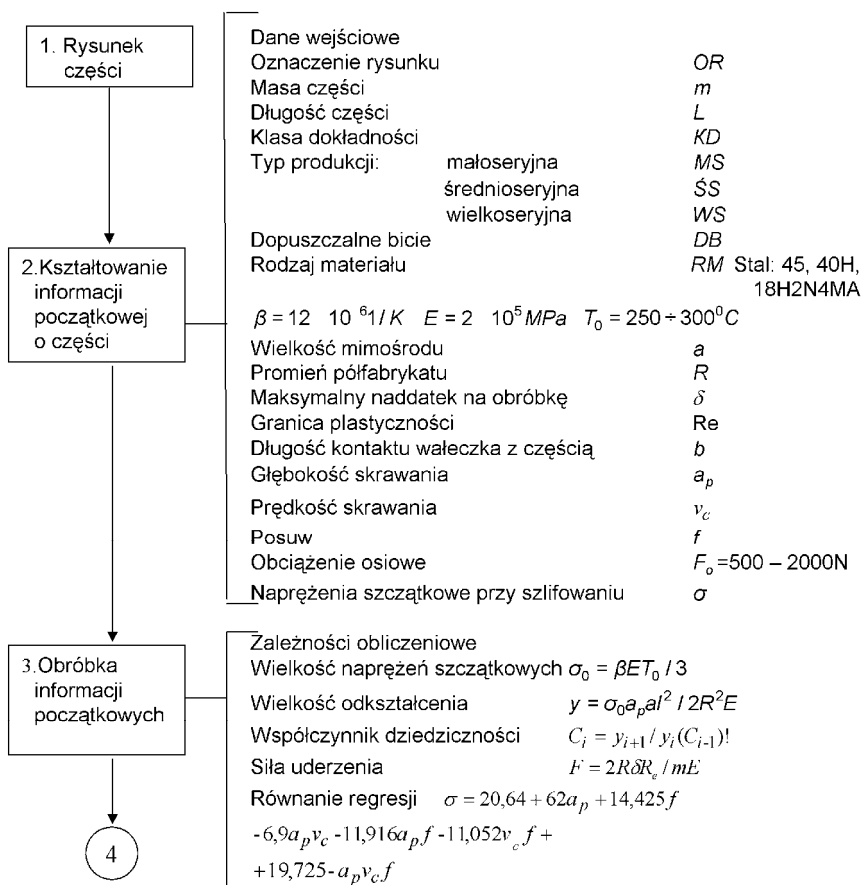
Zasady te w uzupełnieniu do ogólnie przyjętych powinny uwzględniać:

- wielkość następnego odkształcenia części, przy usunięciu nierównomiernego naddatku; formuła obliczeniowa umożliwia przy opracowaniu technologii wybór metody nakiełkowania, gwarantującej uzyskanie dopuszczalnego błędu (mimośrodowości), wychodząc z dopuszczalnego błędu rozmieszczenia powierzchni, uzyskanych podczas operacji tokarskiej;
- optymalną kolejność operacji, przewidującą minimalną ilość powtarzających się cykli obróbkowych, z uwzględnieniem technologicznego dziedziczenia błędów;
- zalecenia odnośnie obniżenia odkształceń części przy ich obróbce: kompensacja niezrównoważonych naprężeń w procesie obróbki, optymalne rozmieszczenie rowków wpustowych i innych elementów konstrukcyjnych, w zależności od charakteru naprężeń szczątkowych w przekroju wału i kierunku skrzywienia osi, osiowe obciążenie obrabianej części siłą osiową, określenie dopuszczalnego błędu rozmieszczenia nakiełków.

Otrzymano równanie regresji, określające wpływ podstawowych parametrów, przy szlifowaniu stali X19NiCrMo4, na naprężenia szczątkowe, określające jakość powierzchni obróbki części typu ciało obrotowe.

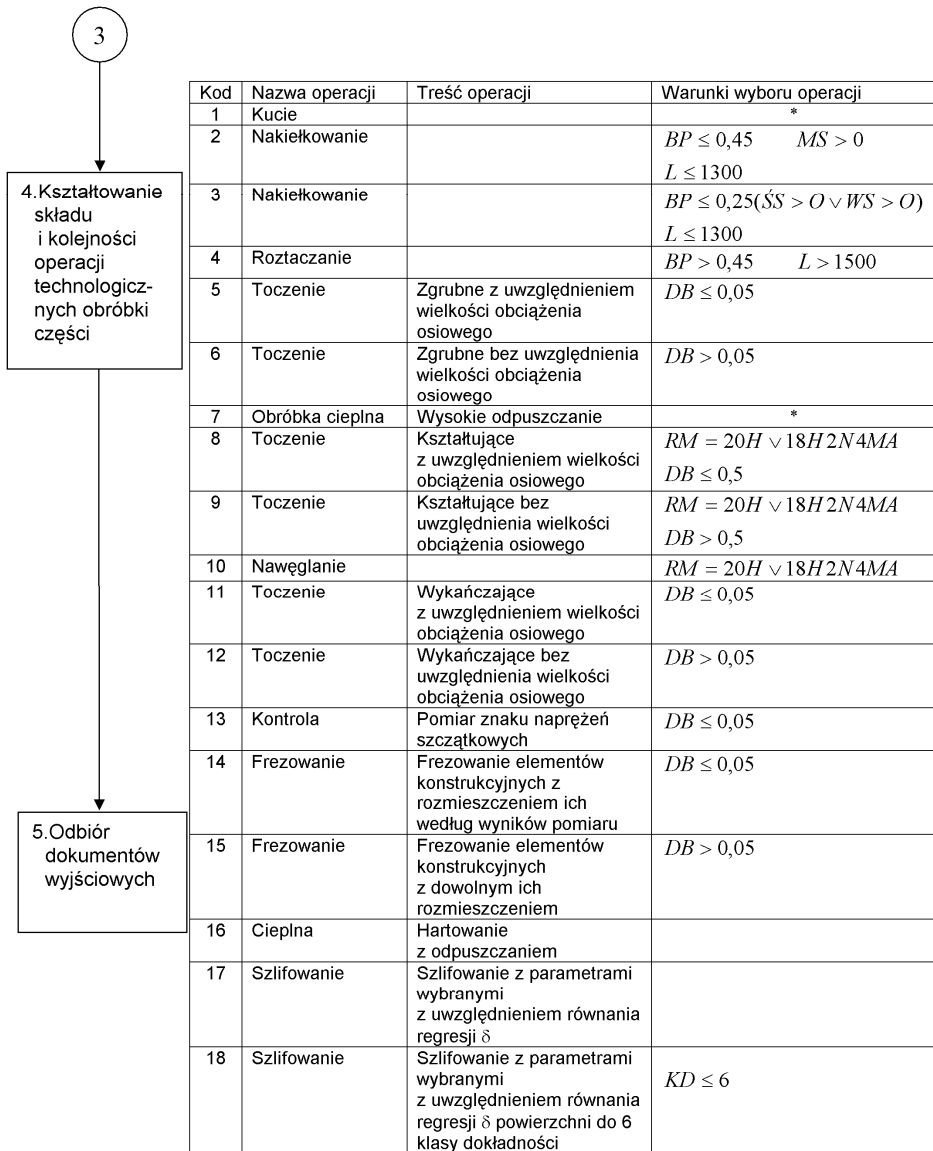
Po ukształtowaniu informacji wyjściowej jest ona przetwarzana z uwzględnieniem zależności obliczeniowych i zaleceń, w wyniku, czego kształtowany jest ciąg marszrutowy, gwarantujący optymalny skład operacji.

Jako przykład wykorzystania metodyki na rys. 4.20 i rys. 4.21 przedstawiono dwa warianty technologii obróbki wałów: bazowy i zalecany, zgodnie ze schematem blokowym (rys. 4.21); wariant bazowy zawiera 15 podstawowych operacji, 5 obróbki cieplnej, 3 odpuszczania i 2 operacje prostowania. Technologia bazowa nie przewiduje żadnych przedsięwzięć, odnośnie do obniżenia odkształceń, ponieważ w każdym cyklu obróbki powstają nowe wielkości odkształceń.

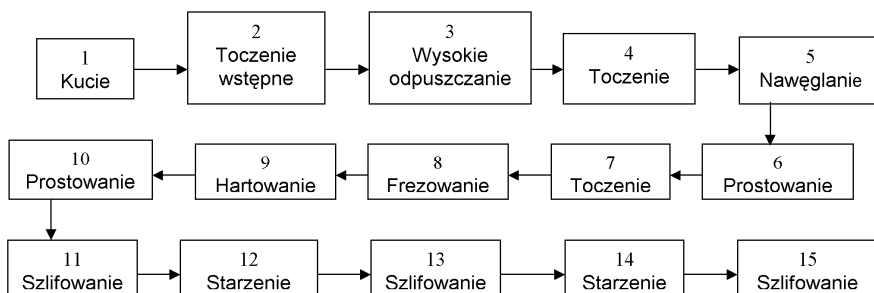


Rys. 4.20. Schemat uogólniony kształtowania trasy technologicznej obróbki części obrotowych

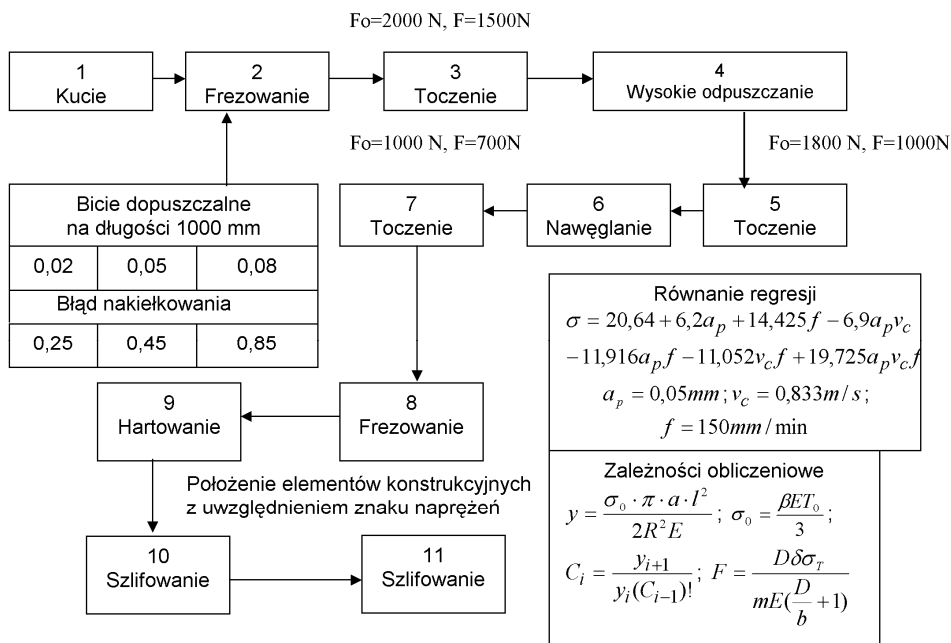
TECHNOLOGIA OBRÓBKİ WAŁÓW DŁUGOWYMIAROWYCH



Rys. 4.20. c.d.



Rys. 4.21. Realizacja metodyki – wariant bazowy



Rys. 4.22. Realizacja metodyki – wariant zalecany

Metodyka projektowania procesu technologicznego, z uwzględnieniem odkształcenia wałów, umożliwia zmniejszenie liczby cykli w wyniku zastosowania nowych rozwiązań technicznych, a zależności analityczne zwiększenie dokładności obróbki z jednoczesnym obniżeniem pracochłonności i poprawieniem jakości warstwy wierzchniej.

4.6. Obróbka ciepło – siłowa

W wielu współczesnych agregatach, maszynach i przyrządach są stosowane części o małej sztywności typu „wał” [48, 51, 162, 163, 164, 165]. Ciągły wzrost wielkości produkcji takich wałów jest uwarunkowany doskonaleniem obliczeń wytrzymałościowych, optymalizacją kształtu i konstrukcji, stałym obniżaniem ilości materiału, niezbędnego do wytworzenia wyrobów i wzrastającą produkcją maszyn precyzyjnych. Dysproporcje parametrów konstrukcyjnych wałów, długowymiarowych o małej sztywności, powodują poważne trudności w produkcji, których podstawowe przyczyny są następujące:

- a) znaczne odkształcenia sprężyste i plastyczne na wszystkich etapach obróbki, montażu i eksploatacji części;
- b) niska odporność na drgania i różna podatność elementów układów technologicznych obróbki;
- c) znaczący wpływ dziedziczności technologicznej na niezawodność działania;
- d) paczenie półfabrykatów spowodowane nierównomiernymi naprężeniami szczątkowymi, wnoszonymi na wszystkich etapach obróbki;
- e) mała odporność cieplna części.

Negatywny wpływ wymienionych czynników, przy wytwarzaniu wałów długowymiarowych o małej sztywności, jest przyczyną naruszenia baz technologicznych, błędów kształtu i wymiarów części, wad powierzchniowych, obniżenia parametrów skrawania, zmniejszeniu wydajności, niewykorzystania możliwości dokładnościowych obrabiarki oraz trwałości narzędzi, a w ostatecznym wyniku zmniejszenia niezawodności eksploatacyjnej wytwarzanych wałów.

Analiza doświadczenia produkcyjnego, w zakresie wytwarzania wałów długowymiarowych o małej sztywności w produkcji jednostkowej, małoseryjnej i seryjnej pokazała, że sposoby tradycyjne obróbki części sztywnych są mało efektywne, przy produkcji wałów o małej sztywności, dlatego zagadnienie ich wytwarzania w praktyce jest rozwiązywane przez obniżenie parametrów skrawania oraz wprowadzenie operacji docierania ręcznego. Zwiększa to w sposób znaczący pracochłonność obróbki i nie gwarantuje wymaganej jakości wyrobów. W związku z tym, doskonalenie procesów technologicznych wytwarzania wałów długowymiarowych, o małej sztywności, jest ważnym zagadnieniem, umożliwiającym zwiększenie efektywności i jakości produkcji.

Najślabszym ogniwem układu technologicznego są obrabiane półfabrykaty. Ich znaczne odkształcenia sprężyste i plastyczne, na wszystkich etapach procesu technologicznego, wymagają ograniczenia parametrów skrawania, błędów kształtu i wymiarów.

Zwiększenie dokładności obróbki półfabrykatów, na wszystkich operacjach sprzyja polepszeniu właściwości eksploatacyjnych maszyn i przyrządów, częściowej lub pełnej likwidacji prac, związanych z dopasowywaniem i prowadzi do zmniejszenia naddatków na obróbkę. To z kolei umożliwia obniżenie pracochłonności wytwarzania części i montażu maszyn, zwiększenie ich niezawodności. Badania w zakresie zwiększenia wydajności, dokładności eksploatacyjnej i jakości wyrobów gotowych, a także wyniki ich przemysłowego zastosowania potwierdzają, że podstawowymi kierunkami intensyfikacji procesów obróbki są: dobór parametrów technologicznych i warunków przebiegu procesu, umożliwiających uzyskanie wymaganej dokładności części, opracowanie stopów, posiadających wysoką stabilność wymiarową, względnie niski i stabilny współczynnik rozszerzalności cieplnej, duży moduł sprężystości; sterowanie dziedzicznością technologiczną.

Konieczność zastosowania skomplikowanych operacji technologicznych obróbki stabilizacyjnej jest uwarunkowana tym, że dowolność zmiany kształtu wymiarów prowadzi do zmiany parametrów wejściowych i obniżenia niezawodności maszyn precyzyjnych. Należy zagwarantować stabilność w warunkach długotrwałej eksploatacji, przy temperaturach stałej i zmiennej (od -50° do $+100^{\circ}\text{C}$). Najpełniejszą charakterystyką wymiarową, stabilności materiału w czasie, jest wielkość maksymalnego naprężenia nieulegającego relaksacji w drugim okresie badań (500 - 500 h), która nazywana jest umowną granicą relaksacji. Wielkość tę zaleca się stosować jako podstawową charakterystykę stabilności stopów w przemyśle maszynowym.

W pracy przedstawiono specyfikę uzyskiwania stabilności kształtu i wymiarów części o małej sztywności typu „wał”. Ważnym problemem jest analityczne określenie prostoliniowości osi wału, przy obróbce cieplno – siłowej, opracowanie nowej technologii obróbki cieplno – siłowej wałów długowymiarowych o małej sztywności i przykładu jej realizacji, zwiększenie dokładności eksploatacyjnej gotowych wyrobów w wyniku wytworzenia równomiernych zmiennych, co do znaku naprężeń szczątkowych, wzdłuż całego półfabrykatu.

4.6.1. Określenie analityczne prostoliniowości osi wału przy obróbce cieplno – siłowej

Do wytwarzania długowymiarowych wałów o małej sztywności są stosowane półfabrykaty z materiału prętowego, które mają znaczącą krzywiznę. Przed ich obróbką mechaniczną należy wykonać prostowanie półfabrykatów, aby uzyskać prostoliniowość 0,5 mm na 1 metr [22, 160]. Wadą prostowania jest powstawanie naprężeń szczątkowych nierównomiernych wzdłuż przekroju wzdłużnego półfabrykatu wału, które następnie przy zdjęciu warstwy materiału

w procesie obróbki mechanicznej, powodują powstanie momentu zginającego i odpowiednio zmianę prostoliniowości osi wału [46].

Szeroko stosowane jest prostowanie osiowe. Przy wyciąganiu półfabrykatu cylindrycznego, wszystkie włókna są doprowadzane do granicy plastyczności, dlatego istniejące wcześniej osiowe naprężenia szczątkowe są zdejmowane. W trakcie prostowania osiowego, przy ostatecznym odkształceniu 0,5 – 1%, naprężenia szczątkowe zanikają w pełni [20, 39].

Badania prostowania osiowego wału długowymiarowego, o małej sztywności, ze stali austenitycznej X10CrNi18-8, połączone z operacją hartowania (w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali – odpuszczanie przy tym nie jest wymagane), przeprowadzono na urządzeniu do obróbki cieplno – siłowej [22, 39]. Stale austenityczne mają duży współczynnik rozszerzalności cieplnej, dlatego do wytworzenia siły osiowej prostowania, po zakończeniu nagrzewania półfabrykatu do hartowania, końce jego są ustawiane w uchwycie, wykonanym ze stali o współczynniku rozszerzalności cieplnej, mniejszym niż materiał półfabrykatu i jest przeprowadzane chłodzenie uchwytu z zaciśniętym półfabrykatem. W wyniku różnicy współczynnika rozszerzalności cieplnej przy chłodzeniu powstaje siła osiowa, która działając na półfabrykat wału, powoduje jego prostowanie osiowe. Jako uchwyt zastosowano rurę sztywną ze stali C 25, w której wykonane są otwory przeznaczone na ciecz chłodzącą. Zaciski wykonano na końcach uchwytu.

W danym procesie, pod pojęciem jakościowego prostowania osiowego rozumie się takie, przy którym w wyniku działania osiowej siły prostowania żadne włókno, w każdym przekroju poprzecznym półfabrykatu, nie posiada naprężenia większego niż granica plastyczności materiału przy ściskaniu. Przy następnym wyciąganiu, w dowolnym przekroju poprzecznym na całej jego powierzchni, powstają naprężenia nie mniejsze niż granica plastyczności.

Pod maksymalnym początkowym ugięciem półfabrykatu rozumie się takie ugięcie początkowe, przy którym w skrajnym włóknie ściskanym powstają naprężenia ściskania nie większe od granicy plastyczności, przy temperaturze odpowiadającej dojściu skrzywionej osi wału, do linii prostej. W przeciwnym razie w przekroju poprzecznym półfabrykatu powstaje zgniot „ściskania”, który przy dalszym wyciąganiu do granicy plastyczności nie ustępuje w pełni – efekt Bauschingera. Wynikiem jest niesymetryczna strefa zgniotu, której odpowiada niesymetryczny, względem osi symetrii przekroju poprzecznego, rozkład naprężeń szczątkowych, mający następnie wpływ na prostoliniowość wału. Ustalono, że oś półfabrykatu wału długowymiarowego dobrze opisuje równanie paraboli drugiego stopnia:

$$f(z) = \frac{4\delta_{p\max}}{l} \cdot z \cdot \left(1 - \frac{z}{l}\right), \quad (4.42)$$

gdzie: $\delta_{p\max}$ – maksymalne początkowe ugięcie półfabrykatu,

l – odległość między środkami skrajnych przekrojów wału.

Napężenie maksymalne powstające w skrajnym włóknie przy wyciąganiu zgiętej osi wału do linii prostej określane jest z zależności:

$$\sigma_{\max} = \frac{\delta_{p\max} \cdot F}{W_x}, \quad (4.43)$$

gdzie: F – siła osiowa,

W_x – wskaźnik, wytrzymałości na zginanie.

Wielkość F określana jest według zależności [46], której przekształcenie prowadzi do wyrażenia:

$$F = \frac{3\pi \cdot D^4 \cdot E}{20 \cdot l^2}, \quad (4.44)$$

gdzie: D – średnica półfabrykatu wału.

Oznaczając stosunek l do D jako K_0 , otrzymano:

$$\delta_{p\max} \leq \frac{5K_0^2 \cdot D \cdot R_e}{24E}. \quad (4.45)$$

Maksymalne naprężenia ściskania w ściskanym włóknie powstają przy ochłodzeniu wału o temperaturę ΔT , odpowiadającą skróceniu do wielkości maksymalnego ugięcia początkowego oraz w związku ze zmianami σ_p i E wraz z obniżeniem temperatury ($R_e = R_e(t)$, $E = E(t)$), a więc zależność (4.45) może być przekształcona do postaci:

$$\delta_{p\max} \leq \frac{5K_0^2 \cdot D \cdot R_e(t - \Delta T)}{24E(t - \Delta T)}. \quad (4.46)$$

Przy zmniejszeniu temperatury wału o ΔT , jego długość ulegnie skróceniu o

$$\Delta l = \Delta \alpha(t) \cdot l \cdot \Delta T, \quad (4.47)$$

gdzie $\Delta \alpha(t)$ – różnica współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału półfabrykatu wału i uchwytu, funkcjonalnie zależna od temperatury.

Skrócenie długości włókna wału Δl przy stygnięciu powinno więc umożliwiać wyprostowanie skrzywionej osi, to znaczy:

$$\Delta l = \delta_{ow} + 2\delta_{lc}, \quad (4.48)$$

gdzie δ_{ow} – odległość niezbędna do „wyboru” ugięcia półfabrykatu określana jako:

$$\delta_{ow} = \frac{8 \cdot \delta_{p\max}^2}{3l},$$

δ_{lc} – luz między powierzchnią czołową uchwytu i powierzchnią czołową blokującego występu, równy:

$$\delta_{lc} = \frac{2D_w \cdot \delta_{p \max}}{l},$$

gdzie: D_w – średnica występów.

Oznaczając stosunek średnicy występu chwytającego (lub śruby) do średnicy półfabrykatu przez C , można zapisać:

$$\Delta T = \frac{1}{\Delta \alpha(t) \cdot l^2} \left(\frac{8}{3} \delta_{p \max}^2 + 4C \cdot D \cdot \delta_{p \max} \right). \quad (4.49)$$

Po podstawieniu zależności (4.49) do (4.46) i rozwiązaniu odnośnie $\delta_{\max}$, określone jest maksymalne ugięcie początkowe półfabrykatu wału w zależności od jego geometrii i właściwości fizycznych materiału.

W szczególności, w przypadku półfabrykatów ze stali X10CrNi18-8 i urządzenia ze stali C 25, mają następującą postać:

$$\Delta \alpha = 1,43 \cdot t^{-0,205}, \quad E = 2688 \cdot t^{-0,075}, \quad R_e = 84,1 \cdot t^{-0,314},$$

gdzie: t – temperatura nagrzewania.

Porównanie wielkości obliczeniowych ugięcia początkowego z informacją o rzeczywistych wielkościach wyjściowych półfabrykatów ze stali X10CrNi18-2, o średnicach od 20 do 80 mm i stosunku długości do średnicy od 30 do 80 wskazuje, że mogą być półfabrykaty wyjściowe o ugięciu początkowym, większym od wyjściowego. Dlatego półfabrykaty na wały długowymiarowe należy wybierać przed procesem prostowania, na podstawie ugięcia początkowego, przy uwzględnieniu zależności (4.46). Półfabrykaty na wały ze stali X10CrNi18-2, o długości 1050 mm i średnicy 30, mm powinny mieć wyjściowe ugięcie jakościowe nie większe niż 3,4 mm; w praktyce spotyka się półfabrykaty o podobnych wymiarach o ugięciu do 6 mm.

Ugięcie półfabrykatu, które można usnąć przy pomocy obróbki cieplno – siłowej przy uwzględnieniu, że ugięcie wyjściowe nie może być większe od maksymalnego jakościowego, jest określone w sposób następujący: przy stygnięciu skrócenie półfabrykatu powinno nie być mniejsze od sumy wydłużeń:

$$\Delta l = \delta_{ow} + 2\delta_{lc} + \delta_{sp} + \delta_{wp}, \quad (4.50)$$

gdzie: δ_{sp} – skrócenie urządzenia, w wyniku działania obciążenia spowodowanego zmniejszaniem się długości półfabrykatu, równe:

$$\delta_{sp} = \frac{R_e \cdot l}{E_u \cdot K_s},$$

gdzie: R_e – granica plastyczności materiału półfabrykatu przy 20°C,
 E_u – moduł sprężystości podłużnej materiału urządzenia przy 20°C,
 K_s – stosunek sztywności urządzenia do sztywności półfabrykatu,
 δ_{wp} – wydłużenie półfabrykatu przy którym w skrajnym ściskającym włóknie, naprężenia nie było mniejsze od granicy plastyczności materiału wału przy rozciąganiu, czyli:

$$\delta_{wp} = \frac{(\sigma_k + R_e) \cdot l}{E_{20^0}},$$

gdzie: σ_k – naprężenia w skrajnym włóknie przekroju maksymalnego ugięcia półfabrykatu, powstające przy wyciąganiu skrzywionej osi do linii prostej.

Zgodnie z (4.45), zależność do określania σ_k ma postać:

$$\sigma_k = \frac{24D \cdot E_t \cdot \delta_{p \max}}{5l^2},$$

gdzie E_t – moduł sprężystości podłużnej materiału wału przy temperaturze nagrzewania.

Po rozwiązaniu zależności (4.50) względem $\delta_{\max}$, uzyskuje się:

$$\begin{aligned} \delta_{p \max} = & -D \left(0,9 \frac{E_t}{E_{20}^0} + \frac{3}{4} C \right) + \\ & + D \frac{1}{2} \sqrt{\left(1,8 \frac{E_t}{E_{20}^0} + 1,5C \right)^2 + 1,5K_0^2 \frac{\sigma_p}{E_{20}^0} \left(\frac{\Delta\alpha \cdot t \cdot E_{20}^0}{R_e} - \frac{E_{20}^0}{E_u K_s} - 1 \right)}, \end{aligned} \quad (4.51)$$

gdzie: t – temperatura nagrzewania,

$\Delta\alpha$ – różnica współczynnika rozszerzalności cieplnej półfabrykatu i materiału urządzenia w zakresie temperatur od 20°C do temperatury nagrzewania.

Na podstawie analizy ugięć początkowych półfabrykatów, o różnych wymiarach oraz obliczenia maksymalnego ugięcia korygującego w urządzeniu, można przeprowadzać prostowanie osiowe półfabrykatów wałów, z jednoczesną obróbką cieplną oraz korygowanie początkowego ugięcia półfabrykatu, w wyniku wyciągania włókien w dowolnym przekroju porzecznym do granicy plastyczności i ukształtowania w materiale półfabrykatu, symetrycznych odnośnie osi naprężeń szczytkowych.

4.6.2. Nowoczesne technologie obróbki cieplno – siłowej wałów długowymiarowych

Analiza technologii wykonania wałów długowymiarowych o małej sztywności, w szczególności, operacji obróbki cieplno - siłowej [20, 50, 51] wykazała, że wadą znanych podejść technologicznych jest niemożliwość utrzymywania wyrobu – wału w stanie naprężonym, przy obniżeniu temperatury do 20°C, ponieważ przyrząd ściskany jest szybciej niż wał. W związku z tym, że ścianki przyrządu (tulei warstwowej) są cienkie (stygnie on kilkakrotnie szybciej), tworzy się luz między powierzchnią czołową rozciątej tulei chwyty, co prowadzi przy chłodzeniu wyrobu do nierównomiernego rozkładu wewnętrznych sił ściskających. Ciepło na końcach półfabrykatu odprowadzane jest szybciej, z powodu kontaktu końców wyrobu z nakrętką, co powoduje nierównomierny rozkład naprężeń szcążkowych wzdłuż wyrobu.

Wynikiem technicznym nowej technologii obróbki siłowo – cieplnej wałów długowymiarowych, o małej sztywności, jest zwiększenie dokładności i stabilności parametrów geometrycznych oraz zwiększenie dokładności eksploatacyjnej wyrobów gotowych, w wyniku wytworzenia równomiernych zmiennych według znaku naprężeń szcążkowych wzdłuż całego półfabrykatu [72].

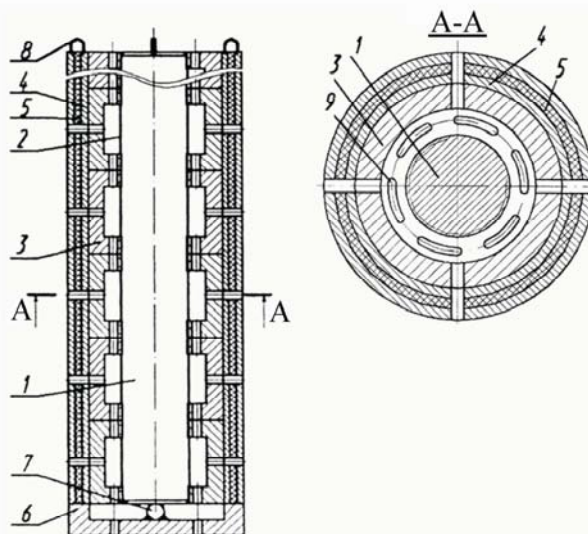
Istota nowej metody obróbki cieplno – siłowej wałów długowymiarowych o małej sztywności.

Część 1 jest wstępnie obrabiana na tokarce przy zastosowaniu podtrzymek [20]. Kształtowane są następujące zarysy profili roboczych 2 (rys. 4.23):

- a) gwintowy, przy określaniu skoku należy uwzględnić: granicę wytrzymałości materiału, wielkość przekroju poprzecznego półfabrykatu, głębokość nacięcia gwintu (jego średnicę wewnętrzną) – nie powinien być większy od naddatku na obróbkę mechaniczną;
- b) schodkowy, w którym różnica między średnicą zewnętrzną i wewnętrzną, również zależy od granicy wytrzymałości materiału i przekroju poprzecznego półfabrykatu i nie powinna przekraczać naddatku na obróbkę mechaniczną.

Przy obróbce części z gwintem na półfabrykat nakręcane są tulejki rozporowe 3, a przy obróbce części stopniowanych tuleje rozporowe 3 są nakładane jak panewki w łożyskach ślizgowych (tuleja składa się z dwóch części). Tuleje wykonywane są z materiału, którego współczynnik rozszerzalności liniowej α_t jest mniejszy od współczynnika rozszerzalności liniowej materiału części α_{cz} .

Długość tulei jest określana z warunku równoważności części wyrobu, na której umieszczona jest tuleja oraz z warunku minimalizacji strzałki ugięcia.



Rys. 4.23. Urządzenie do obróbki cieplno - siłowej długowymiarowych wałów o małej sztywności

Do osiągnięcia równomierności ściskania, wzdłuż osi części oraz uzyskania wymaganej sztywności ściskanej części przedmiotu, przyjęto stosunek długości $l_1 = l_2$, $\frac{l}{d} \leq 8$. W tulejach 3 są wykonane otwory 9, o takim kształcie i rozmieszczone w taki sposób, aby przy dowolnym wzajemnym położeniu dwóch sąsiednich tulei możliwe było doprowadzenie cieczy chłodzącej.

Część 1 z tulejami rozporowymi 3 (tuleje rozporowe posiadają gwint, jeżeli gwint jest również nacięty na części lub są dwuelementowe przy części stopniowanej), jest wstawiana (przy wcześniej określonej wartości luzu) w tuleję wielowarstwową 4 i ustalana odnośnie do jej dolnej i górnej powierzchni czołowej. Cylinder specjalny 4 jest wykonany z materiału, którego współczynnik rozszerzalności liniowej jest równy współczynnikowi rozszerzalności liniowej tulei (w celu wyeliminowania zaklinowywania z powodu odkształceń temperaturowych) z wypełniaczem 5. Wypełniacz 5 może mieć różny współczynnik przewodności cieplnej (na przykład piasek rzeczny przemieszany z wiórami żeliwnymi).

Korpus cylindra 4 jest wielowarstwowy, każda warstwa ma dodatkową objętość, zapełnianą materiałem o niższym współczynniku przewodności cieplnej. Na cylinder jest wybierany materiał o współczynniku rozszerzalności liniowej, większym niż współczynnik rozszerzalności liniowej półfabrykatu.

W korpusie wielowarstwowym są wykonywane otwory przelotowe w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym, w których są montowane tuleje, wykonane z takiego samego materiału, jak cylinder. Średnica wewnętrzna tulei i ich ilość jest określana z warunku przebiegu procesu technologicznego (hartowanie, odpuszczanie itd.) oraz przy uwzględnieniu parametrów geometrycznych półfabrykatu (na przykład wał gładki lub stopniowany). Ustalenie części może być realizowane według dwóch wariantów:

- a) wał ustalany jest według powierzchni czołowej dolnej za pośrednictwem powierzchni kulistej, na sztywno zamocowanej do pokrywy 6 na dolnym czole, a więc półfabrykat opiera się swoim dolnym końcem o powierzchnię sferyczną, co gwarantuje kontakt punktowy z cylindrem;
- b) część jest ustalana według dwóch czół za pośrednictwem dwóch powierzchni sferycznych 7, na sztywno połączonych z pokrywami 6, do powierzchni czołowych dolnej i górnej. Przy takim sposobie zamocowania element na sztywno osiowo jest powiązany z cylindrem.

Do górnej części cylindra 4 przyspawane są cztery uchwyty 8, służące do podwieszania całego urządzenia. W celu uniknięcia ugięcia części 1, spowodowanego działaniem naprężeń, powstających w trakcie nagrzewania–ochładzania konstrukcji: część – tuleje rozprężne – cylinder, luz między tulejami 3 i cylindrem 4 powinien być minimalny, umożliwiający pracę urządzenia bez zaklinowywania.

Zmontowane urządzenie jest umieszczane w piecu szybowym i nagrzewane, zgodnie z technologią obróbki cieplnej do temperatury hartowania lub odpuszczania oraz wygrzewane w tej temperaturze do nagrzania całej części. Przy nagrzewaniu część wydłuża się w stopniu większym od tulei i cylindra, z powodu różnicy współczynników rozszerzalności liniowej. Dobierając wartości liczbowe dodatniej różnicy współczynników liniowej rozszerzalności cieplnej części i tulei, jest uzyskiwana wielkość odkształcenia plastycznego części, przekraczająca granicę proporcjonalności tj. granicę prawa Hooke’a. Osiowe odkształcenie plastyczne, za granicą proporcjonalności (prawo Hooke’a), przy nagrzewaniu, likwiduje dziedziczność technologiczną od operacji poprzedzających. Oprócz tego, w wyniku działania obciążeń osiowych ma miejsce umocnienie materiału części (zgniot) – wyrównywanie mikropęknięć wewnętrznych.

Cylinder z półfabrykatem jest ochładzany do określonej temperatury, zmieniana jest różnica czasu ochładzania półfabrykatu i cylindra, przy zachowaniu osiowego stanu naprężeń materiału półfabrykatu, aż do uzyskania pełnego ochłodzenia, jednocześnie półfabrykaty krzywe są prostowane. W odróżnieniu od metod znanych, w których odkształcenie plastyczne wyrobu zachodzi przy stygnięciu, cylinder stygnie wcześniej niż wał, a naprężenia

szczątkowe mają lokalny charakter; istota tej technologii polega na zmianie kolejności zabiegów technologicznych [22].

W technologii przedkładanej odkształcenia plastyczne zachodzą przy nagrzewaniu z określoną prędkością, przy tym cylinder ulega większemu wydłużeniu niż narzędzie, o wielkość współczynników liniowej rozszerzalności cieplnej i o różnicę długości cylindra oraz części, przy ochładzaniu cylindra prędkość jego stygnięcia jest natomiast przynajmniej pięciokrotnie mniejsza od prędkości stygnięcia półfabrykatu (półfabrykat powinien stygnąć z większą prędkością niż uchwyt, minimum pięciokrotnie – w zależności od czynnika chłodzącego: olej, woda, powietrze). W półfabrykacie obciążanym osiowo przy stygnięciu są kształtowane naprężenia szczątkowe, na przemian zmienne według znaku, wzdłuż długości części i równomierne w jej przekroju poprzecznym, co wyklucza paczenie gotowych części przy ich eksploatacji.

W celu rozszerzenia możliwości technologicznych obróbki cieplno – siłowej, cylinder wielowarstwowy jest montowany z sekcji, przy czym w razie konieczności zwiększania długości półfabrykatów oraz odkształceń plastycznych, długość cylindra jest zwiększana drogą zwiększenia ilości sekcji.

Porównanie naprężeń wewnętrznych w wale do i po zastosowaniu obróbki cieplno – siłowej pokazano na rys. 4.24. Zwiększeniu ulegają również charakterystyki wytrzymałościowe części.

Zastosowanie nowej technologii obróbki cieplno – siłowej umożliwia minimalizację wielkości ugięcia półfabrykatu i stabilizację poziomu naprężeń szczątkowych wzdłużnych, co wpływa na zwiększenie dokładności eksploatacyjnej gotowego elementu, na przykład wałów długowymiarowych o małej sztywności i polepszenie jakości wyrobów gotowych.

Przykład realizacji. Półfabrykat wału wykonano ze stali X17CrNi16–2, a cylinder i tuleję ze stali 41Cr4, wydłużenia temperaturowe są określane z zależności:

$$\Delta L = \alpha_{cz}(T^\circ) \cdot T^\circ \cdot L - \alpha_t(T^\circ) \cdot T^\circ \cdot L,$$

gdzie: ΔL – różnica wydłużenia półfabrykatu wału i tulei,

T° – temperatura nagrzewania,

L – długość tulei i odcinka wału.

Wielkość odkształceń plastycznych:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L},$$

przy $L = 200 \text{ mm}$, $T^\circ = 1050^\circ \text{C}$, $\alpha_{cz} = 18,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm stop}$,

$\alpha_t = 12,8 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm stop}$:

$$\Delta L = 18,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1050 \cdot 200 - 12,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1050 \cdot 200 = 1,197 \text{ mm}.$$

Wartość odkształcenia plastycznego:

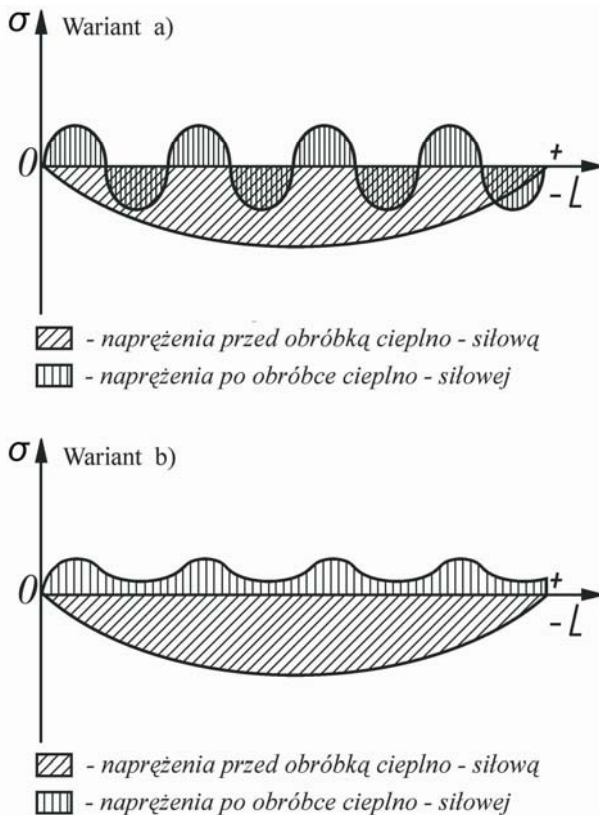
$$\varepsilon = \frac{1,197}{200} = 0,5985\%.$$

Czas chłodzenia jest obliczany przy następujących parametrach: średnica wału 40 mm, średnica wewnętrzna cylindra 160 mm, zewnętrzna 260 mm, wypełniacz – piasek, zmieszany z wiórami żeliwnymi, czynnik chłodzący – olej o temperaturze 30⁰. Czas chłodzenia wału określany jest z zależności:

$$\tau = \frac{F_0 \cdot d^2 \cdot \gamma \cdot c}{4\lambda} \text{ s}.$$

Czas chłodzenia cylindra jest określany w wyniku rozwiązania równania:

$$\frac{\theta_0}{\theta'} = \Phi_0(B_i, F_0),$$



Rys. 4.24. Zależności zmiany naprężeń szczątkowych w wałe do i po obróbce cieplno-siłowej: a) wariant ustalania i zamocowania według czoła dolnego za pośrednictwem powierzchni kulistej; b) wariant ustalania i zamocowania według dwóch czoł za pośrednictwem dwóch powierzchni kulistych

gdzie $F_0 = \frac{\alpha'}{r^2}$ – kryterium Fouriera, które jest określane jako funkcja

temperatur względnych $\frac{\theta_0}{\theta'}$ i kryterium Biota: $B_i = \frac{B_0}{\lambda_{ekw.}}$,

gdzie:

r – promień wału długowymiarowego (w danym przypadku wał przedstawiany jest jako nieskończenie długi cylinder o promieniu δ),

$\lambda_{ekw.}$ – ekwiwalentna przewodność cieplna układu: tuleja – cylinder wielowarstwowy,

B_0 – współczynnik oddawania ciepła przez otoczenie do powierzchni ciała,

γ – ciężar objętościowy materiału.

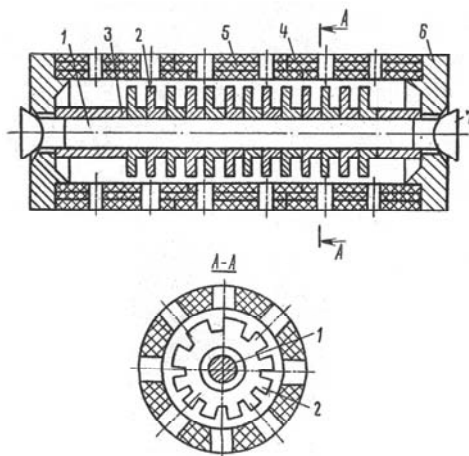
Wychodząc z wyboru materiału tulei i cylindra w odniesieniu do materiału wału, w ciągu całego cyklu obróbki cieplnej różnica współczynników rozszerzalności temperaturowej α_{cz} i α_t jest dodatnia.

4.6.3. Sposób obróbki cieplno – siłowej wałów długowymiarowych o małej sztywności

Proponowany sposób odnosi się do obróbki cieplno – mechanicznej wałów długowymiarowych i może być zastosowany przy hartowaniu, normalizacji i odpuszczaniu części typu „wał” (osi, cięgien, ramion kół itp.), głównie elementów długowymiarowych o małej sztywności. Sposób obróbki cieplnej, jest przeznaczony do stabilizacji naprężeń szczątkowych i prostowania wyrobów długowymiarowych o małej sztywności typu wał i umożliwia zwiększenie sztywności obróbki, drogą przeciwdziałania paczeniu części.

Urządzenie do realizacji obróbki cieplno – mechanicznej części długowymiarowych typu wał przedstawiono na rys. 4.25 [21].

Obróbka długowymiarowych wałów osiowosymetrycznych jest realizowana w sposób następujący. Część 1 jest wstępnie przetaczana oraz nacinany jest gwint na jej końcach. Długość gwintu, jego skok są określane z uwzględnieniem granicy wytrzymałości materiału i wielkości przekroju poprzecznego półfabrykatu. Na element 1 nakładane są radiatory 2, z rowkami promieniowymi. Liczba radiatorów i ich powierzchnia jest określana w zależności od niezbędnej powierzchni odprowadzania ciepła. Wielkość powierzchni radiatorów jest regulowana przez liczbę rowków. Zestaw radiatorów o różnych powierzchniach odprowadzania ciepła umożliwia równomierne stygnięcie półfabrykatu. Półfabrykat na całej długości może posiadać złożony kształt w przekrojach wzdłużnym i poprzecznym.



Rys. 4.25. Urządzenie do obróbki cieplno – mechanicznej wałów długowymiarowych o małej sztywności

Na pozostałe miejsce na wale, z uwzględnieniem odprowadzania ciepła, z obu stron są nakładane tuleje rozporowe długościowe 3, do oparcia o czoła radiatorów 2. Część 1 z radiatorami 2 i tulejami rozprężnymi 3 jest wstawiana do wielowarstwowego cylindra sekcijnego 4, z wypełniaczem 5, o różnym współczynniku przewodności cieplnej, w zależności od niezbędnej prędkości chłodzenia cylindra (na przykład: piasek rzeczny zmieszany, z drobnymi wiórkami żeliwnymi); jej położenie odnośnie czoł cylindra 4 jest regulowane przy pomocy pokryw – czopów 6. Do otworów pokryw – czopów 6 są wstawiane czopy sferyczne 7 i nakręcane na końce części do momentu zetknięcia się czopów sferycznych 7, z pokrywami 6 i utworzenia zamkniętego konturu siłowego półfabrykatu wału, ze sferycznymi łożyskami wzdłużnymi: pokryw – czopy – cylinder.

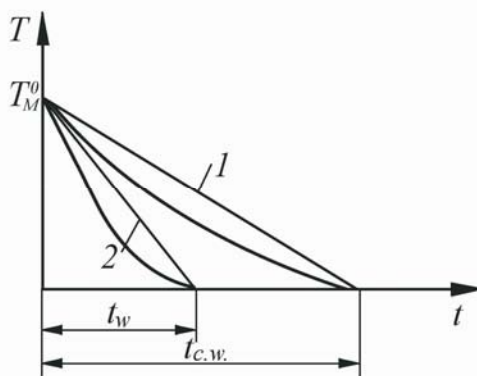
Otwory w pokrywie 6 są wykonywane z luzem tak, aby było możliwe przekoszenie półfabrykatu wału w przedziale 3⁰; umożliwia to kompensowanie niedokładności technologicznej wykonania urządzenia. Zmontowany cylinder jest umieszczany w piecu szybowym i nagrzewany, zgodnie z technologią obróbki cieplnej, do temperatury hartowania lub odpuszczania, wygrzewany w tej temperaturze do całkowitego nagrzania półfabrykatu. Przy nagrzewaniu cylinder 4 wydłuża się bardziej niż element 1. Przez dobór wartości liczbowych różnicy dodatniej współczynników rozszerzalności liniowej, cylindra i części 1, można uzyskać wielkość odkształcenia plastycznego części, przekraczającą granicę proporcjonalności, to znaczy granicę prawa Hooke'a. Przy konieczności zwiększenia odkształcenia plastycznego części, na przykład w trakcie prostowania, należy zwiększyć długość cylindra 4, przy niezmienniej długości części. W przypadku półfabrykatów długowymiarowych, posiadających na końcu kołnierze lub większe średnice w dowolnym miejscu wzdłuż części,

niektóre sekcje cylindra są wykonywane jako powiększone konstrukcyjnie w przekroju poprzecznym.

Odształcenie plastyczne osiowe za granicą proporcjonalności (prawo Hooke'a) przy nagrzewaniu powoduje, że nie występuje dziedziczność technologiczna od poprzednich operacji i jednocześnie część jest prostowana. Jednak nierównomierne stygnięcie w stanie swobodnym jest przyczyną powstania naprężeń szczątkowych. W celu wykluczenia tego ujemnego zjawiska cylinder 4 powinien stygnąć wolniej niż część 1, to znaczy półfabrykat powinien stygnąć z większą prędkością, w porównaniu z cylindrem (minimum pięciokrotnie), w zależności od środka chłodniczego (olej, woda, powietrze). W półfabrykacie, o obciążeniu osiowym przy stygnięciu, powstają naprężenia szczątkowe, równomierne wzdłuż części oraz w przekroju poprzecznym, co wyklucza paczenie gotowych części przy ich eksploatacji. Oprócz tego polepszają się charakterystyki wytrzymałościowe części.

Wykres zależności $T^\circ = f(\varepsilon)$ jest przedstawiony na rys. 4.26, gdzie:

- 1 – krzywa obrazująca cylinder wielowarstwowy,
- 2 – wał,
- T – temperatura nagrzewania,
- t – czas chłodzenia,
- t_w – czas chłodzenia wału,
- $t_{c.w.}$ – czas chłodzenia cylindra wielowarstwowego.



Rys. 4.26. Wykres zależności temperatury od czasu chłodzenia

Opracowany sposób obróbki cieplno – mechanicznej umożliwia minimalizację wielkości ugięcia wyrobu oraz stabilizację poziomu naprężeń szczątkowych, wzdłuż części, co umożliwia zwiększenie dokładności eksploatacyjnej wyrobów gotowych, na przykład wałów długowymiarowych, o małej sztywności oraz podwyższenie ich jakości.

4.6.4. Obróbka cieplno – siłowa osiowosymetrycznych części wielostopniowych

Sposób obróbki cieplno - siłowej może być zastosowany przy hartowaniu, normalizacji i odpuszczaniu części typu „wał” (osie, cięgna, ramiona kół itp.), głównie długowymiarowych, szczególnie o małej sztywności przy stosunku długości do średnicy powyżej 10.

Urządzenie do obróbki cieplnej wałów [21], ma element w postaci belki z rozmieszczonymi na niej uchwytami i wspornikami, z pneumatycznym mocowaniem wyrobów oraz sprężynami, umiejscowionymi na bloku między wspornikami. Wadą tego urządzenia jest niemożliwość obróbki wałów o dużych wymiarach (o średnicy powyżej 80 mm). W tym przypadku niezbędne są sprężyny, przenoszące siłę powyżej 50 T; urządzenie w tym przypadku musi mieć odpowiednio większe wymiary gabarytowe, co nie jest pożądane ze względów ekonomicznych.

W urządzeniu do obróbki cieplno – siłowej części długowymiarowych typu „wał” [2], jest element w postaci rury cienkościennej, wykonanej z materiału o innym współczynniku rozszerzalności liniowej niż wyrób (wał) oraz dwa uchwyty, ustalone odnośnie jej czoła. Wadą jego jest niemożliwość utrzymania stanu naprężonego wału, przy obniżeniu temperatury do 20°C , ponieważ rura kurczy się szybciej niż wał.

Sposób obróbki cieplnej części osiowosymetrycznych długowymiarowych, zaprezentowany w pracy [22], nie jest możliwy do zastosowania w przypadku stopniowanych części długowymiarowych, ponieważ każdy stopień półfabrykatu przy rozciąganiu odkształca się o różną wielkość. Prowadzi to do nierównomierności naprężeń szczątkowych i paczenia elementów gotowych przy ich eksploatacji.

Proponowany sposób obróbki cieplno – siłowej bazuje na dziedziczności technologicznej, przy obróbkach mechanicznej i cieplno – siłowej jak również na teorii zjawisk cieplno – sprężysto – plastycznych zachodzących w metalu.

Istota opracowanej technologii obróbki cieplno – siłowej wałów długowymiarowych stopniowanych polega na zmianie kolejności obróbki. W opracowanej technice, w odróżnieniu od znanych rozwiązań, w których odkształcenie plastyczne i naprężenia osiowe są równe wzdłuż całego półfabrykatu, a sam półfabrykat jest gładki, odkształcenia plastyczne oraz naprężenia robocze są przykładane po obróbce mechanicznej zgrubnej, kiedy jest już określony kształt wzdłużny i poprzeczny każdego stopnia półfabrykatu. Umożliwia to utrzymanie stałości i równości naprężeń wzdłuż długości i w dowolnym przekroju półfabrykatu. Rura cienkościenna (cylinder) jest ustawiana na półfabrykacie według sekcji, zaczynając od stopnia centralnego półfabrykatu, z ustaleniem tego stopnia z dwóch stron względem sekcji cylindra za pomocą czopów kulistych, a następnie kolejno są ustawiane pozostałe sekcje

Półfabrykat może mieć kształt złożony w przekrojach wzdłużnym i poprzecznym (rys. 4.27). Półfabrykat 1, z radiatorami 2 jest ustawiany w zmontowanym cylindrze wielowarstwowym 3, z otworami wzdłuż jego długości i średnicy. Każda warstwa cylindra 3 jest wypełniana wypełniaczem, który w zależności od niezbędnej prędkości chłodzenia cylindra, może mieć różny współczynnik przewodności cieplnej (np. wiór żeliwny, piasek rzeczny). Stopień centralny półfabrykatu 1, (o maksymalnym przekroju poprzecznym) jest ustalany względem czół sekcji centralnej cylindra 3, pokrywami – łożyskami wzdłużnymi 4 i czopami sferycznymi 5. Nakręcane są one na końce stopnia centralnego do oparcia o pokrywę – łożyska wzdłużne 4 i tym samym powstaje zamknięty kontur siłowy: półfabrykat – czopy sferyczne – pokrywki – łożyska wzdłużne – cylinder. Jeżeli półfabrykat ma piastę o średnicy znacznie większej od średnicy maksymalnej półfabrykatu, to sekcja cylindra, gdzie znajduje się piasta, jest montowana z elementów. Na lewą i prawą część półfabrykatu – na jego stopnie – są zakładane kolejno i montowane radiatory 2 (ich liczba i powierzchnia odprowadzania ciepła obliczana jest na podstawie średniego stopnia półfabrykatu, co umożliwia równomiernie ochładzanie wzdłużne półfabrykatu oraz w przekroju poprzecznym), sekcje 6 oraz pokrywki – łożyska wzdłużne 4 oraz zakręcane czopy sferyczne 5. Analogicznie jest przeprowadzany montaż pozostałych stopni półfabrykatu. W przypadku wyodrębnionych stopni półfabrykatu są określone powierzchnie przekrojów poprzecznych sekcji cylindra tak, aby stosunki powierzchni przekrojów poprzecznych sekcji cylindra, do odpowiednich powierzchni przekrojów poprzecznych półfabrykatu, były stałe i wzajemnie równe, na wszystkich stopniach półfabrykatu wału. Umożliwia to, w trakcie nagrzewania i chłodzenia, uzyskanie stałych naprężeń przy rozciąganiu i ściskaniu półfabrykatu – powstawania równych i stałych naprężeń szczałkowych, wzdłuż półfabrykatu oraz w jego w przekroju poprzecznym. Ze zmniejszeniem sztywności stopni półfabrykatu zwiększa się ich paczenie, w odniesieniu do odcinków sztywnych półfabrykatu, w związku z tym są one powiększane. Umożliwia to wybór strzałek ugięcia i przeprowadzenie osiowego odkształcenia plastycznego. W tym celu w pokrywach – łożyskach wzdłużnych 4 lub 7 (wykonywanych w kształcie czaszy, w celu regulowania wielkości odkształceń plastycznych), na ich średnicach zewnętrznych oraz w sekcjach cylindra są odpowiednio nacinane gwinty zewnętrzne i wewnętrzne. Pokrywa – łożysko wzdłużne 7 jest wkręcana w sekcję cylindra, na określoną wielkość (głębokość); umożliwia to usunięcie ugięcia i uzyskanie odpowiedniej wielkości odkształcenia plastycznego danego stopnia półfabrykatu. Zmontowane urządzenie umieszczane jest w piecu szybowym i nagrzewane, zgodnie z technologią obróbki cieplnej, do temperatury hartowania lub odpuszczania, wygrzewane w tej temperaturze do nagrzania półfabrykatu, w całej jego objętości.

Przy nagrzewaniu, cylinder ulega większemu wydłużeniu niż półfabrykat – jego współczynnik rozszerzalności cieplnej jest większy od współczynnika rozszerzalności cieplnej półfabrykatu. Dobierając wartości liczbowe dodatnich różnic współczynników rozszerzalności liniowej cylindra i półfabrykatu, uzyskuje się wielkość odkształcenia plastycznego półfabrykatu przekraczającą granicę proporcjonalności, to znaczy granicę prawa Hooke’a.

Odształcenie plastyczne osiowe za granicami proporcjonalności (prawo Hooke’a) przy nagrzewaniu likwiduje dziedziczność technologiczną, od operacji poprzednich obróbki mechanicznej, jednocześnie półfabrykaty ulegają prostowaniu. Jednak nierównomierność stygnięcia w stanie swobodnym prowadzi do powstawania nierównomiernych naprężeń szczątkowych. W celu likwidacji tego negatywnego zjawiska technologicznego cylinder 3 powinien stygnąć wolniej od półfabrykatu 1 (półfabrykat powinien stygnąć minimum pięciokrotnie szybciej niż cylinder), w zależności od czynnika chłodzącego: olej, woda, powietrze. W półfabrykacie obciążonym osiowo, przy stygnięciu, są kształtowane równomierne naprężenia szczątkowe wzdłużne oraz w przekroju poprzecznym, co wyklucza paczenie gotowych wyrobów w trakcie eksploatacji. Polepszeniu ulegają również charakterystyki wytrzymałościowe półfabrykatów.

Przykład. Cylinder wykonano ze stali X17CrNi16-2, wał – ze stali X30Cr13, wydłużenie temperaturowe określone jest z zależności:

$$\Delta L = \alpha_u (T^\circ) T^\circ L - \alpha_{cz} (T^\circ) T^\circ L ,$$

gdzie:

ΔL – różnica wydłużeń cylindra i części,

α – współczynnik rozszerzalności liniowej,

T° – temperatura nagrzewania,

L – długość cylindra i części.

Przy $L = 1000$ mm, $T^\circ = 850^\circ\text{C}$, $\alpha_u = 19 \cdot 10^{-6}$ 1/stop., $\alpha_{cz} = 10 \cdot 10^{-6}$ 1/stop., uzyskuje się wartość odkształcenia plastycznego $\varepsilon = 0,84\%$.

Czas chłodzenia jest określany przy następujących parametrach: średnica wału 60 mm, średnica wewnętrzna cylindra 210 mm, średnica zewnętrzna 310 mm, wypełniacz – piasek rzeczny, zmieszany z wiórami żeliwnymi, środek chłodzący – olej o temperaturze 30°C . Czas chłodzenia jest określany zgodnie z zależnością:

$$\tau = \frac{F_0 \cdot d^2 \cdot \gamma \cdot c}{4\lambda} \text{ s.}$$

Czas chłodzenia cylindra określany jest w wyniku rozwiązania równania:

$$\frac{\theta_0}{\theta'} = \Phi_0(B_i, F_0),$$

gdzie $F_0 = \frac{\alpha'}{r^2}$ – kryterium Fouriera, które jest funkcją temperatur względnych $\frac{\theta_0}{\theta}$, kryterium Biota:

$$B_i = \frac{B_0}{\lambda_{ekw.}}$$

gdzie: r – promień wału długowymiarowego (w danym przypadku wał przedstawiany jest jako cylinder nieskończenie długi),
 $\lambda_{ekw.}$ – ekwiwalentna przewodność cieplna ścianki cylindra wielowarstwowego,
 B_0 – współczynnik przekazywania ciepła od otoczenia do powierzchni ciała,
 γ – ciężar objętościowy materiału.

Obliczanie półfabrykatów stopniowanych jest prowadzone na podstawie warunku równości, powstających na wszystkich stopniach półfabrykatu naprężeń roboczych. Naprężenia na dowolnych stopniach półfabrykatu powinny być równe, to znaczy:

$$\sigma_n = \sigma_{n-1},$$

gdzie: σ_n, σ_{n-1} – naprężenia robocze w n i $(n-1)$ -tym stopniach półfabrykatu. Siły, w poszczególnych sekcjach cylindra można określić na podstawie zależności:

$$F_n^c = S_n^c \cdot E_n^c \cdot \Delta\alpha(T^\circ) \cdot T^\circ,$$

gdzie: S_n^c – powierzchnia przekroju poprzecznego stopnia cylindra,
 E_n^c – moduł sprężystości materiału cylindra,
 $\Delta\alpha(T^\circ)$ – różnica współczynników rozszerzalności liniowej materiału półfabrykatu i cylindra,
 T° – temperatura cylindra i półfabrykatu.

Naprężenia rozciągające osiowe w n i $(n-1)$ -tym przekrojach stopni półfabrykatu można określić na podstawie równania:

$$\frac{S_n^c \cdot E_n^c \cdot \Delta\alpha(T^\circ) \cdot T^\circ}{S_n^b} = \frac{S_{n-1}^c \cdot E_{n-1}^c \cdot \Delta\alpha(T^\circ) \cdot T^\circ}{S_{n-1}^b} = const,$$

gdzie: S_n^b i S_{n-1}^b – powierzchnie przekrojów półfabrykatu na n i $(n-1)$ -tym stopniach.

4.7. Podsumowanie

Przedstawiony sposób obróbki wibracyjnej wałów długowymiarowych o małej sztywności umożliwia zwiększenie ich stabilności kształtu i wymiarów, w okresie eksploatacji oraz: zmniejszenie poziomu naprężeń szczątkowych w objętości materiału w wyniku intensyfikacji procesów relaksacyjnych, bardziej równomierny wzdlużny rozkład osiowych naprężeń szczątkowych, w rezultacie kompleksowego oddziaływania wibracyjnego; zwiększenie wydajności poprzez zmniejszenie wielkości paczenia pooperacyjnego, jak również wykorzystanie na obróbkę czasu składowania międzyoperacyjnego.

Poprzez zmianę parametrów technologicznych obróbki (częstotliwość oddziaływania, twardość i bezwładność półfabrykatu) można sterować naprężeniami szczątkowymi, wzdluż każdej części półfabrykatu, przy tym należy kontrolować położenie i przemieszczenia stref nagrzania pierwotnego.

Obniżenie odkształcenia, w wyniku zmniejszenia technologicznych naprężeń szczątkowych, umożliwia zmniejszenie liczby operacji technologicznych, zwiększenie wydajności oraz niezawodności eksploatacyjnej wyrobu gotowego.

Badania technologii wytwarzania części o dużej dokładności pokazały, że błędy obróbki przy tradycyjnej kolejności operacji powstają z określoną cyklicznością. Każdy cykl składa się z operacji skrawania, obróbki cieplnej, prostowania i sezonowania. Po realizacji cyklu powstaje nowy rozkład błędów, związanych z biciem promieniowym. Występuje tak zwana dziedziczność technologiczna błędów położenia powierzchni, określana współczynnikami dziedziczności. Otrzymano zależności, określające błędy w końcowej obróbce związane z odkształceniem. W przedstawionej nowej kolejności obróbki oprawek, o dużej dokładności, nie ma wielu, niezbędnych w konwencjonalnych procesach, operacji cieplnych.

Rowki wpustowe powinny być rozmieszczone na stronie wypukłej. Przestrzeganie tych zaleceń umożliwia zmniejszenie błędów, powstających w poprzednich operacjach procesu technologicznego.

Zastosowanie opracowanego sposobu obróbki cieplno – siłowej stopniowanych części osiowosymetrycznych, umożliwia minimalizację wielkości ugięcia wyrobu i stabilizację poziomu naprężeń szczątkowych, wzdluż części na wszystkich stopniach, co z kolei powoduje zwiększenie dokładności eksploatacyjnej gotowych wyrobów, na przykład stopniowanych wałów długowymiarowych o małej sztywności i zwiększenie jakości wyrobów gotowych.

W kolejnym rozdziale przedstawiono modele matematyczne obróbki cieplno – siłowej.

5. MODELE MATEMATYCZNE PROCESU TECHNOLOGICZNEGO OBRÓBK CIEPLNO – SIŁOWEJ

5.1. Specyfika i wymagania dokładności obróbki wałów o małej sztywności

Anizotropia metalurgiczna samorzutnej zmiany kształtu (wymiarów) wyrobu obrabianego – wału, podobnie jak anizotropia ogólna właściwości fizycznych i mechanicznych jest niejednoznacznością mikro – i makrobudowy metalu rzeczywistego.

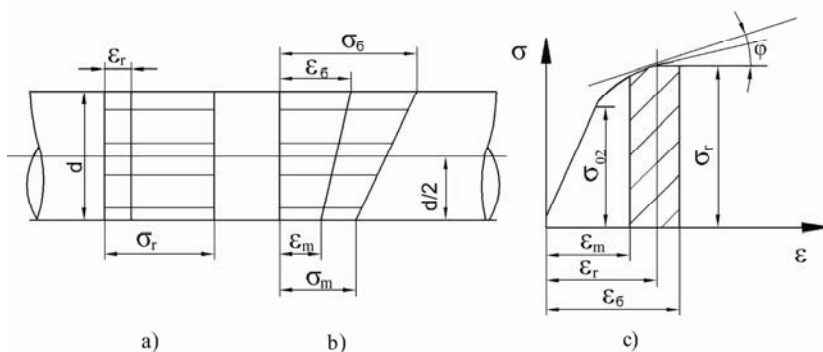
Paczenie się części o małej sztywności jest uzależnione od naprężeń szczątkowych, powstających w wyniku odkształceń plastycznych, o różnej wielkości, przy obciążeniu półfabrykatu. W trakcie walcowania półfabrykatów długowymiarowych można wyodrębnić dwie przyczyny powstawania i rozwoju naprężeń szczątkowych, czyli nierównomierność odkształceń plastycznych metalu przy jego zgnioście i niejednorodność pola temperaturowego podczas chłodzenia.

Znane są sposoby obniżenia poziomu naprężeń szczątkowych w częściach o małej sztywności [40, 50], w zależności od właściwości fizyko – mechanicznych: odkształcenia plastyczne, wyżarzanie, odpuszczanie. Jednym ze sposobów zachowania kształtu jest obróbka cieplna przy sztywnym ustaleniu położenia półfabrykatu, ponieważ w trakcie obróbki cieplnej, bez takiego ustalenia (na przykład przy odpuszczaniu), praktycznie prawie zawsze zmianie ulegają wymiary wału (ma miejsce relaksacja przy pełzaniu). Złożony stan mechaniczny materiału, w trakcie obróbki cieplnej wyrobów, naprężonych w połączeniu z różnorodnością występujących stanów fazowych, może spowodować następstwa technologiczne – zmianę wymiarów w trakcie kolejnych operacji mechanicznych lub składowania. Paczenie w stanie swobodnym ma miejsce również po obróbce cieplnej, początkowo często w określonym kierunku (zginanie, rozciąganie), przed zakończeniem przekształceń fazowych i odkształceń niesprężystych. Ustalenie wyrobu, przy hartowaniu także charakteryzuje się określoną specyfiką. Na przykład wtedy, kiedy ustalenie wyrobu hartowanego trwa dosyć długo, odkształcenia są niewielkie (w przypadku próbek 1–2% wielkości odkształcenia plastycznego powstającego przy obciążeniu). Odpuszczanie realizowane po hartowaniu, w szczególności przy występowaniu austenitu szczątkowego, gdy w materiale zachodzą przekształcenia fazowe (na przykład około 10%), zwiększa działania wtórne, które sumują się z poprzednimi (w tych samych kierunkach).

Ostateczne odkształcenie wyrobu modeluje się zależnością nieliniową w funkcji działających naprężeń.

W celu minimalizacji paczzenia – odkształceń wałów o małej sztywności, w trakcie obróbki cieplnej pod obciążeniem, należy utworzyć warunki do powstania odpowiedniego odkształcenia plastycznego lub przemiany fazowej. Na przykład w trakcie przemiany martenzytycznej stal traci wytrzymałość i ulega niewielkiemu odkształceniu (σ_{02} ulega zmniejszeniu od 12 do 14 razy). Przy temperaturach hartowniczych pole naprężeń szcztątkowych ulega redukcji do zera i jest jednorodne w przekroju; pełnej likwidacji ulega warstwa utwardzona przez zgmiot. Technologicznie trudne jest zachowanie takiego stanu materiału, przy chłodzeniu do temperatury otoczenia, ponieważ przy stygnięciu i zdjęciu obciążenia nie jest spełniony warunek zgodności odkształceń plastyczno – sprężystych. W tym przypadku celowe jest przeanalizowanie specyfiki technologicznej przygotowania wyrobu do obróbki cieplnej. Konieczne jest, aby parametry geometryczne półfabrykatu, po prostowaniu i obróbce mechanicznej, nie były większe od tolerancji na obróbkę kształtującą. Nierównomierność odkształceń w przekroju i wzdłuż półfabrykatu jest uwarunkowana niedokładnością wykonania (szczególnie wielkością mimośrodów półfabrykatu – niepokrywania się osi technologicznej i teoretycznej). Przy obciążeniu brak symetryczności w przekroju poprzecznym powoduje wytworzenie momentu zginającego, w wyniku powstawania odkształceń.

Rozpatrzono kolejne działania (procesy) technologiczne, przy zastosowaniu odkształcenia osiowego, w przypadku materiału nagrzanego i bez jego nagrzewania. Każda operacja może występować jako samodzielna, w zależności od przeznaczenia wyrobu. Istota pierwszego procesu technologicznego polega na tym, że przy rozciąganiu, wszystkie siły wzdłużne, w pierwszym przybliżeniu, są równomierne; powstają takie same naprężenia (rys. 5.1a). Wartość naprężeń roboczych σ_r można określić z diagramu naprężeń według wielkości odkształcenia względnego ϵ_p (rys. 5.1c).



Rys. 5.1. Odkształcenia i naprężenia przy obciążeniu osiowym

Na odcinkach skrzywionych pomimo rozciągania ma miejsce również prostowanie półfabrykatu, w wyniku czego odkształcenia względne warstw wzdłużnych tych odcinków są różne. Zwykle promień krzywizny nie jest mniejszy niż 2–30 krotna wysokość przekroju poprzecznego półfabrykatów walcowanych, w tym przypadku charakter rozkładu odkształceń w przekroju wału przy prostowaniu można przyjąć taki, jak przy zginaniu belki prostoliniowej. W tym przypadku rozkład odkształceń względnych, wzdłuż wysokości półfabrykatu, jest zgodny z zależnością liniową (rys. 5.1b), a ich wartość najmniejszą i największą w warstwach skrajnych zewnętrznej i wewnętrznej wału można, przedstawić jako:

$$\varepsilon_{\delta} = \varepsilon_r + \frac{d}{2r_{sk}}, \quad \varepsilon_m = \varepsilon_r - \frac{d}{2r_{sk}},$$

gdzie r_{sk} – promień krzywizny półfabrykatu.

Wartości wydłużeń względnych znajdują się w zakresie, przedstawionym na diagramie naprężeń strefą $\varepsilon_{\delta} - \varepsilon_m$ (rys. 5.1c). Można przyjąć, że moduł styczny sprężystości podłużnej E_y jest stały. W tym przypadku, rozkład naprężeń wzdłuż wysokości wału również odpowiada zależności liniowej (rys. 5.1, b). Zależność naprężeń w strefie odkształceń względnych można zapisać jako:

$$\sigma_{\delta} = \sigma_r + \frac{E_y}{E} v, \quad \sigma_m = \sigma_r - \frac{E_y}{E} v, \quad (5.1)$$

gdzie v – współrzędna naprężeń od centralnej warstwy półfabrykatu.

Siłę rozciągającą i moment zginający mogą wyznaczyć z zależności:

$$F_{roz} = \sigma_r \cdot S, \quad M = \frac{E_y \cdot v}{E \cdot J}. \quad (5.2)$$

W wyniku nierównomiernego rozkładu naprężeń, według średnicy na odcinkach skrzywionych, działa moment sił wewnętrznych, który powinien być równoważony momentem zginającym zewnętrznym. Moment ten powstaje dzięki przemieszczeniu środka ciężkości przekroju poprzecznego odcinka wału, w stosunku do linii działania siły rozciągającej. W tym przypadku moment zginający od sił zewnętrznych jest równy $M_{zewn} = F_{roz} \cdot y_e$, gdzie y_e – jest wielkością bezwzględną części skrzywienia ostatecznego, którą można przedstawić przy pomocy znanych wielkości:

$$y_e = \frac{J \cdot E_y}{r \cdot S \cdot \sigma_r}. \quad (5.3)$$

Wielkość e jest tylko częścią ostatecznego, pozostałego po prostowaniu naprężenia. Podstawowa część skrzywienia ostatecznego powstaje przy zdjęciu zewnętrznego obciążenia rozciągającego, w wyniku relaksacji naprężeń szczałkowych i skutków niesprężystych, to znaczy skrzywione wcześniej odcinki częściowo odbudowują krzywiznę, ponieważ w nich oprócz siły

rozciągającej jest zdejmowany również moment zginający powstający od tych sił.

Na podstawie przeprowadzonych badań analitycznych procesów odkształcenia osiowego wału można wyciągnąć wniosek, że ostateczna krzywizna wyrobu zależy od skrzywienia początkowego $\frac{1}{r_{kr}}$, od właściwości

fizyko – mechanicznych materiału i technologii wykonania. W związku z tym należy odnotować kilka podejść do projektowania procesów technologicznych obróbki wałów o małej sztywności, w zależności od materiału półfabrykatu. Gdy materiał półfabrykatu ma charakterystykę rosnącą, to przy określaniu zewnętrznego obciążenia rozciągającego strefa wydłużeń względnych $\varepsilon_\delta - \varepsilon_m$, powinna odpowiadać odcinkowi diagramu $\sigma - \varepsilon$, o minimalnym module stycznym sprężystości podłużnej. W przypadku stali niskowęglowych jest to strefa plastyczności ($E_y = 0$). Przy określaniu odkształcenia osiowego, materiałów skłonnych do umacniania, strefa $\varepsilon_\delta - \varepsilon_m$ na diagramie $\sigma - \varepsilon$ powinna być umiejscowiona po odcinku początkowym, o stromym wznoszeniu się krzywizny naprężeń. Stałe wysokowęglowe i wysokostopowe charakteryzuje strome wznoszenie się naprężeń na odcinku wydłużenia równomiernego, w wyniku dużych wartości modułu stycznego sprężystości podłużnej, wymagają dużych obciążeń osiowych, co powoduje, że odkształcenia znacznie przekraczając granicę wytrzymałości materiału.

Przedstawione podejście technologiczne, do poprawienia krzywizny części osiowosymetrycznych, jest do przyjęcia jako proces obróbki zgrubnej, wstępnej, w przypadku wałów o stosunku $\frac{L}{d} = 100$ i nie przejawiających skłonności do umacniania.

W celu zwiększenia dokładności i stabilności kształtu geometrycznego części o małej sztywności opracowano sposób, łączący w sobie proces prostowania i obróbki cieplnej [166, 170]. Istota tej metody polega na tym, że odkształcenie osiowe – rozciąganie jest przykładane do wału przy nagrzewaniu (temperatura hartowania), a przy stygnięciu wyrób jest ustalany odnośnie urządzenia, przy czym prędkość stygnięcia wału jest kilkakrotnie większa niż urządzenia (rys. 5.2a). Na rys. 5. 2 i 5.3 cyfrą 1 oznaczono urządzenie, a 2 –wyrób oraz charakterystyki przy nagrzewaniu i chłodzeniu.

Przy obliczeniach teoretycznych założono, że krzywizna osi półfabrykatu opisywana jest sinusoidą:

$$y = \frac{\alpha \cdot \sin \pi \cdot x}{L}, \quad (5.4)$$

a wielkość zmiany długości półfabrykatu określano zależnością (rys. 5.2a):

$$\Delta L = \frac{\pi^2 \cdot y_{\alpha}^2}{4L}, \quad (5.5)$$

gdzie α – strzałka ugięcia początkowa.

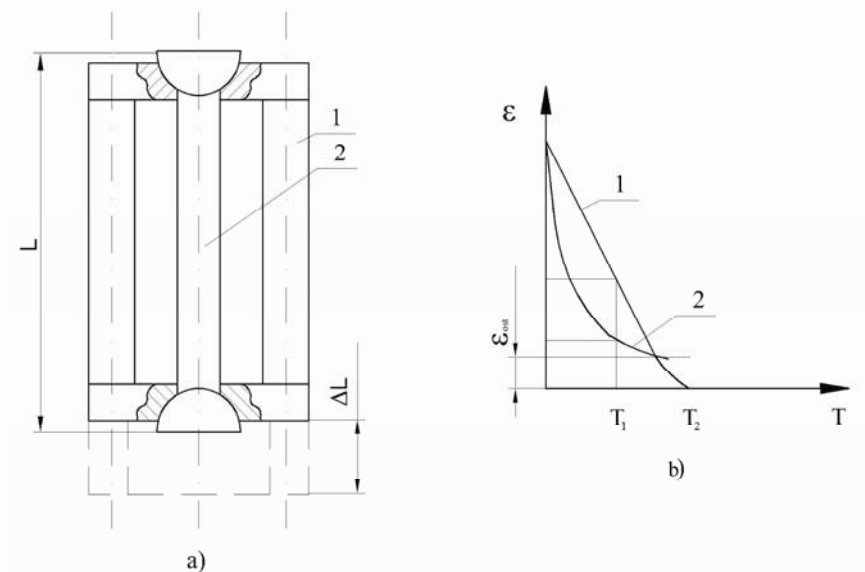
Przy rozciąganiu półfabrykatu o krzywiznę początkową, nie większej niż 1% na długości L , wielkość odkształceń $y_{\alpha 1}$ jest powiązana z krzywizną początkową y_{α} zależnością:

$$\alpha_1 = \frac{y_{\alpha}}{1 + \frac{F_{roz}}{F_{kr}}}, \quad (5.6)$$

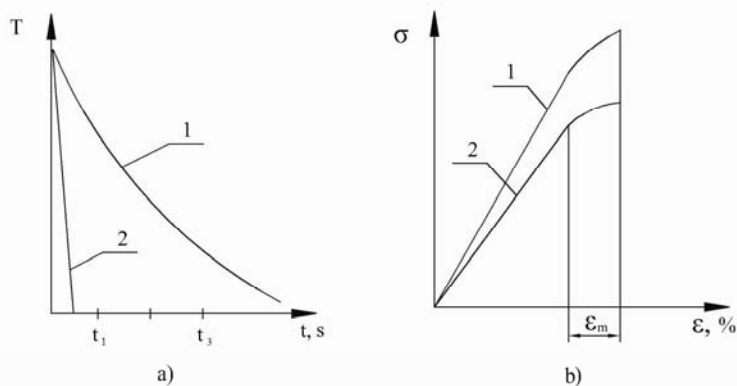
z której można wyznaczyć wielkość obciążenia osiowego, niezbędnego do zmniejszenia ugięcia

$$F_{roz} = F_{kr} \cdot \frac{y_{\alpha}}{y_{\alpha 1} - 1}, \quad (5.7)$$

gdzie F_{kr} – siła osiowa krytyczna.



Rys. 5.2. Schemat uproszczony realizacji technologicznej metody obróbki – a), charakterystyki przy nagrzewaniu i chłodzeniu – b)



**Rys. 5.3. Zależności temperatury chłodzenia urządzenia i półfabrykatu – a),
zależność naprężeń i wydłużeń względnych – b)**

Zależność naprężeń od wydłużeń względnych może być stosowana pod warunkiem spełnienia nierówności (5.8)

$$\lambda \geq \left(\pi^2 \cdot \frac{E}{\sigma_{02}} \right)^{1/2}, \quad (5.8)$$

jeżeli $\lambda < 100$, to osiowa siła rozciągająca powinna być określana z zależności:

$$F_{roz} = E \cdot S_{pół} \cdot \frac{\Delta L}{L}, \quad (5.9)$$

gdzie $S_{pół}$ – pole przekroju poprzecznego półfabrykatu.

Na podstawie danych obliczeniowych można stwierdzić, że do osiągnięcia granicy proporcjonalności materiału (na przykład stal nierdzewna) półfabrykatu, o średnicy 60 mm i długości 3000 mm, w przypadku którego $\sigma_{02} = 200 \text{ N/mm}^2$, konieczne jest przyłożenie siły osiowej w granicach $6 \cdot 10^5 \text{ N}$. Proces odkształcenia osiowego, oprócz wymienionych wad, ma więc jeszcze jedną – niezbędny jest napęd o dużej mocy. W proponowanych technikach znajdują zastosowanie podstawy fizyczne procesu obróbki cieplnej, kiedy to odkształcenie osiowe półfabrykatu jest realizowane w wyniku doboru współczynników rozszerzalności cieplnej wyrobu i urządzenia, jak również ich długości (półfabrykat umieszczany jest w urządzeniu i mocowany końcami na czołach – rys. 5.2a). Różnica wydłużeń półfabrykatu i urządzenia określana jest zgodnie z zależnością:

$$\Delta L = \alpha_{urz}(T^\circ) \cdot T^\circ \cdot L_{urz} - \alpha_{pół}(T^\circ) \cdot T^\circ \cdot L_{pół}. \quad (5.10)$$

Analiza zależności (rys. 5.7a) wykazuje, że ze wzrostem temperatury nagrzewania różnica wydłużeń wzrasta nieliniowo. W celu stabilizacji geometrii wyrobu, przy obróbce cieplnej w urządzeniu, należy wytworzyć wydłużenie sumaryczne nie mniejsze niż 1% jego długości.

Przy nagrzewaniu półfabrykat ulega wydłużeniu o:

$$\Delta L = (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_{02} + \Delta_3) \cdot L \cdot K_1, \quad (5.11)$$

gdzie: odpowiednie wydłużenia spowodowane: Δ_1 – początkową krzywizną półfabrykatu, Δ_2 – różnicą współczynników rozszerzalności cieplnej materiałów, Δ_{02} – umownym przedziałem proporcjonalności, przy $T^\circ = 20^\circ\text{C}$, Δ_3 – wydłużeniem względnym półfabrykatu, $K_1 = S_{\text{pół}} + S_{\text{pół}} / S_{\text{prz}}$ – współczynnik uwzględniający ściśnięcie przyrządu.

W proponowanym rozwiązaniu wał odkształca się przy nagrzewaniu z założoną prędkością, zgodnie z technologią obróbki cieplnej. Urządzenie wydłuża się w większym stopniu niż wyrób, proporcjonalnie do różnicy współczynników rozszerzalności liniowej, a prędkość chłodzenia od 1,5 do 3 razy jest mniejsza od prędkości chłodzenia wału.

Umożliwia to stabilizację obciążenia osiowego na początku chłodzenia i łagodne zdjęcie obciążenia. Przy obliczaniu typowych procesów należy rozwiązać problem niestacjonarnej przewodności cieplnej, to znaczy określić zależność zmiany temperatury i ilości przekazywanego ciepła w czasie, w dowolnym punkcie ciała. Równanie różniczkowe przewodności cieplnej w przypadku ciał twardych ma postać:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (5.12)$$

W celu rozwiązania analitycznego równania (5.12) należy wyznaczyć warunki brzegowe: 1) początkowy rozkład temperatury w materiale; 2) oddziaływanie na powierzchnię środowiska zewnętrznego, co można określić na trzy sposoby: a) temperaturą powierzchni, b) ilością ciepła przechodzącego przez powierzchnię, c) temperaturą otoczenia zewnętrznego i współczynnikiem przekazywania ciepła γ . Zgodnie z prawem Newtona:

$$dQ = \gamma(T_{\text{prz}}^\circ - T_c^\circ) dS, \quad (5.13)$$

gdzie: dQ – ilość ciepła,

$T_{\text{prz}}^\circ, T_c^\circ$ – temperatura ścianki przyrządu i cieczy,

dS – jednostka powierzchni,

b – współczynnik przewodności temperaturowej.

Wynikiem rozwiązania równania (5.12) jest funkcja, która powinna jednocześnie spełniać warunki brzegowe. Szukana funkcja zależy od dużej liczby parametrów, które można zgrupować w dwa bezwymiarowe kompleksy:

– kryterium Bio – $B_i = \frac{\gamma \delta_p}{\varphi}$,

– kryterium Fouriera – $F_0 = \frac{b \cdot t}{\delta_p}$,

gdzie: φ – współczynnik przewodności cieplnej,
 δ_p – grubość ścianki przyrządu, t – czas chłodzenia.

Na podstawie drugiego twierdzenia podobieństwa, szukana funkcja w postaci temperatury bezwymiarowej $\frac{Q}{Q'}$, w różnych punktach może być przedstawiona jako:

$$\frac{Q}{Q'} = \Phi(B_i, F_0, L),$$

gdzie: $L = \frac{x}{\delta} L$, x – współrzędne strefy nagrzewania.

Wął można przedstawić jako nieskończenie długi cylinder o promieniu R , w tym przypadku równanie różniczkowe przewodności cieplnej ma postać:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = b \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + \frac{\partial Q}{t \partial t} \right). \quad (5.14)$$

Warunki brzegowe: przy $r = R$; $\frac{\partial Q}{\partial t} = \gamma \frac{Q}{\varphi_c}$.

Warunki początkowe: przy $t = 0$; $Q = Q'$.

Na wykresie zależności $\varepsilon = \psi(T^\circ)$ (rys. 5.2b) pokazano charakter zależności odkształcenia przyrządu i wału przy chłodzeniu, gdzie ε_{ost} – odkształcenie półfabrykatu o wielkość ε_{pt} (rys. 5.3b), w przypadku różnicy współczynników rozszerzalności liniowej.

Jeżeli współczynniki rozszerzalności cieplnej półfabrykatu i przyrządu są jednakowe, to odkształcenie osiowe może być (zgodnie z obliczeniami) uzyskane jako różnica długości przyrządu i półfabrykatu lub przez odpowiedni dobór prędkości ich chłodzenia (rys. 5.3a).

Naprężenia rozciągające osiowe przy obróbce cieplnej są określane z zależności:

$$\sigma_r = \alpha_T \cdot \Delta T^\circ \cdot E \cdot \frac{S_{pół}}{S_{prz}}, \quad (5.15)$$

gdzie: ΔT – różnica temperatury półfabrykatu i przyrządu przy chłodzeniu,

$$\alpha_T = \alpha(T) + T \frac{d\alpha}{dT} \quad - \text{rzeczywista różnica współczynników}$$

rozszerzalności cieplnej.

Jeżeli przy hartowaniu półfabrykatu (wał), w kierunku wzdłużnym, jest on stopniowany, to warunki równości naprężeń roboczych, na wszystkich stopniach półfabrykatu, są określone z zależności:

$$S_{pól}^n \cdot E_{pól}^n \cdot \alpha(T^\circ) \cdot \frac{T^\circ}{S_{prz}^n} = S_{pól}^{n-1} \cdot E_{pól}^{n-1} \cdot \frac{\alpha(T^\circ)}{F_{prz}^{n-1}}, \quad (5.16)$$

gdzie: $S_{pól}^n$, S_{pl}^{n-1} , S_{prz}^n , S_{prz}^{n-1} – płaszczyzny przekrojów poprzecznych półfabrykatu i przyrządu w „ n ” i „ $n-1$ ” stopniach.

W pierwszym etapie chłodzenia wału (półfabrykatu) w przyrządzie, to znaczy, kiedy różnica temperatur półfabrykatu i przyrządu jest maksymalna, wielkość małych odkształceń ostatecznych półfabrykatu jest sumą odkształceń sprężystych ε_y , plastycznych ε_{pl} i temperaturowych ε_T :

$$\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_y + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_T, \quad (5.17)$$

gdzie $\varepsilon_T = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_T(T^\circ) dT$.

Przy opracowanej technologii obróbki cieplnej, z przyłożeniem odkształceń osiowych, naprężenia pozostałe od operacji poprzednich ulegają likwidacji [76], niezależnie od właściwości materiału. Jednak przy chłodzeniu wału rozciągniętego, zamocowanego w przyrządzie powstają nowe naprężenia rozciągające, równomiernie rozłożone w przekroju półfabrykatu. Poziom naprężen końcowych jest określany zależnością:

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon_y + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_T). \quad (5.18)$$

Przy chłodzeniu powierzchnia na zewnątrz półfabrykat ostyga szybciej, niż wewnątrz i naprężenia w warstwach wierzchnich będą przeciwne w stosunku do naprężeń wewnątrz półfabrykatu. Przy ochłodzeniu pełnym, znaki naprężeń ulegną zamianie, główna zaleta proponowanego przedsięwzięcia technologicznego polega na tym, że w zewnętrznych warstwach, naprężenia będą tego samego znaku, co wyklucza paczenie się części.

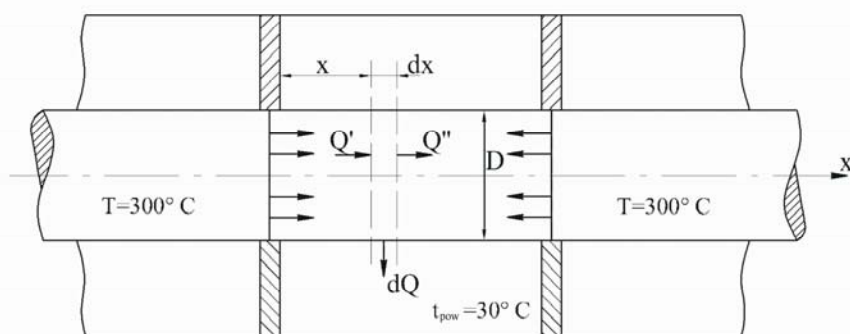
Dalsza obróbka, przy równomiernym zdejmowaniu metalu odnośnie do osi wału, również, nie spowoduje paczenia.

Przedstawione w tym rozdziale zależności są prawidłowe przy założeniu liniowości modelu. Nieliniowość, to znaczy odkształcenie plastyczne przy hartowaniu z odkształceniem osiowym nie przekracza 1%, co umożliwia aproksymację tej zależności z wystarczającą w praktyce dokładnością.

Proces hartowania jest początkiem technologii obróbki cieplnej, a więc procesy relaksacji i inne następstwa tutaj nie są rozpatrywane.

Kontrola czynna stanu materiałów, w procesie nagrzewania i odkształcenia półfabrykatu, umożliwia sterowanie naprężeniami szczątkowymi w ciągu całego czasu obróbki.

Urządzenie do realizacji sposobu sterowania procesem odkształcenia plastycznego, wałów o małej sztywności (rys. 5.4) [11], zawiera piec szybowy 1, z sekcijnymi elektrycznymi elementami grzewczymi 2. Obrabiany półfabrykat jest ustawiany w pryzmie i umieszczany w piecu. Wstępnie na półfabrykacie są ustawiane żebra, rozdzielające przestrzeń pieca szybowego na komory, przy czym każda komora ma wejście i wyjście powietrza chłodzącego.



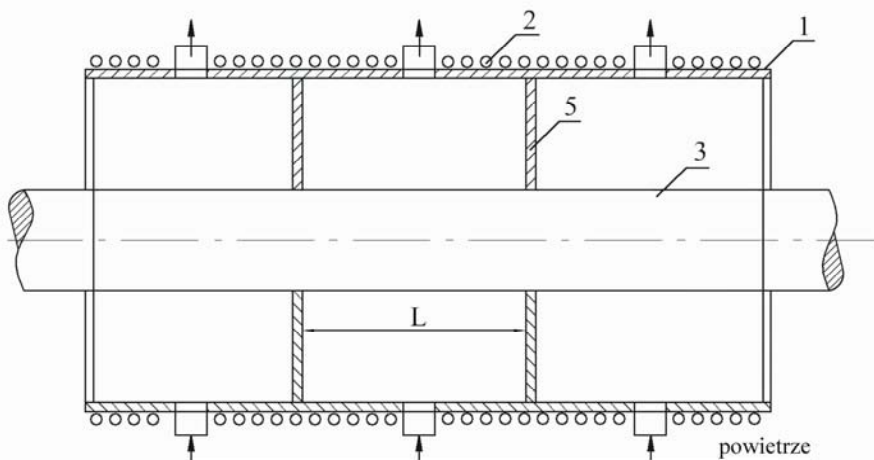
Rys. 5.4. Schemat urządzenia do sterowania procesem odkształceń plastycznych wału o małej sztywności

Po ustawieniu na sztywno półfabrykatu, włączane są elementy grzewcze w celu nagrzania półfabrykatu. Wartość bieżąca temperatury jest określana przy pomocy termopar, znajdujących się w każdej komorze. Po osiągnięciu temperatury półfabrykatu $T^{\circ}=300^{\circ}\text{C}$ jest włączany system oddziaływania osiowego (rozciągania) na półfabrykat.

Właściwości fizyko – mechaniczne wzdłuż półfabrykatu nie są jednakowe, tak więc na różnych jego odcinkach czas osiągnięcia granicy plastyczności może być inny. Rejestracja miejsca naruszenia proporcjonalności wydłużenia osiowego jest wykonywana przy pomocy czujnika pneumatycznego (na rys. 5.4 umownie niepokazany).

Elektryczne sekcje grzewcze, na odcinku, na którym występuje strefa umocnienia plastycznego, są odłączane i jest włączana sprężarka podająca powietrze chłodzące.

Odcinek półfabrykatu chłodzony powietrzem osiąga temperaturę $T^\circ = 200^\circ\text{C}$, po czym znowu następuje nagrzewanie po odłączeniu podawania powietrza. Na rys. 5.5 jest przedstawiony schemat obliczeniowy do określania czasu ochłodzenia odcinka i jego długości.



Rys. 5.5. Schemat obliczeniowy do określania długości odcinka oraz czasu jego chłodzenia

Materiał półfabrykatu: stal X10CrNi18-8, masa właściwa – $\gamma = 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$,
współczynnik przewodności cieplnej – $\lambda_s = 14,5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$, pojemność cieplna
– $C = 0,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$, współczynnik przekazywania ciepła od powietrza do wału
– $\psi_B = 6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$, współczynnik przewodności cieplnej – $\mu = 5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$.

W dalszym ciągu rozpatrzono przekazywanie ciepła przez sworzeń cylindryczny, którego przekrój poprzeczny $S = \pi \cdot R^2$, a obwód przekroju $U = 2\pi \cdot R$, (R – promień wału).

Temperatura sworznia zależy funkcjonalnie tylko od jego długości, to znaczy

$$T^\circ = f(x).$$

Określono zasadę zmiany temperatury wzdłuż sworznia i ilość ciepła, przekazywanego przez sworzeń przy trybie stacjonarnym.

W odległości x od początku odcinka (rys. 5.5) wyodrębniano element dx , w przypadku którego zapisywano równanie bilansu cieplnego:

$$Q' - Q'' = dQ.$$

Zgodnie z zasadą Fouriera:

$$Q' = -\lambda_{prz} \cdot S \frac{dT^\circ}{dx},$$

$$Q'' = -\lambda_{prz} \cdot S \left(\theta + \frac{dT^\circ}{dx} \cdot dx \right),$$

a więc

$$Q' - Q'' = dQ = \lambda_{prz} \cdot S \frac{d^2 T^\circ}{dx^2} \cdot dx, \quad (5.19)$$

a z drugiej strony

$$dQ = \alpha_B \cdot U \cdot \theta \cdot dx. \quad (5.20)$$

Porównując (5.19) i (5.20) otrzymano:

$$\frac{d^2 T^\circ}{dx^2} = \frac{\psi_B \cdot U \cdot T^\circ}{\lambda_{prz} \cdot S} = m^2 \cdot \theta, \quad (5.21)$$

gdzie $m = \sqrt{\frac{\psi_B \cdot U}{\lambda_{prz} \cdot S}} \left[\frac{1}{m} \right]$

Rozwiązanie równania (5.21) można zapisać w postaci:

$$T^\circ = C_1 \cdot e^{mx} + C_2 \cdot e^{-mx}.$$

Wartości współczynników C_1 i C_2 są wyznaczone z warunków brzegowych. W przypadku sworznia o nieskończonej długości i przekroju okrągłym:

$$\frac{U}{S} = \frac{4}{D},$$

$$K_1 = x \cdot m = x \sqrt{\frac{\psi_B \cdot U}{\lambda_{prz} \cdot S}} = x \sqrt{\frac{6 \cdot 4}{0,045 \cdot 14,5}} = 6x,$$

$$T^\circ = T_0^\circ \cdot e^{-mx},$$

gdzie x – współrzędna bieżąca,

$T^\circ = T^\circ - T_{oddz}$ – temperatura otoczenia,

$T_0^\circ = T_0^\circ - T_{pow}$ – temperatura początkowa,

T° – temperatura bieżąca, $T_0^\circ = 300^\circ C$, $T_{pow}^\circ = 30^\circ C$.

Równanie krzywej temperaturowej przy danych warunkach jest następujące:

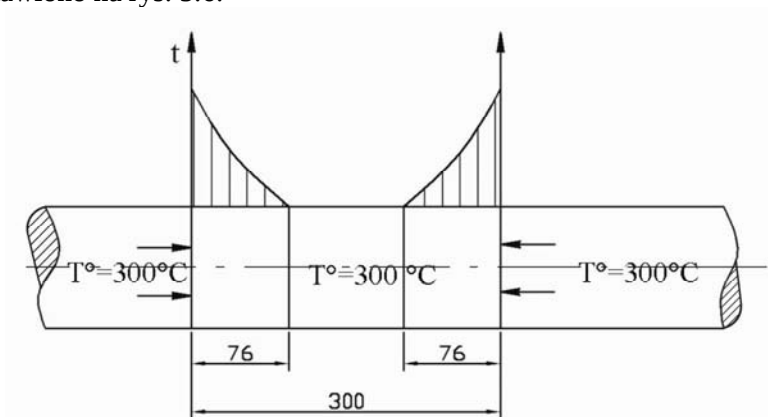
$$T^\circ = 270 \cdot e^{-6x}. \quad (5.22)$$

Z równania (5.22) jest wyznaczana długość odcinka x , na którym zostanie ustalona temperatura $T^\circ = 200^\circ$:

$$T^\circ = T^\circ - T_{\text{pow}} = 260^\circ - 30^\circ = 170^\circ\text{C},$$

$$\frac{170}{270} = \frac{1}{6x}; e^{6x} = \frac{270}{170} = 1,58; 6x = 0,45; x = 0,076 \text{ m} = 76 \text{ mm}.$$

Schemat obliczeniowy do wyznaczania czasu chłodzenia odcinka przedstawiono na rys. 5.6.



Rys. 5.6. Schemat obliczeniowy do określania czasu chłodzenia odcinka

Ilość ciepła przekazywanego przez przekrój:

$$Q = \lambda_u \cdot S \cdot m \cdot T_0 = 14,5 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,045^2}{4} \cdot 6 \cdot 270 = 37,3 \text{ J}.$$

Czas chłodzenia odcinka wału

Kryterium

$$B_i = \psi_B \cdot \frac{R}{\lambda_u} = \frac{6 \cdot 0,0225}{14,5} = 0,0093,$$

$$F_0 = \mu \cdot \frac{\tau}{\delta_p^2} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\tau}{0,0225^2} = 0,0098 \tau.$$

Stosując zależność w przypadku małych wartości B_i otrzymano:

$$T = T' \cdot e^{-2B_i \cdot F_0}, \quad (5.23)$$

gdzie: $T^\circ = 200^\circ - 30^\circ = 170^\circ\text{C}$, $T' = 300^\circ - 30^\circ = 270^\circ\text{C}$.

Z zależności (5.23) jest określany czas chłodzenia odcinka wału

$$t = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta^2 \cdot \ln \frac{\theta'}{\theta}}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0093} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,0225^2 \cdot \ln \frac{270}{170}}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0093} = 0,025 \text{ h} = 90 \text{ s}.$$

Ilość ciepła, odprowadzanego przez powietrze w czasie pełnego ochłodzenia odcinka wału o długości $L = 300 \text{ mm}$ przy $T' = 100^\circ\text{C}$, wyznacza się jako:

$$Q' = c \cdot \gamma \cdot V \cdot T',$$

$$V = \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 0,045^2}{4} \cdot 0,3 = 4,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3,$$

$$Q' = 0,5 \cdot 10^3 \cdot 7900 \cdot 100 \cdot 4,75 \cdot 10^{-4} = 187625 \text{ J}.$$

Ilość ciepła przepływającego przez przekrój z gorącej strony w czasie $t = 90 \text{ s}$ jest określana z zależności:

$$Q_{\text{prz.}} = 2 \cdot 37,3 \cdot 90 = 6714 \text{ J}.$$

5.2. Analiza teoretyczna i modele matematyczne procesów obróbki cieplno – siłowej

W przypadku dowolnego odkształcenia, naprężenia i odkształcenia powinny być przedstawione w postaci tensorów drugiego rzędu i wtedy można je przedstawić jako układ równań liniowych, wyrażających każdą składową tensora naprężeń przez składową tensora odkształcenia i odwrotnie. W danym przypadku to uogólnienie doprowadziłoby tylko do niepotrzebnego skomplikowania zagadnienia, dlatego zastosowano zależność:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

lub

$$\varepsilon = j \cdot \sigma,$$

gdzie: $E = \frac{1}{j}$, j – współczynnik podatności $\left[\frac{\text{mm}^2}{\text{N}} \right]$.

Przy takim podejściu jest zakładany prosty sposób odkształcenia – odkształcenie postaciowo czyste lub odkształcenie jednoosiowe. Niesprężystość materiału można określić trzema warunkami: każdej wartości naprężenia odpowiada jedna równoważna wartość odkształcenia lub odwrotnie; równoważna wartość wyjściowej wielkości osiągana jest tylko po upływie odpowiedniego czasu – równowaga osiągana jest w zakresie od mikrosekund do bardzo dużych odcinków czasu; związek między odkształceniem i naprężeniem jest liniowy. Warunki pierwszy i trzeci jest to powtórzenie warunków sprężystości idealnej.

W proponowanym sformułowaniu zagadnienia, sens liniowości obejmuje następujące twierdzenie: jeżeli zmiana naprężenia w czasie $\sigma_1(t)$ powoduje odkształcenie $\varepsilon_1(t)$ i jeżeli naprężenie $\sigma_2(t)$ prowadzi do odkształcenia $\varepsilon_2(t)$, to $\sigma_1(t) + \sigma_2(t)$ powoduje odkształcenie $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$.

Wiadomo, że układem termodynamicznym jest dowolna substancja, która w przypadku wielu nieskończenie małych zmian parametru zewnętrznego może przyjmować wiele stanów równoważnych. Dlatego pierwszemu warunkowi niesprężystości, zawierającemu wymagania jednoznaczności, równoważnego stosunku między naprężeniami i odkształceniem, w związku z pełną zdolnością do odbudowy, odpowiadają wszystkie materiały, które odpowiadają określeniu termodynamiczne ciała twarde. Drugi warunek niesprężystości oznacza, że w odpowiedzi na zmianę przyłożonego naprężenia mechanicznego, w celu ustalenia równowagi w materiale niesprężystym, potrzebny jest pewien czas.

Samonastawianie układu termodynamicznego w czasie na nowy stan równowagi, w odpowiedzi na zmianę parametru wejściowego, nazywa się właśnie relaksacją. Jeżeli oddziaływaniem wejściowym jest naprężenie, to relaksacja jest zależnym od czasu ustaleniem stanu wartości równoważnej parametru wyjściowego – odkształcenia (lub odwrotnie). Zewnętrznym przejawem relaksacji jest nastrojenie parametrów wewnętrznych do nowych wartości równoważnych. Z punktu widzenia teorii automatycznej regulacji parametry wewnętrzne układu wpływają na stronę ilościową procesu przejściowego, czyli uważa się, że relaksacja jest procesem przejściowym. Między σ i ε istnieje nie tylko bezpośredni związek czysto sprężysty, ale również powiązanie pośrednie poprzez parametr wewnętrzny. W miarę relaksacji parametru wewnętrznego do wartości równowagi, odkształcenie ε dąży również do odpowiedniej wartości nie momentalnie, lecz określoną prędkością (zmiana momentalna odpowiada przypadkowi sprężystości w postaci czystej).

Relaksacja niesprężysta jest w istocie właściwością termodynamiczną, uwarunkowaną powiązaniem σ i ε , z określonymi parametrami wewnętrznymi, które mogą ulegać zmianie do wartości równowagi w wyniku procesów kinetycznych (na przykład dyfuzji). Zewnętrznym przejawem takiej relaksacji wewnętrznej są zależne od czasu właściwości, dotyczące odkształcania.

Paczenie półfabrykatu jest funkcjonalnie powiązane z niejednorodnością odkształcenia plastycznego i pola temperaturowego oraz różnym charakterem odkształceń plastycznych i sprężystych przy zdejmowaniu obciążenia. Analogiczny proces zachodzi także z naprężeniami szczątkowymi, ponieważ ich relaksacja zaczyna się niejednocześnie i w różnych częściach wyrobu, zarówno w przekroju poprzecznym jak i wzdłużnym.

Opracowane sposoby stabilizacji kształtu geometrycznego części o małej sztywności [46, 50] bazują na odkształceniu osiowym przy odpuszczaniu – sterowaniu nimi przy nagrzewaniu i odpuszczaniu. Celowe jest więc

rozpatrzenie trzech modeli sterowania: odkształceniem sprężysto – plastycznym; stabilizacją obciążeń zewnętrznych i procesem zdejmowania obciążenia. Taki umowny podział jest poprawny w przypadku rozpatrywania modelu prętowego, kiedy analizowane są naprężenia pierwszego rzędu.

W modelu pierwszym naprężenia $\sigma(t)$ i odkształcenia $\varepsilon(t)$ ulegają zmianie w czasie; sterowanie realizowane jest według dwóch parametrów σ i T° , kontrolowana jest wielkość wyjściowa $\varepsilon(t)$; w drugim $\sigma = const$ (podtrzymuje system sterowania automatycznego), zmianie ulega $\varepsilon(t)$; w modelu trzecim naprężenie σ jest utrzymywane na stałym poziomie, sterowanie jest realizowane według parametru $\varepsilon(t)$, z uwzględnieniem zmiany temperatury stygnięcia T° .

Do jakościowego zbadania procesów, niezbędne są równania, opisujące układ dynamiczny obróbki cieplno – siłowej, jako obiekt sterowania.

W danym przypadku zastosowano znaną metodykę [164, 165] podziału obiektu na człony dynamiczne – tab. 5.1.

W celu scharakteryzowania stanu członu dynamicznego, jako współrzędną uogólnioną na wejściu członu przyjęto $\sigma_1(\varepsilon)$, a na wyjściu $\varepsilon_1(\sigma)$, i określono je odpowiednio jako wejściowa i wyjściowa wielość członu, o działaniu ukierunkowanym.

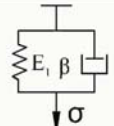
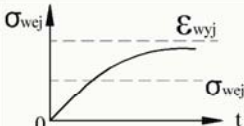
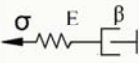
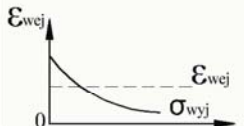
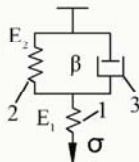
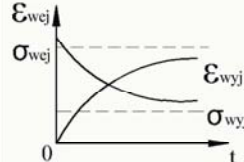
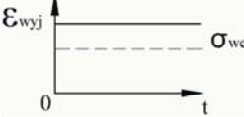
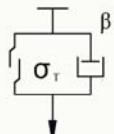
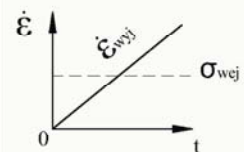
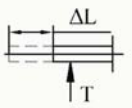
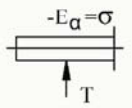
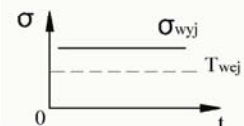
Proces odkształcenia sprężysto – plastycznego można reprezentować członem o działaniu ukierunkowanym z wielkością wyjściową σ oraz wyjściową ε i odwrotnie w zależności od tego, czy rozpatrywana jest relaksacja naprężeń czy też podatności.

Eksperymentalne charakterystyki statyczne (zależność wielkości wyjściowej ε członu od wejściowej σ w ustalonym trybie) przedstawiono na rys. 5.7.

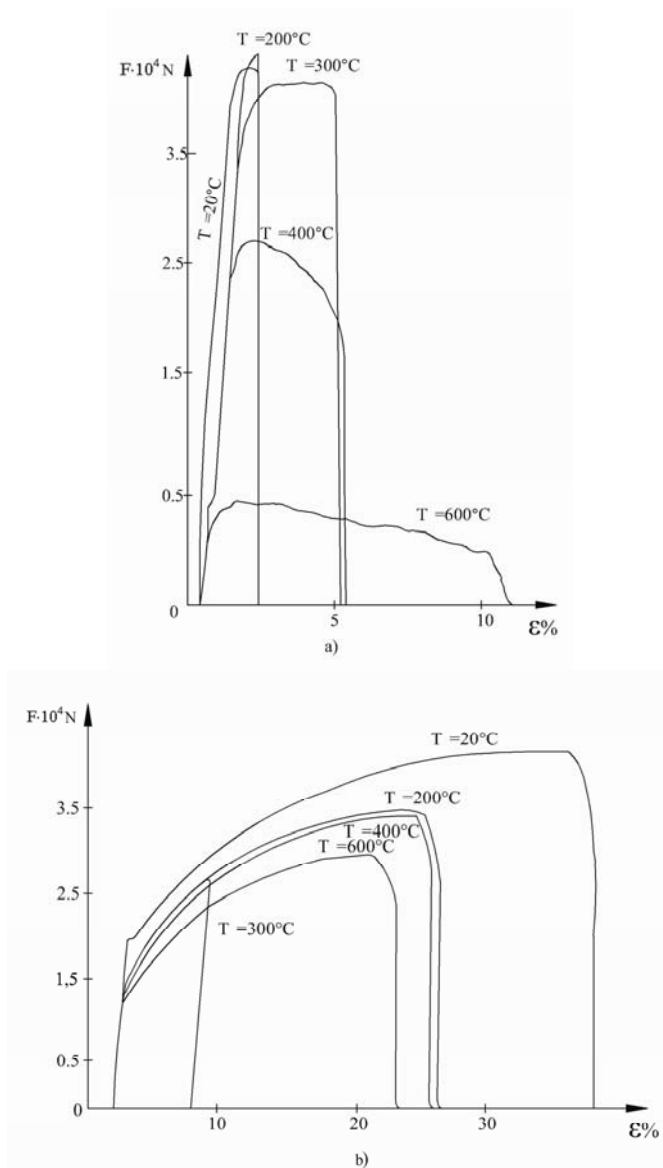
Istotne jest, że człon dynamiczny niekoniecznie jest przedstawiony w postaci konstrukcyjnej lub schematycznej. W niektórych przypadkach człony dynamiczne w ogóle mogą nie mieć sensu fizycznego, charakteryzując tylko zależności matematyczne, pomiędzy niektórymi wielkościami układu automatycznego i obiektu.

**MODELE MATEMATYCZNE PROCESU TECHNOLOGICZNEGO OBRÓBK
CIEPLNO - SIŁOWEJ**

Tab. 5.1. Człony dynamiczne i ich opis matematyczny

	Model mechaniczny	Opis matematyczny	Proces przejściowy	Transmitancje operatorowe
1.		$\sigma = E\epsilon + \beta \dot{\epsilon}$ $T\dot{\epsilon} + \epsilon = K \sigma_{wej}$ $\sigma = \sigma_0 / E (1 - e^{-t/T})$		$G(S) = \epsilon(S) / \sigma(S) =$ $= K / (TS + 1)$
2.		$\dot{\epsilon} = \sigma / \beta + \dot{\sigma} / E$ $T\sigma + \sigma = K \dot{\epsilon}$ $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-t/T}$		$G(S) = \sigma(S) / \epsilon(S) =$ $= K / (TS + 1)$
3.		$E\epsilon + \beta \dot{\epsilon} = (1 + E/E_2)\sigma + (\beta/E_1)\dot{\sigma}$ $T_1\dot{\epsilon} + \epsilon = T_2\dot{\sigma} + K\sigma$ $\sigma = \epsilon_0 (E + (E_1 E_2)) e^{-t((E_1 + E_2)/\beta)}$		$G(S) = \epsilon(S) / \sigma(S) =$ $= \frac{K(T_2 S + 1)}{(T_1 S + 1)}$
4.		$\sigma < \sigma_T \quad \sigma \geq \sigma_T$ $\sigma = \epsilon \sigma$ $\sigma = K \epsilon_{wej}$		$G(S) = \epsilon(S) / \sigma(S) =$ $= K = 1/E$ przy $\sigma < \sigma_T$
5.		$\sigma \geq \sigma_T \quad \sigma = \sigma_T + \beta \dot{\epsilon}$ $\sigma \leq \sigma_T \quad \sigma / \beta = \dot{\epsilon}$ $\sigma = \sigma_0 > \sigma_T \quad \dot{\epsilon} = K(\sigma_0 - \sigma_T)$ $S \epsilon_{wyj} = K \sigma_{wej}$		$G(S) = \epsilon(S) / \sigma(S) =$ $= K / S$
6.		$\epsilon = \alpha \cdot L T_{wej}$ $(TS + 1)\epsilon = K T_{wej}$ $T = C \cdot Q / (K \cdot F)$		$G(S) = \epsilon(S) / T(S) =$ $= K = \alpha \cdot L$ $G(S) = K / (TS + 1)$
		$\sigma = \alpha \cdot E T > \sigma_T$ $T = \sigma_T / E_\alpha$		$G(S) = \sigma(S) / T(S) =$ $= \alpha \cdot E$

Rodzinę charakterystyk statycznych zbudowanych w przypadku różnych wartości temperatury T przedstawiono na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Charakterystyki statyczne układu dynamicznego obróbki cieplno – siłowej

Modelami przedstawionych charakterystyk statycznych są zależności nieliniowe i przy realizacji układu sterowania automatycznego są linearyzowane, umożliwia to uproszczenie układu sterowania automatycznego, nie powodując obniżenia wymagań odnośnie dynamiki procesów obróbki cieplno – siłowej.

Charakterystyki statyczne w pełni odzwierciedlają zachowanie członu dynamicznego w trybie ustalonym, co umożliwia opracowanie zasad sterowania odkształceniem sprężysto – plastycznym.

Układ sterowania działa również w trybie nieustalonym, dlatego ważne jest przy badaniu układu dynamicznego obróbki cieplno – siłowej, zachowanie członów dynamicznych, w trakcie procesów przejściowych.

Charakterystyki statyczne obiektu sterowania nie zawierają czasu relaksacji, co jest przeszkodą w opracowaniu urządzenia i regulowaniu procesu obróbki cieplno – siłowej.

Opis powinien być realizowany na podstawie układu parametrów, który można rozpatrywać jako właściwość samego materiału. Przy takim podejściu, istotny jest stosunek między naprężeniem i odkształceniem, zapisany w postaci liniowego równania różniczkowego, zawierającego naprężenie, odkształcenie i ich pochodne po czasie. Liniowe równania różniczkowe odkształcenia, które opisują niesprężystość, zawierają trzy parametry niezależne. Odpowiednio model jest budowany z trzech podstawowych elementów – dwóch sprężyn i tłumika.

Określenie niesprężystości zawiera wymóg liniowości, a więc równania różniczkowe niesprężystości, wiążące σ i ε , powinny być równaniami pierwszego rzędu i zawierać tyle niezależnych stałych, ile jest niezbędnych do opisu niesprężystego zachowania danego ciała twardego. W ogólnej postaci równanie liniowe ze stałymi współczynnikami można zapisać w sposób następujący:

$$a_0 \cdot \sigma + a_1 \cdot \frac{d\sigma}{dt} t + \dots + a_n \cdot d^n \frac{\sigma}{dt^n} = b_0 \cdot \varepsilon + b_1 \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + \dots + b_n \cdot d^n \frac{\varepsilon}{dt^n} \quad (5.24)$$

lub

$$A\sigma = B\varepsilon,$$

gdzie A i B – operatory liniowe, zawierające odpowiednie współczynniki a_i i b_i .

Układ mechaniczny może być modelem określonego materiału niesprężystego wtedy, gdy spełnia te same zależności między siłą, przemieszczeniem i czasem, co odpowiednio naprężenia, odkształcenia i czas w przypadku materiału niesprężystego. Siła działająca na sprężynę odzwierciedla naprężenie, przemieszczenie – odkształcenie, a współczynnik sztywności sprężyny K – odpowiada modułowi sprężystości E lub podatności j . Cechą charakterystyczną takiej sprężyny jest nagromadzona w niej energia odwracalna. Innym elementem niezbędnym do występowania tarcia wewnętrznego jest tłumik Newtona, który jest tłokiem przemieszczającym się w idealnie lepkiej cieczy, prędkość ruchu tłoka jest proporcjonalna do działającej siły, a więc praca w pełni zużywana jest na powstawanie ciepła. W przypadku takich ciał twardych tłumik jest stosowany tylko w połączeniu ze sprężyną.

W trakcie konstruowania modeli elementy mechaniczne mogą być łączone szeregowo i równolegle [39]. Przyłączeniu szeregowym (tab. 5.1, model 2) naprężenia σ_1 i σ_2 są równe, a odkształcenia się sumują: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$. Przy połączeniu równoległym tych elementów $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$, $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$.

Kombinacje modeli różnorodnych połączeń z dwóch i trzech elementów przedstawiono w tab. 5.1.

Model 1 posiada inercyjność jako wynik podatności i oddziaływania sprężystego. Do opisu ilościowego należy wyprowadzić, a następnie rozwiązać równanie różniczkowe odkształcenia, odpowiadające przytoczonemu modelowi. Stosując zasadę równoległo – szeregowego połączenia elementów modelu mechanicznego przyjęto odkształcenie sprężyny $\varepsilon_1 = j \cdot \sigma_1 = \frac{\sigma_1}{E}$, a tłumika

$\varepsilon_2 = j \cdot \frac{\sigma_2}{E} T$. Eliminując ε_1 , ε_2 , σ_1 i σ_2 , otrzymano równanie (tab. 5.1, mod.1).

Rozwiązując to równanie, uzyskano funkcję podatności. Proponowany model nie dopuszcza odkształcenia momentalnego, to znaczy nie odzwierciedla on rzeczywistego zachowania ciała twardego, w momencie $t = 0$, nie można wytworzyć odkształcenia ε_0 i opisać relaksacji naprężenia. Jednak w połączeniu z innymi elementami model ten także znajduje zastosowanie.

Przy połączeniu szeregowym sprężyny i tłumika (tab. 5.1, mod. 2) wygodnie jest przedstawić lepkość β wielkością $E \cdot T$ (gdzie T – stała czasu). Rozpatrzony model umożliwia opisanie praktycznie pełnej relaksacji σ do wartości σ_2 , równych zero.

Uogólnione równanie odkształceń, odpowiadające temu modelowi, można otrzymać zakładając $\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1$ i $\sigma_2 = E \cdot T \cdot \dot{\varepsilon}_2$ (tab. 5.1, mod. 2). Równanie w przypadku tych dwóch modeli jest ekwiwalentne równaniu (5.24) wtedy, gdy wszystkie współczynniki oprócz a_0 , a_1 i b_0 , b_1 są równe zero i obie części pierwszego równania podzielone są przez b_0 , a drugiego przez a_0 .

Z równania mod. 2 (tab. 5.1) wynika, że również drugi model – szeregowo połączone tłumik i sprężyna – opisują materiał niesprężysty, ponieważ umożliwia określenie stacjonarnej podatności ciągłości. Należy więc rozpatrzyć model, składający się z trzech elementów. W tab. 5.1, (mod. 3) jest przedstawiony model trzejelementowy. Model taki ma wszystkie specyficzne cechy charakterystyczne materiału niesprężystego; w tym przypadku odkształcenie na jednostkę naprężenia zmienia się od chwilowej wartości j do ostatecznej wartości podatności $j_{\Sigma} = j_1 + j_2$. W oparciu o model możliwe jest opisanie relaksacji naprężenia, ponieważ zaczynając z momentu $t = 0$, można w nim podtrzymywać odkształcenie ε_0 ; w tym przypadku początkowo rozciągany jest tylko element – sprężyna 1, a następnie zaczyna przemieszczać

się tłok tłumika 3, dopóty, dopóki naprężenie σ_3 , działające na tłumik (naprężenie na tłumiku), nie osiągnie wartości zero. Przemieszczenie to wpływa na zmniejszenie naprężenia od wartości początkowej $\frac{\varepsilon_0}{j_1}$ do wartości końcowej

$$\frac{\varepsilon_0}{(j_1 + j_2) \varepsilon_0 \cdot \frac{1}{j_1 + j_2}} \cdot$$

Rozpatrywany jest model prosty, ale jednocześnie posiadający wszystkie charakterystyki materiału niesprężystego. Równanie różniczkowe, opisujące taki model i jego rozwiązanie, przedstawiono w tab. 5.1 – mod. 3). W przypadku elementów 1 – 3, $\varepsilon_1 = j \cdot \sigma_1$, $\varepsilon_2 = j \cdot \sigma_2$, $\varepsilon_3 = j \cdot \sigma_3$. Warunki początkowe, przy rozwiązaniu równania są następujące: $\sigma = \sigma_2$, $\sigma = 0$, $t \geq 0$, $\varepsilon = j_1 \cdot \sigma$, przy $t = 0$. Przedstawione równanie różniczkowe trzech elementów modelu jest równoważne równaniu (5.24), kiedy wszystkie współczynniki oprócz a_0 , a_1 i b_0 , b_1 są równe zero i obie części równania są podzielone przez b_0 . Jednocześnie można oczekiwać, że dowolny bardziej złożony model 3 – elementowy uwzględnia w równaniu różniczkowym odkształcenia pochodne wyższych rzędów, co komplikuje opis matematyczny obiektu sterowania nie zmieniając fizycznej istoty procesu. Z rozwiązania równania wynika, że funkcja podatności

jest eksponencjalną funkcją rosnącą typu $\left[1 - \exp\left(\frac{-t}{t_\sigma}\right) \right]$, (t_σ – czas relaksacji

przy stałym naprężeniu). Zgodnie z teorią sterowania automatycznego, wielkość tę przyjęto nazywać stałą czasową. W szczególności, przy $t = t_\sigma$, $j(t)$ ulegnie zwiększeniu o $(1 - e^{-1})$, w stosunku do pełnej zmiany j_2 . Do określenia funkcji relaksacji naprężeń niezbędne są następujące warunki początkowe: $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\varepsilon = 0$, $t \geq 0$, $\sigma = E \cdot \varepsilon_0$ przy $t = 0$. Dodatkowo wprowadzono oznaczenie

$$t_\varepsilon = t_\sigma \cdot \frac{j_1}{j_1 + j_2} = t_\sigma \cdot \frac{E_2 - t_1}{t}, \quad \text{gdzie} \quad \Delta = \frac{j_1}{j_2} \quad \text{stopień relaksacji (wielkość}$$

bezwymiarowa).

Wartość t_ε jest to czas, niezbędny do zmniejszenia naprężenia o e razy, czyli t_ε jest to czas relaksacji naprężenia przy stałym odkształceniu. Funkcja relaksacji naprężeń jest eksponencjalnie malejącą funkcją typu $\exp \rightarrow \frac{-t}{t_\varepsilon}$.

Łącząc kolejno n sprężyscie – ciągłych elementów (sprężyna wprowadzona równolegle do tłumika), otrzymano model o takich samych własnościach ogólnych, lecz o znacznie bardziej złożonej zależności procesu odkształcenia od czasu.

Równoległe połączenie n elementów (sprężyna połączona szeregowo z tłumikiem) utworzy model podobny do modelu 2 (tab. 5.1), lecz ściślej opisujący właściwości relaksacyjnych materiałów rzeczywistych i w tym przypadku rozwiązanie równania wygląda następująco:

$$\sigma_1 = \varepsilon_0 \cdot E_m \cdot e^{\frac{t}{t_m \varepsilon}}, \quad t_m \varepsilon = \frac{\beta_m}{E_m^\varepsilon},$$

a przy $n \rightarrow \infty$, zamieniając stałe E_m i E_m^ε funkcją rozkładu

$$\frac{E(t)}{\sigma_{1-1}} = \varepsilon_0 \int_0^\infty E(t) \cdot e^{-\frac{t}{t}} dt.$$

Zachowanie się półfabrykatów ustalonych, na sztywno i swobodnie, w trakcie nagrzewania oraz ich modele mechaniczne i matematyczne przedstawiono w tab. 5.1, mod. 6. Przy opracowaniu schematu strukturalnego obiektu, jakim jest układ dynamiczny obróbki cieplno – siłowej, modele te będą rozpatrywane w połączeniu z zaprezentowanymi modelami mechanicznymi (tab. 5.1).

W celu dalszych przekształceń matematycznych, w przypadku rozpatrywanych modeli, należy sformułować zasadę superpozycji. Jeżeli do materiału w kolejno różnych odstępach czasu przykładanych jest ciąg naprężeń, to każde wpływa na odkształcenie. Sumaryczne odkształcenie spowodowane działaniem naprężeń stałych σ_1 i σ_2 , jest równe $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$, gdzie $\varepsilon_1(t)$ i $\varepsilon_2(t)$ – odkształcenia, które powstałyby, jeżeli σ_1 i σ_2 oddziaływałyby niezależnie, analogicznie, więc odkształcenie sumaryczne $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$ jest spowodowane naprężeniami $\delta_1(t) + \delta_2(t)$.

Zasada superpozycji jest najbardziej ogólnym sformułowaniem wymagania liniowości, zawartym w przytoczonym wcześniej określeniu niesprężystości.

W dalszym ciągu przeanalizowano funkcję następstwa: w momencie t_i przyłożono naprężenie σ_i ; z funkcji podatności wynika, że przy $t \geq t_i$, $\varepsilon(t) = \sigma \cdot j(t - t_i)$. Przy założeniu, że kolejno w czasie $t_1, t_2, \dots, t_n$ są przykładane naprężenia σ_i ($i = 1, 2, \dots, n$), to zgodnie z zasadą superpozycji (jeżeli odkształcenie zmienia się dyskretnie lub ciągle) otrzymano:

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot j(t - t_i) \quad \text{lub} \quad \varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t j(t - t_i) \sigma_i(t) dt. \quad (5.25)$$

Równanie (5.25) wiąże więc $\varepsilon(t)$ ze zmianami naprężenia w czasie przez funkcję podatności. Analogicznie, jeśli odkształcenie jest zmienną niezależną, a badana jest zależność naprężenia od czasu, to:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \frac{t - t_i}{j} \quad \text{lub} \quad \sigma(t) = \int_{-\infty}^t E(t - t_i) \varepsilon(t) dt. \quad (5.26)$$

Równania całkowe (5.25) i (5.26) wskazują, że obiekt zachowuje się w taki sposób, jakby miał pamięć; odkształcenie w momencie t związane jest z czasem poprzednim, poprzez zmianę naprężenia $\sigma(t)$ i podatności $j(t)$, będących charakterystykami metalu. Ta własność pamięci pokazuje, że $\varepsilon(t)$ zależy nie tylko od chwilowej wartości $\sigma(t)$, ale również od parametrów wewnętrznych, których wartości chwilowe odtwarzają prehistorię materiału.

Jeżeli zmiany naprężenia $\sigma(t)$ w czasie przebiegają zarówno ciągle, jak dyskretnie, to można zastosować kombinację zależności (5.25) i (5.26), to znaczy

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot j(t-t_i) + \int_{-\infty}^t j(t-t_i) \sigma_i(t) dt. \quad (5.27)$$

Do pełnej analizy obiektu sterowania – układu dynamicznego obróbki cieplno – siłowej rozpatrzono kilka modeli z elementem sprężysto – plastycznym (tab. 5.1, mod. 2.4). Połączone szeregowo: element plastyczny i sprężyna tworzą model ciała sprężysto – plastycznego. Do granicy plastyczności σ_T ciało odkształca się sprężysto, płynięcie plastyczne zachodzi przy stałym naprężeniu. Po zdjęciu obciążenia powstaje odkształcenie trwałe. Równania stanu plastycznego, wiążące naprężenia z odkształceniem, nie zawsze mają rozwiązanie z powodu złożoności procesu odkształcenia plastycznego [41, 52].

Model z elementami ciągliwo – plastycznymi (tab. 5.1, mod. 5) charakteryzuje się równoległymi połączeniami elementów ciągliwego i plastycznego. Przy naprężeniu poniżej granicy plastyczności σ_T , ciało nie ulega odkształceniu: przy $\sigma_T = \text{const} = \sigma_0 > \sigma_T$ prędkość odkształcenia jest proporcjonalna do naprężenia nadmiarowego $\sigma_0 - \sigma_T$. Model ten opisuje materiały, które mają zauważalną plastyczność przy wysokich naprężeniach (na przykład metale w wysokiej temperaturze).

Przy jednoosiowym stanie naprężeniowym równanie odkształcenia – równanie odkształcenia środowiska ciągliwo – plastycznego ma postać, przedstawioną w tab. 5.1, mod. 5. Specyfiką takich modeli jest, że w strefach o naprężeniach niezbyt dużych nie powstają odkształcenia.

Połączenie szeregowo elementów ciągliwego i plastycznego utworzy model o następujących własnościach: przy $\sigma_1 > R_e$ – czynnik płynie, podobnie jak ciecz lepka; przy $\sigma_1 = R_e$ – ma miejsce płynięcie plastyczne, przy którym naprężenia nie mogą przekraczać granicy plastyczności. Dodatkowy element sprężysty włączony, do modelu ciągliwo – plastycznego, uwzględnia wpływ odkształceń sprężystych. W przypadku naprężeń niższych niż granica plastyczności $\sigma_1 < \sigma_T$, model zachowuje się jak czynnik sprężysto – plastyczny, przy $\sigma_1 = \sigma_T$ występuje płynięcie plastyczne – naprężenia nie mogą być wyższe od granicy plastyczności.

Przedstawione wcześniej modele trzyelementowe, odpowiadające równaniu różniczkowemu odkształcenia i zawierające tylko naprężenia i odkształcenia oraz ich pochodne pierwszego rzędu po czasie, są modelami prostymi. W takich modelach funkcje podatności relaksacji naprężeń są funkcjami wykładniczymi, z których każda zawiera jeden czas relaksacji.

Przeanalizowano również modele bardziej złożone, opisujące niesprężyste materiały twarde. Na podstawie modelu (tab. 5.1 – mod. 2.1) można opisać zachowanie niesprężyste; w tym celu należy połączyć dwa modele szeregowo oraz dodatkowo włączyć szeregowo jedną sprężynę, uzyskując model zawierający pięć elementów. Równanie różniczkowe odkształcenia, zgodnie z przyjętymi wcześniej zasadami, zawiera w przypadku każdego elementu odpowiednie zależności między naprężeniem i odkształceniem, bez wszystkich zmiennych oprócz naprężenia sumarycznego i odkształcenia sumarycznego. Równanie odkształcenia przekształcane jest do równania drugiego stopnia odnośnie σ oraz ϵ . Odkształcenie sumaryczne jest równe sumie odkształceń $\epsilon_{\Sigma} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$, a więc z modelu można bezpośrednio, bez rozwiązywania równania różniczkowego, otrzymać funkcję odkształcenia:

$$\epsilon(t) = \epsilon_1 \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{T_{\sigma}^{(1)}}\right) \right] + \epsilon_2 \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{T_{\sigma}^{(2)}}\right) \right]. \quad (5.28)$$

Funkcja odkształcenia jest sumą dwóch członów rosnących wykładniczo, a podatność relaksacyjna jest określona zależnością $\epsilon_{\Sigma} = \epsilon_1 + \epsilon_2$, przy tym $T_{\epsilon}^{(1)}$ i $T_{\sigma}^{(2)}$ – dwie wartości stałych czasowych (czas relaksacji) przy stałym naprężeniu.

Taki model nie umożliwia jednak rozwiązania zagadnienia z relaksacją naprężenia, dlatego celowe jest jego przebudowanie, czyli równoległe podłączenie do dwóch równoległych modułów sprężyny (tab. 5.1, mod. 2); przy tym $E_{\Sigma} = E_1 + E_2$. Oba równania różniczkowe opisujące model pięcioelementowy są ekwiwalentne i zawierają pięć niezależnych parametrów. Funkcję relaksacji naprężeń można zapisać w postaci sumy dwóch relaksacji wykładniczych o czasie relaksacji równym stałym czasowym $T_{\epsilon}^{(1)}$ i $T_{\sigma}^{(2)}$:

$$\epsilon(t) = \epsilon_1 \exp \frac{-t}{T_{\epsilon}^{(1)}} + \epsilon_2 \exp \frac{-t}{T_{\sigma}^{(2)}}. \quad (5.29)$$

Z przedstawionej analizy ciała twardego o pięciu parametrach wynika, że w przypadku standardowego ciała niesprężystego jest możliwe zastosowanie dwóch ekwiwalentnych modeli, pierwszego w celu otrzymania funkcji podatności, a drugiego – funkcji naprężenia. W przytoczonych modelach nie ma

masy, ponieważ powoduje ona zachowanie typu rezonansowego, a nie relaksacyjnego.

Zalety zastosowania zaprezentowanych modeli są widoczne w bardziej złożonych przypadkach, kiedy równanie różniczkowe jest rzędu wyższego niż drugi, wtedy funkcję podatności naprężenia można wyprowadzić bezpośrednio z modelu. Nie jest do tego konieczna znajomość parametrów innego modelu ekwiwalentnego oraz współczynników równania różniczkowego odkształcenia. Funkcję pełzania w przypadku modelu z pięcioma parametrami można uogólnić na przypadek modelu, zawierającego kilka modeli typu (tab. 5.1, mod. 1):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{(i)} \left(1 - \exp \frac{-t}{T_{\sigma}^{(i)}} \right), \quad (5.30)$$

gdzie $T_{\sigma}^{(i)}$ i $\varepsilon_{(i)}$ czas relaksacji i podatności i -go modelu.

Przy naprężeniach wysokich w przypadku wielu materiałów zależność liniowa między naprężeniem i odkształceniem nie znajduje potwierdzenia w badaniach eksperymentalnych.

Wtedy należy stosować zależności nieliniowe, które są jednak trudne do realizacji [59, 86], ponieważ bardziej właściwym rozwiązaniem jest zastosowanie równania przedstawionego w pracy [121]:

$$\varphi(\varepsilon_1) = \sigma_1(t) + \int_0^t Q(t-t_1) \cdot \sigma_1(t_1) dt_1, \quad (5.31)$$

gdzie: t_1 czas przyłożenia obciążenia siłowego; jeżeli t jest niewielki, to odkształcenie działania wtórnego, opisywane członem całkowym, jest małe, czyli $\sigma_1 = \varphi(\varepsilon_1)$. Równanie (5.31) w stosunku do funkcji $\varphi(\varepsilon_1)$ jest liniowe. Rozwiązując je względem σ_1 , otrzymuje się zależność:

$$\sigma_1(t) = \varphi(\varepsilon_1) - \int_0^t R(t-t_1) dt_1, \quad (5.32)$$

gdzie $R(t-t_1)$ – jądro (lub współczynnik relaksacji).

Z rozwiązania równania (5.31), przy naprężeniu $\sigma_1 = \text{const} = \sigma_0$ wynika, że:

$$\varphi(\varepsilon_1) = [1 + K(t)] \sigma_0, \quad K(t) = \int_0^t Q(t-t_1) dt_1,$$

to znaczy krzywe odkształcenia przy ustalonych naprężeniach są podobne. W przypadku relaksacji, stała odkształcenia $\varepsilon_1 = \text{const} = \varepsilon_0$, z równania (5.32) uzyskuje się

$$\sigma_1 = [1 - L(t)] \varphi(\varepsilon_0), \quad L(t) = \int_0^t R(t-t_1) dt_1. \quad (5.33)$$

Jeżeli rozciąganie początkowe realizowane jest szybko, to w związku z relaksacją $\sigma_1 = \varphi(\varepsilon_0)$ można zapisać:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = 1 - L(t), \quad (5.34)$$

czyli krzywe relaksacji również są podobne.

5.3. Model układu dynamicznego obróbki cieplno – siłowej

Przedstawioną analizę teoretyczną możliwości zbudowania modelu matematycznego układu dynamicznego, obróbki cieplno – siłowej, przeprowadzono w odniesieniu do właściwości mechanicznych, metali przy temperaturze $T^\circ = 20^\circ\text{C}$, jednak wpływ temperatury na właściwości mechaniczne ma bardzo istotną wartość praktyczną. Podobnie do procesów mechanicznych, należy rozróżniać efekty temperaturowe według stopnia ich oddziaływania: nagrzewanie pieca można zaliczyć do makroefektów, a efekty temperaturowe przy powtórnych obciążeniach do mikroefektów.

W związku z faktem, że moduł sprężystości odzwierciedla zmianę międzyatomowych sił adhezyjnych, wraz ze zmianą odległości międzyatomowych naturalne jest oczekiwanie, iż moduły sprężystości powinny być powiązane z parametrami siatki [105].

Poziom temperatury istotnie wpływa na opór odkształcenia plastycznego (rys. 5.4). Jak wynika z rys. 5.4, opór przeciwko początkowym odkształceniom plastycznym (granica plastyczności) w istotny sposób zależy od temperatury. Przy zmianie temperatury występują zasadnicze różnice pomiędzy metalami z siecią regularną przestrzennie centryczną i siecią regularną płasko centryczną [83, 86]. Odkształcenie metalu przy różnych temperaturach zależy głównie od dwóch czynników: wpływu temperatury na kierunek przepływu przy danej strukturze odkształcanego metalu oraz wpływu różnic w strukturze (na przykład różnej gęstości dyslokacji), powstających przy różnych temperaturach w przypadku materiałów o określonym stopniu odkształcenia.

Wpływ temperatury na krzywą umocnienia odkształceniowego metalu, o sieci regularnej płasko centrycznej (stal X10CrNi18-8) wynika z tego, że metal w stanie odkształconym ma różną strukturę przy różnych temperaturach, ponieważ nie zauważono dużej zmiany wartości naprężenia przy zmianie temperatury. Przekształcenia fizyko – mechaniczne zachodzące przy zmianie temperatury w istotny sposób wpływają na plastyczność i ciągliwość. Przy obniżeniu temperatury w większym stopniu zmniejsza się plastyczność, a nie ciągliwość.

Szeroko rozpowszechnione jest prostowanie osiowe. Przy wyciąganiu półfabrykatu cylindrycznego wszystkie włókna doprowadzane są do granicy plastyczności, dlatego istniejące wcześniej naprężenia szczątkowe osiowe są

usuwane. W procesie prostowania osiowego przy odkształceniach ostatecznych 0,5–1% naprężenia szczałkowe są likwidowane w pełni [69].

Badania przeprowadzono w urządzeniu do obróbki cieplno – siłowej [40, 41], w przypadku prostowania osiowego wałów o małej sztywności ze stali austenitycznej X10CrNi18-8 oraz hartowania (przeprowadzanego w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali) – odpuszczanie, w tym przypadku, nie jest wymagane [55, 178]. Stale austenityczne mają duży współczynnik rozszerzalności termicznej (WRT) i niską granicę plastyczności, dlatego w celu wytworzenia obciążenia prostowania osiowego, po zakończeniu nagrzewania półfabrykatu wału do hartowania, jego końce są ustalane w urządzeniu wykonanym ze stali, o współczynniku rozszerzalności termicznej niższym niż materiał półfabrykatu wału i realizowane jest chodzenie urządzenia z zamocowanym półfabrykatem.

W wyniku różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej przy chłodzeniu powstaje obciążenie osiowe, które działając na półfabrykat wału, powoduje jego osiowe prostowanie.

Jako urządzenie jest stosowana sztywna rura ze stali C 25, perforowana na powierzchni przez otwory przeznaczone do chłodzenia. Chwyty wykonane są na końcach urządzenia.

Opracowanie układu sterowania automatycznego obróbką cieplno – siłową nie jest możliwe bez modelu matematycznego samego obiektu sterowania, który funkcjonalnie wiąże parametry wejściowe i wyjściowe. Specyficzną cechą układu dynamicznego obróbki cieplno – siłowej jest jednoczesne przyłożenie dwóch oddziaływań zewnętrznych – siły osiowej i temperatury.

Temperatura i prędkość odkształcenia przy obróbce cieplno – siłowej mają różny wpływ; charakterystyki sprężyste E, G nie zależą od prędkości, lecz od temperatury odkształcenia; ponieważ zmiana temperatury (szczególnie jej podwyższenie) często powoduje nałożenie na czynniki czysto mechaniczne procesów fizyko – mechanicznych, zachodzących zarówno wewnątrz samego metalu, jak również uwarunkowanych oddziaływaniem metalu z otoczeniem. Obróbka cieplno – siłowa, jako podstawowa operacja procesu technologicznego, której celem jest wyrównywanie i minimalizacja naprężeń szczałkowych wzdłuż półfabrykatu, jednocześnie łączy w sobie dwa procesy: odkształcenie plastyczne i oddziaływanie temperaturowe.

Problemem niejednorodności pola temperaturowego w zagadnieniach teorii plastyczności zajmuje się wielu badaczy [52, 72, 78 83, 162].

Jednak dokładnego rozwiązania analitycznego zagadnienia o polu temperaturowym półfabrykatu nie opracowano, ponieważ występują tutaj jednocześnie procesy niestacjonarnego przenoszenia ciepła i masy.

Praktycznie przy badaniu procesów obróbki cieplno – siłowej, nie są rozpatrywane procesy chłodzenia części po odkształceniu, które mają istotny wpływ na kształtowanie właściwości mechanicznych.

Jeżeli zależność funkcjonalną naprężenie – odkształcenie elastoplastyczne (rys. 5.3) aproksymować dwiema lub kilkoma zależnościami liniowymi, w zależności od wielkości odkształcenia plastycznego, to przy rozpatrywaniu modelu procesu nagrzewania i chłodzenia, przy obróbce cieplno – siłowej, dobrze jest zastosować teorię termosprężystości i termoplastyczności [19 183]. Rozpatrzono przypadek, kiedy pole temperaturowe jest znane i niezależne od stanu naprężeniowego, a samo ciało jest sprężyste i izotropowe. Przy obciążeniu jednoosiowym, co odpowiada obróbce cieplno – siłowej, prawo Hooke’a przy rozszerzalności cieplnej ma postać:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \alpha \cdot T^\circ, \quad \varepsilon_2 = \frac{-\mu \cdot \sigma_1}{E}, \quad (5.35)$$

W tym przypadku rozszerzenie cieplne sumuje się z wydłużeniem, uwarunkowanym naprężeniem. Równanie to wyrażone odnośnie do naprężeń ma postać

$$\sigma_1 = \alpha \cdot E \cdot T^\circ + E \cdot \varepsilon_1, \quad \sigma_2 = 0. \quad (5.36)$$

Stosując zasadę sumowania działania sił, można określić przemieszczenie temperaturowe i naprężenia przy zerowych siłach zewnętrznych, a zatem można zsumować znalezione wielkości z przemieszczeniem i naprężeniami od działania obciążeń.

Naprężenia temperaturowe są równe zero, jeżeli temperatura jest stała lub można ją modelować jako funkcję liniową współrzędnych.

Złożoność opisu matematycznego obróbki cieplno – siłowej, jako obiektu sterowania, polega na tym, że wyjściowy rozkład temperatury, naprężeń szczątkowych, odkształceń plastycznych w objętości półfabrykatu jest nieznany lub nie ma środków pomiarowych, umożliwiających kontrolowanie bieżącego rozkładu tych parametrów. W trakcie obciążeń cieplno – siłowych jest mierzona temperatura środowiska pieca i wielkość odkształceń elastoplastycznych.

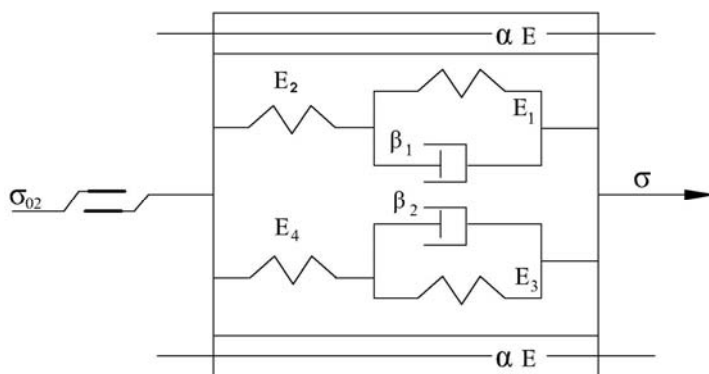
Jeżeli proces odkształcenia elastoplastycznego zostanie rozpoczęty wtedy, kiedy jeszcze nie osiągnięto niezbędnego rozkładu temperatury, to jakościowo gorszy jest proces odkształcenia plastycznego (większa nierównomierność wzdluzna), przy tym czas obróbki ulega zwiększeniu. Z drugiej strony zbyt długotrwałe nagrzewanie obniża wydajność procesu i zwiększa nakłady na produkcję.

Czas i prędkość nagrzewania są określane według informacji apriorycznej, ponieważ znajdują przy tym zastosowanie pewne zasady i podejścia heurystyczne.

Praktyka pokazuje jednak, że takie sterowanie procesem nie jest wystarczająco efektywne i jest zalecany kompleksowy system sterowania automatycznego obróbką cieplno – siłową. W tym celu należy opisać sam obiekt sterowania – półfabrykat, w stanie termoplastycznym. Z charakterystyki statycznej obiektu sterowania, we współrzędnych siła – przemieszczenie wynika (rys. 5.7), że zachowuje się on jako środowisko sprężyste – ciągliwe oraz jako sprężyste – ciągliwo – umocnione, przy przekroczeniu granicy plastyczności.

Przy uwzględnieniu opracowanych członów układu sterowania automatycznego, o działaniu ukierunkowanym (tab. 5.1) oraz wyników badań eksperymentalnych, model mechaniczny „n” elementu półfabrykatu można przedstawić w postaci pokazanej na rys. 5.8. Model ma cechę specyficzną, polegającą na tym, że do opisanego przejścia od sprężystej części diagramu „naprężenie – przemieszczenie względne” do odkształcenia plastycznego jest stosowany element plastyczny (z punktu widzenia układów automatycznych element przekaźnikowy), który w sposób poglądowy charakteryzuje działanie modelu mechanicznego. Jeżeli obciążenie zewnętrzne nie przekracza granicy plastyczności, to działa górna gałąź i standardowe ciało niesprężyste charakteryzuje się parametrami E_2 , E_1 , β_1 , wtedy przy obliczeniach jest spełnione prawo Hooke’a. Po osiągnięciu σ_{02} obciążenie jest kierowane na drugą gałąź o parametrach E_4 , E_3 , które są nazywane „zmiennymi modułami sprężystości” lub „modułami umocnienia” [51].

W przypadku tych dwóch stref obciążenia przedstawiono również modele temperaturowe, na wejście których jest podawana temperatura, a na wyjściu jest naprężenie temperaturowe lub wydłużenie; ich opis matematyczny przedstawiono w tab. 5.1. Taki model mechaniczny elementu półfabrykatu umożliwia opracowanie schematu strukturalnego obiektu sterowania. Schemat strukturalny jest zgodny z opisem matematycznym przekształcenia procesów fizycznych i zjawisk zmiennych się w czasie.



Rys. 5.8. Model matematyczny „n” elementu obrabianego półfabrykatu

Metody strukturalne, w zastosowaniu do poszczególnych elementów dynamicznym, można zastosować do określenia struktury wewnętrznej, procesów przebiegających w elementach. Umożliwiają również uzyskanie lepszych charakterystyk, w wyniku nałożenia dodatkowych powiązań zewnętrznych, wzmacniających pożądane i neutralizujących niechciane powiązania wewnętrzne. W odniesieniu do całego układu metody strukturalne pozwalają ustalić racjonalne układy, z punktu widzenia rozwiązania podstawowego, stawianego przed nimi zadania – odtwarzania oddziaływania sterowniczego, przy jednoczesnej kompensacji – działających na układ dynamiczny – zakłóceń. Uszczegółowiony układ znajduje bezpośrednie zastosowanie do nastawiania według niego schematu komputera, na którym otrzymuje się szukane rozwiązania.

Proces odkształcania cieplnego, na etapie odkształcania osiowego, po uzyskaniu określonych parametrów temperaturowych, opisywany jest równaniami, zgodnie z charakterystyką statyczną modelu mechanicznego:

$$\begin{aligned}
 E_2 \cdot \varepsilon_1 + \beta \cdot \dot{\varepsilon}_1 &= \frac{1 + E_2}{E_1} \cdot \sigma_1 + E_1 \cdot \dot{\sigma}_1, \\
 \sigma_1^T &= E \cdot \alpha \cdot T^\circ, \quad \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \alpha \cdot T^\circ, \\
 \varepsilon_2 &= \frac{-\mu \cdot \sigma_1}{E}, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} = \frac{\sigma_1}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_2}{E}, \\
 \varepsilon_2 &= \varepsilon_{22} + \varepsilon_{21} = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\mu \cdot \sigma_1}{E}, \\
 \varepsilon_1 + \frac{C \cdot G}{\nu \cdot F_{pow} \cdot \varepsilon_1} &= T^\circ.
 \end{aligned} \tag{5.37}$$

Przy odkształceniu osiowym wałów długowymiarowych $\sigma_2 = 0$, w przypadku przekrojów płaskich, równania są bardziej proste i funkcje transmitancji obiektu sterowania, w przypadku jednej gałęzi przyjmują postać (rys. 5.9):

$$\begin{aligned}
 G_1(s) &= \frac{\varepsilon(s)}{\sigma(s)} = \frac{K_1(1 + T_2 \cdot s)}{1 + T_1 \cdot s}, \\
 G_2(s) &= \frac{\varepsilon_1^T(s)}{T^\circ(s)} = \frac{K_2}{1 + T_3 \cdot s}, \\
 G_3(s) &= \frac{\sigma_1^T(s)}{T^\circ(s)} = E \cdot \alpha = K_3,
 \end{aligned} \tag{5.38}$$

$$G_4(s) = \frac{\varepsilon_2(s)}{\varepsilon_{1\Sigma}(s)} = \mu = K_4, \quad G_5(s) = \frac{\sigma'_1(s)}{\varepsilon_2(s)} = E / \mu = K_5,$$

gdzie: $T_1 = \frac{\beta}{E_2}$, $T_2 = \frac{\beta}{E_1} E_2$, $T_3 = c \cdot \frac{G}{F} \cdot S$ – stałe czasowe,

E_1 i E_2 – moduły sprężystości podłużnej,

β – współczynnik ciągliwości, $K = E_1 + E_2 / E_1 \cdot E_2$,

K_1 – K_5 – współczynniki wzmocnienia,

C – ciepło właściwe,

G – ciężar,

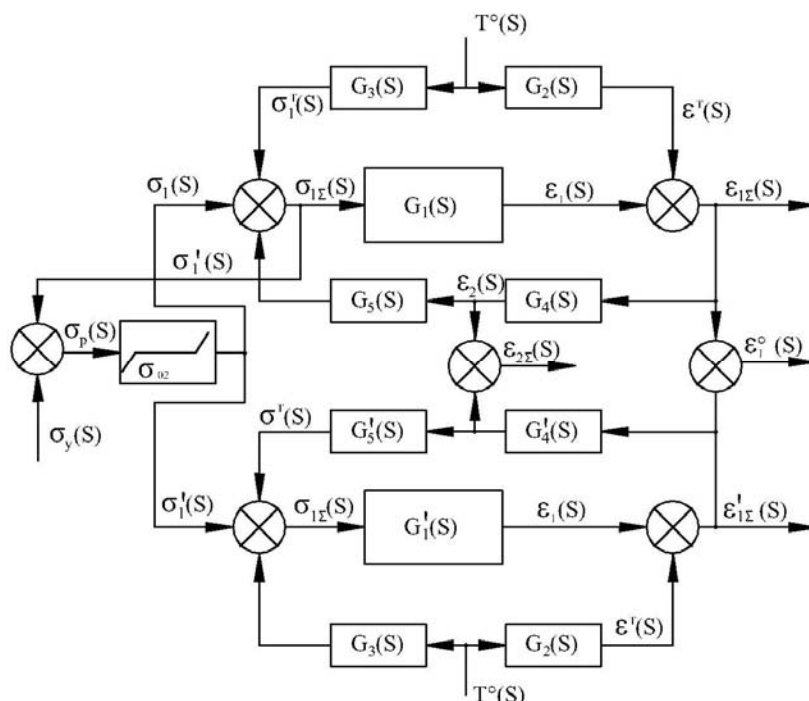
F_{pow} – powierzchnia półfabrykatu,

v – współczynnik względny oddawania ciepła.

Odształcenie półfabrykatu wzdłuż osi powoduje jednocześnie zmniejszenie – zwężenie średnicy półfabrykatu i w związku z tym – umocnienie materiału oraz wzrost naprężeń osiowych. Stosując więc terminologię z zakresu teorii sterowania automatycznego, układ dynamiczny obróbki cieplno – siłowej można przedstawić jako system zamknięty, z dodatnim sprzężeniem zwrotnym, według naprężenia (rys. 5.9).

Wejściami schematu strukturalnego są naprężenie osiowe i temperatura, wyjściami odkształcenia względne wzdłużne i poprzeczne ε_1 i ε_2 . Schemat strukturalny, zgodnie z charakterystyką statyczną obiektu (rys. 5.7), ma dwie równoległe gałęzie.

Przy osiągnięciu granicy sprężystości σ_T , w schemacie strukturalnym człon jest przedstawiany jako element nieliniowy typu przekaźnik, do działania włącza się druga gałąź schematu. Jeżeli przy rozciąganiu jednoosiowym na krzywej odkształcenia występuje odcinek pełzania i umocnienia (rys. 5.7a), to „niewrażliwość półeczki” na krzywej pokazuje, że σ_T jest stałe, a ε zmienia się w przedziale $\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n = a$, to $\sigma = -E \cdot a + E_y$ przy $\varepsilon \geq \varepsilon_a$, gdzie ε_a – odkształcenia przy stałym naprężeniu. Wielkość „półeczki” ε_a jest równa w przypadku różnych materiałów.



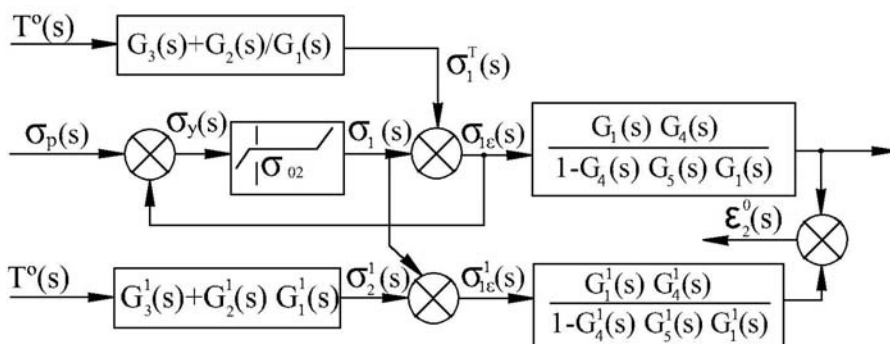
Rys. 5.9. Schemat strukturalny „n” elementu obiektu sterowania obróbką cieplno – siłową

Jeżeli występuje ograniczenie (nasycenie), to granica plastyczności nie ulega zmianie i nie ma krzywej umocnienia, to $\sigma = E \cdot \varepsilon$: przy $|\varepsilon| \leq \sigma_T / E$; $\sigma = \sigma_T$ przy $\varepsilon \geq \sigma_T / E$.

W celu uwzględnienia przejścia z jednej gałęzi struktury na drugą, to znaczy przy przejściu przez granicę plastyczności, w pierwszej gałęzi wprowadzono jednostkowe sprzężenie zwrotne, które włącza „przełącznik” i proces odkształcenia osiowego przebiega w gałęzi drugiej. Celowa jest linearyzacja procesu umocnienia (krzywej umocnienia), co jest słuszne przy niewielkich odkształceniach, a wtedy również transmitancja operatorowa w swojej istocie jest niezmienna, zmianie ulegają tylko wartości liczbowe stałych czasowych i współczynników wzmocnienia (transmitancja operatorowa oznaczona jako $G'(s)$) – rys. 5.9). Na wyodrębniony element półfabrykatu, zgodnie ze schematem strukturalnym, jest podawane sumaryczne naprężenie cieplne-odkształcające $\sigma_{1\Sigma} = \sigma_1 + \sigma_T$, jeżeli nie jest ono większe od granicy plastyczności i $\sigma_{1\Sigma}'$ – jeżeli zachodzi proces umocnienia. Na wyjściu każdej gałęzi struktury, wartość wydłużenia względnego również jest równa sumie

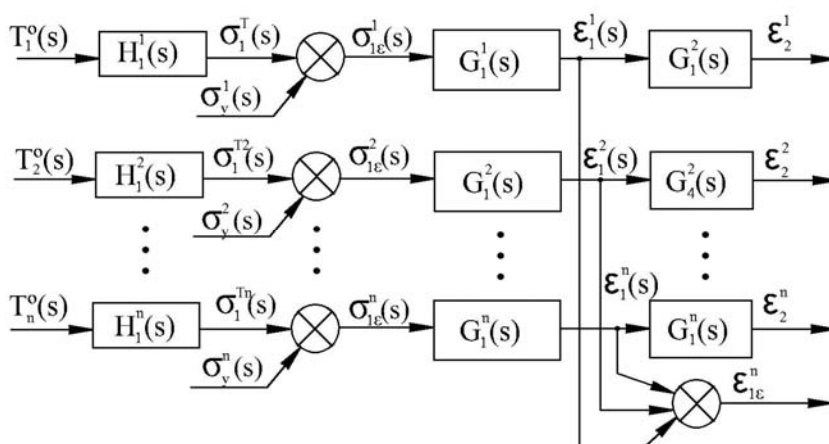
odkształceń $\varepsilon'_{1\Sigma} = \varepsilon_1 + \varepsilon^T$, $\varepsilon'_{1\Sigma} = \varepsilon'_1 + \varepsilon^{T1}$. Całkowite odkształcenie względne w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym jest równe:
 $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1\Sigma} + \varepsilon'_{1\Sigma}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{21} + \varepsilon'_{21}$.

Po przekształceniach strukturalnych obiekt sterowania – układ dynamiczny obróbki cieplno – siłowej przedstawiono w postaci przekształconego schematu strukturalnego (rys. 5.10).



Rys. 5.10. Schemat strukturalny przekształcony „n” elementu obiektu sterowania obróbką cieplno – siłową

Obiekt sterowania obróbką cieplno – siłową można przedstawić w postaci schematu strukturalnego (rys. 5.11) n – wymiarowego układu regulowania [162].



Rys. 5.11. Schemat strukturalny obiektu sterowania w postaci n – wymiarowego układu regulowania

Istnieje powiązanie wewnętrzne między elementami (częściami półfabrykatu), ponieważ w przypadku każdego konturu sterowania jest ono obciążeniem zewnętrznym, w postaci strumienia siłowego lub cieplnego. Schemat strukturalny (rys. 5.11) otrzymano na podstawie „n” elementu (rys. 5.8) po wykonaniu nieskomplikowanych przekształceń i uproszczeń, takich jak zwiżanie transmitancji operatorowych $H_1(s) = G_3(s) + G_2(s) \cdot G_1(s)$ i nieuwzględnianie elementu nieliniowego, którego działanie jest określane przez system sterowania automatycznego. Do uzyskania informacji, o zachowaniu materiału półfabrykatu w krótkim czasie, wygodne są oceny w czasie trwania procesu (na przykład oddziaływanie wibracyjne). Przy tym na wyrób oddziałuje okresowo zmienne naprężenie (lub odkształcenie); jest określane opóźnienie w fazie odkształcenia od naprężenia lub odwrotnie. Przy obciążeniu półfabrykatu siłą osiową transmitancję operatorową wiążącą wyjście z wejściem, rozpatrywanego członu, można zapisać jako

$$G(s) = \frac{\varepsilon(s)}{\sigma(s)} = j_R(\omega) + j_J(\omega), \quad [\text{gdzie } j_R(\omega) - \text{część rzeczywista (podatność}$$

nagromadzenia), $j_J(\omega) - \text{część urojona (podatność strat)}]$. Przy podstawieniu $G(j\omega)$ jako wektora, który charakteryzuje ruchy ustalone przy zakłócaniu okresowym o częstotliwości ω (w zakresie od 0 do $+\infty$), którego koniec nakreśli na płaszczyźnie zespolonej charakterystykę – amplitudowo – fazowo – częstotliwościową (CHAFC); umożliwia to prześledzenie powiązań: j_R , j_J i Φ ;

$$|j|^2 = j_R^2 + j_J^2, \quad tg \Phi = \frac{j_J}{j_R}.$$

Przy ochłodzeniu półfabrykatu, jest określane odkształcenie okresowe:

$$G(s) = \frac{\sigma(s)}{\varepsilon(s)} = |E|(\omega)^{j\Phi(\omega)} = E_R(\omega) + E_J(\omega), \quad |E|^2 = E_R^2 + E_J^2, \quad tg \Phi = \frac{E_J}{E_R}.$$

Jeżeli wyrazić podatność przez moduł sprężystości w postaci kompleksowej, to można zapisać:

$$j_R = \frac{E_R}{|E|^2} = [E_R \cdot (1 + tg^2 \Phi)]^{-1}, \quad (5.39)$$

$$j_J = \frac{E_J}{|E|^2}, \quad E_J = \frac{j_J}{|j|^2}.$$

Sens wielkości j_R i j_J , jako odpowiednio „podatności nagromadzenia” i „podatności strat”, ilustrują obliczenia energii nagromadzonej i rozproszonej w trakcie okresu drgań. Jest to istotne, gdy w procesie odkształcenia cieplnego jest stosowana obróbka wibracyjna, jako proces przyspieszający relaksację. Energia w jednostce objętości w trakcie cyklu jest równa $\int \sigma d\varepsilon$ – całkowanie jest

realizowane między punktami cyklu: początkowym i rozpatrywanym. Energię Π_C , rozproszoną w ciągu całego cyklu, w jednostce objętości wyrażono zależnością:

$$\Pi_C = \pi \cdot j_J \cdot \sigma_0^2, \quad (5.40)$$

gdzie σ_0 – amplituda naprężeń.

Z drugiej strony maksymalna wartość energii Π , zgromadzonej w jednostce objętości, jest określana z zależności:

$$\Pi = \int_{\alpha}^{\pi/2} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} j_R \cdot \sigma_0^2. \quad (5.41)$$

Stosunek energii rozproszonej do nagromadzonej, wyrażony w procentach, jest to względna zdolność odkształceniowa materiału. Stosunek ten jest powiązany z kątem strat w sposób następujący:

$$\frac{\Pi_C}{\Pi} = 2p \frac{j_J}{j_R} = 2\pi \cdot \operatorname{tg} \Phi. \quad (5.42)$$

Analogicznie, wyrażenie to można przedstawić przez moduł $\Pi_C = \pi \cdot E_i \cdot \varepsilon_0^2$, $\Pi = 0,5 E_R \cdot \varepsilon_0^2$, $\frac{\Pi_C}{\Pi} = 2\pi \cdot \operatorname{tg} \Phi$. Miara strat energii (w ciągu jednego okresu), uwarunkowanych niesprężystym zachowaniem jest Φ (lub $\operatorname{tg} \Phi$), a zatem wielkość Φ określa tarcie wewnętrzne materiału.

5.4. Ocena analityczna prostoliniowości osi wału o małej sztywności przy jego hartowaniu w urządzeniu

Przy wytwarzaniu wałów długowymiarowych są stosowane długie półfabrykaty walcowane, które przy dostawie mają znaczną krzywiznę.

Przed obróbką mechaniczną należy przeprowadzać prostowanie półfabrykatów, do uzyskania prostoliniowości 0,5 mm na 1 m [65], wystarczającej przy toczeniu do wykonania wału, o założonej tolerancji, na krzywiznę jego osi. Wadą prostowania przez zginanie jest powstawanie naprężeń szczątkowych, nierównomiernych, w przekroju wzdłużnym półfabrykatu wału, które przy zdjęciu warstwy materiału w procesie obróbki mechanicznej, powoduje powstanie momentu zginającego i zmianę prostoliniowości osi wału [11].

Szeroko rozpowszechnione jest prostowanie osiowe. Przy wyciąganiu półfabrykatu cylindrycznego, wszystkie włókna osiągają granice plastyczności, dlatego istniejące wcześniej osiowe naprężenia szczątkowe są zdejmowane. W trakcie prostowania osiowego, przy odkształceniu trwałym 0,5 – 1%, naprężenia szczątkowe są likwidowane w pełni [44].

Badania przeprowadzone w urządzeniu do obróbki cieplno – siłowej [39] w przypadku prostowania osiowego wałów ze stali austenitycznej X10CrNi18–8, są połączone z operacją hartowania (wykonywaną w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali), przy tym odpuszczanie nie jest potrzebne [165]. Stale austenityczne mają duży współczynnik rozszerzalności cieplnej i niską granicę plastyczności. W celu wytworzenia obciążenia osiowego prostowania po zakończeniu nagrzewania półfabrykatu wału do hartowania, jego końce ustalane są w urządzeniu wykonanym ze stali o współczynniku rozszerzalności cieplnej niższym, niż materiał półfabrykatu wału i jest realizowane chłodzenie przyrządu z półfabrykatem w stanie zaciśniętym. W wyniku różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej, przy chłodzeniu powstaje siła osiowa, która działając na półfabrykat wału, powoduje jego prostowanie osiowe. Jako przyrząd jest stosowana sztywna rura ze stali C 25, perforowana na powierzchni otworami, przeznaczonymi do kontaktu z otaczającym środowiskiem. Uchwyty wykonane są na końcach urządzenia.

W danym procesie jako jakościowe prostowanie osiowe półfabrykatu wału rozumiane jest takie, przy którym, w wyniku działania siły osiowej prostowania, w żadnym włóknie, w każdym przekroju poprzecznym półfabrykatu, nie występuje naprężenie większe od granicy plastyczności. Przy ściskaniu, a następnie, przy wyciąganiu w dowolnym przekroju poprzecznym na całej jego powierzchni, powstają naprężenia nie mniejsze od granicy plastyczności.

Jako maksymalne, wejściowe ugięcie półfabrykatu jest rozumiane takie ugięcie początkowe, przy którym, w skrajnie ściskanym włóknie, powstają naprężenia ściskania nie większe niż granica plastyczności przy temperaturze, odpowiadającej dojściu skrzywionej osi do linii prostej. W przeciwnym razie w przekroju poprzecznym półfabrykatu powstaje zgniot „ściskania”, który w trakcie dalszego wyciągania, do granicy plastyczności, nie jest zdejmowany; jest to efekt Bauschingera. W wyniku powstaje niesymetryczna strefa zgniotu, której odpowiada niesymetryczny, odnośnie osi symetrii przekroju poprzecznego, rozkład naprężeń szcztątkowych, wpływający następnie na prostoliniowość wału. Ustalono, że ugięciu osi półfabrykatu wału długowymiarowego, najbardziej jest zbliżone do równania paraboli drugiego stopnia w postaci:

$$f(z) = y(z) = \frac{4y_{max}}{l} \cdot z \cdot \left(1 - \frac{z}{l}\right), \quad (5.43)$$

gdzie:

- y_{max} – maksymalne wyjściowe ugięcie półfabrykatu,
- l – odległość między środkami skrajnych przekrojów wału,
- z – wartość bieżąca ugięcia.

Naprężenie maksymalne powstające w skrajnym włóknie przy wyciąganiu zgiętej osi wału do linii prostej określane jest z zależności:

$$\sigma_{\max} = \frac{y_{\max} \cdot F_{\text{roz}}}{W_x}, \quad (5.44)$$

gdzie F_{roz} – siła osiowa, W_x – wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego półfabrykatu wału na zginanie.

Wielkość F_{roz} jest określana według zależności [39], których przekształcenie prowadzi do wzoru

$$F_{\text{roz}} = \frac{3\pi \cdot d^4 \cdot E}{20 \cdot l^2}, \quad (5.45)$$

gdzie d – średnica półfabrykatu wału.

Oznaczając stosunek l do d przez K_0 , otrzymano:

$$y_{\max} \leq \frac{5K_0^2 \cdot d \cdot \sigma_{02}}{24E}. \quad (5.46)$$

Maksymalne naprężenia ściskające we włóknie ściskanym powstają w trakcie chłodzenia wału o temperaturę ΔT° , odpowiadającą skróceniu do wielkości maksymalnego ugięcia początkowego, jak również zmiany σ_{02} ze spadkiem temperatury ($\sigma_{02} = \sigma_{02}(t)$, $E = E(t)$), a więc zależność (5.46) można przekształcić do postaci:

$$y_{\max} \leq \frac{5K_0^2 \cdot d \cdot \sigma_{02}(t - \Delta T^\circ)}{24E(t - \Delta T^\circ)}. \quad (5.47)$$

Przy zmniejszeniu temperatury o ΔT° , jego długość ulegnie skróceniu o:

$$\Delta l = \Delta \alpha(t) \cdot l \cdot \Delta T^\circ, \quad (5.48)$$

gdzie $\Delta \alpha(t)$ – różnica współczynników rozszerzalności temperaturowej materiału półfabrykatu wału i przyrządu, zależna funkcjonalnie od temperatury.

Skrócenie długości wału Δl przy stygnięciu powinno umożliwić wyprostowanie skrzywionej osi do linii prostej, to znaczy, że:

$$\Delta l = \delta_{ow} + 2\delta_{lc}, \quad (5.49)$$

gdzie: δ_{ow} – odległość niezbędna do „wyboru” ugięcia półfabrykatu wału określana jako:

$$\delta_{ow} = \frac{8 \cdot \delta_{p \max}^2}{3l},$$

δ_{lc} – luz między czołem przyrządu i czołem występu oporowego, równy:

$$\delta_{lc} = \frac{2d_w \cdot \delta_{p \max}}{l},$$

gdzie d_w – średnica występów.

Stosunek średnicy występu chwytającego (lub nakrętki) do średnicy półfabrykatu oznaczono jako C , a z zależności (5.46) wyznaczono ΔT° , jako

$$\Delta T^\circ = \frac{1}{\Delta \alpha(t) \cdot l^2} \left(\frac{8}{3} \delta_{p \max}^2 + 4C \cdot d \cdot \delta_{p \max} \right). \quad (5.50)$$

Podstawiając zależność (5.50) do (5.47) i rozwiązując względem $\delta_{\max}$, wyznaczono maksymalne początkowe ugięcie półfabrykatu wału, w zależności od jego geometrii i właściwości fizycznych materiału.

W szczególności, w przypadku półfabrykatów wału ze stali X10CrNi18-8 i urządzenia ze stali C 25, mają one następującą postać:

$$\Delta \alpha = 1,43 \cdot T^{-0,205}, \quad E = 2688 \cdot T^{-0,075}, \quad R_e = 84,1 \cdot T^{-0,314}.$$

Porównanie wielkości obliczeniowych: początkowego ugięcia jakościowego z danymi, w przypadku półfabrykatów rzeczywistych ze stali X10CrNi18-8, o średnicy od 20 do 80 mm i stosunkiem długości do średnicy od 30 do 80 wykazuje, że są półfabrykaty o ugięciu początkowym większym od początkowego jakościowego. Dlatego przed prostowaniem wałów długowymiarowych, półfabrykaty należy wybierać według ugięcia początkowego. W przypadku wałów ze stali X10CrNi18-8, półfabrykaty o długości 1050 mm i średnicy 30 mm, powinny mieć początkowe ugięcie jakościowe nie większe niż 3,4 mm; w praktyce są spotykane półfabrykaty o takich wymiarach o ugięciu do 6 mm.

Ugięcie półfabrykatu, które można wyprostować przy zastosowaniu obróbki cieplno – siłowej z uwzględnieniem, że takiemu prostowaniu są poddawane półfabrykaty o ugięciu początkowym, nieprzekraczającym maksymalnego jakościowego, jest określane następująco: przy stygnięciu skrócenie półfabrykatu powinno pokrywać następującą sumę wydłużeń:

$$\Delta l = \delta_{ow} + 2\delta_{lc} + \delta_{sp} + \delta_{wp}, \quad (5.51)$$

gdzie: δ_{sp} – skrócenie przyrządu w wyniku działania obciążenia od skracającego się półfabrykatu wału, równe:

$$\delta_{sp} = \frac{\sigma_{02} \cdot l}{E_u \cdot K_s},$$

przy czym:

σ_T – granica plastyczności materiału półfabrykatu przy 20°C,

E_u – moduł sprężystości materiału przyrządu przy 20°C,

K_s – stosunek sztywności przyrządu do sztywności półfabrykatu,

δ_{wp} – wydłużenie, które należy nadać półfabrykatowi, żeby włókna skrajne o naprężeniach ściskających osiągnęły naprężenia nie mniejsze od granicy plastyczności materiału wału przy rozciąganiu, równe:

$$\delta_{wp} = \frac{(\sigma_k + \sigma_{02}) \cdot l}{E_{20^0}},$$

gdzie: σ_k – naprężenie we skrajnym włóknie przekroju maksymalnego ugięcia półfabrykatu, występujące przy wyciąganiu skrzywionej osi wału do linii prostej.

Zgodnie z (5.46) zależność do określenia σ_k można zapisać jako:

$$\sigma_k = \frac{24d \cdot E_t \cdot \delta_{p \max}}{5l^2},$$

gdzie E_t – moduł sprężystości materiału wału w temperaturze nagrzewania.

Rozwiązując (5.51) odnośnie do $\delta_{p \max}$, uzyskano:

$$\begin{aligned} \delta_{p \max} = & -d \left(0,9 \frac{E_t}{E_{20}^0} + \frac{3}{4} C \right) + \\ & + d \frac{1}{2} \sqrt{\left(1,8 \frac{E_t}{E_{20}^0} + 1,5C \right)^2 + 1,5K_0^2 \frac{\sigma_{02}}{E_{20}^0} \left(\frac{\Delta\alpha \cdot t \cdot E_{20}^0}{R_e} - \frac{E_{20}^0}{E_u K_s} - 1 \right)}, \end{aligned} \quad (5.52)$$

gdzie: T° – temperatura nagrzewania,

$\Delta\alpha$ – różnica współczynników rozszerzalności temperaturowej materiału półfabrykatu i materiału przyrządu, w zakresie temperatur od 20°C do temperatury nagrzewania,

R_e – granica plastyczności materiału wału.

5.5. Podsumowanie

W celu zwiększenia dokładności i stabilności kształtu geometrycznego części o małej sztywności opracowano technikę łączącą w sobie proces prostowania i obróbki cieplnej. Jej zastosowanie umożliwia prostowanie osiowe półfabrykatów wałów, przy jednoczesnej ich obróbce cieplnej, poprawienie początkowego ugięcia półfabrykatu, w wyniku wyciągnięcia włókien, w przekroju poprzecznym, do granicy plastyczności i ukształtowanie w półfabrykacie symetrycznych, odnośnie do osi naprężeń szczątkowych.

Otrzymano i przeanalizowano równania uniwersalne, opisujące układ obróbki cieplno – siłowej części osiowosymetrycznych, o małej sztywności, z uwzględnieniem zmiany ich parametrów geometrycznych. Zależności te umożliwiają przeprowadzenie oceny błędów wtórnego działania sprężystości.

Pokazano istotny wpływ nierównomierności rozłożenia temperatury nagrzewania, w procesie technologicznym, na kształtowanie stabilności wymiarów części o małej sztywności. Zastosowanie informacji a priori nie umożliwia obliczenia – z wymaganą dokładnością – parametrów procesu technologicznego, w związku z dużym rozrzutem właściwości fizyko – mechanicznych i parametrów geometrycznych półfabrykatów.

Relacje parametrów wejściowych i wyjściowych obiektu sterowania – układu dynamicznego są opisane liniowymi równaniami różniczkowymi ze stałymi współczynnikami drugiego i wyższych rzędów.

Zastosowano nowe podejście do tworzenia modeli matematycznych, opisujących zachowanie sprężyste i niesprężyste części, metodami transmitancji operatorowych i schematów strukturalnych, umożliwiających zastosowanie analizy częstotliwościowej oceny zachowania półfabrykatu jako ciała twardego.

Przeprowadzono badania w urządzeniu do obróbki cieplno – siłowej, w przypadku prostowania osiowego wałów, połączonego z operacją hartowania (wykonywaną w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali). Sformułowano odpowiednie zależności, opisujące ten proces.

ZAKOŃCZENIE

W pracy przedstawiono niektóre z wyników badań teoretycznych i doświadczalnych, prowadzonych w ciągu wielu lat przez autora i kierowany przez niego zespół naukowy, w zakresie technologii wytwarzania wałków o małej sztywności. Uzyskanie zakładanych parametrów dokładnościowych, w przypadku takich części sposobami klasycznymi, jest możliwe tylko przy bardzo niskiej wydajności obróbki.

Zagadnienia badania dokładności obróbki zaczęto definiować i próbowano rozwiązywać od momentu powstania nauki o skrawaniu metali. Postępy w tym zakresie na kolejnych etapach rozwoju przemysłu maszynowego, w dużym stopniu były określane przez osiągnięcia w dziedzinie technologii maszyn, teorii skrawania materiałów, budowy obrabiarek, przemysłu narzędziowego, automatyzacji procesów obróbki i projektowania, a także budowy różnorodnych układów sterujących, w szczególności układów sterowania automatycznego i adaptacyjnego.

Mimo znaczących osiągnięć metod eksperymentalno – analitycznych, tradycyjna strategia ich zastosowania przy badaniach i obliczeniach dokładności, a szczególnie przy kształtowaniu części o małej sztywności, sprowadza się do skupienia uwagi na małych podzbiorach rzeczywistego problemu, ograniczając się przy tym, jak pokazały badania przy pomocy tablic analizy, do uproszczonych schematów obliczeniowych, nie uwzględniających całego kompleksu rzeczywistych czynników statycznych i dynamicznych.

Do ogólnych wad technik sterowania dokładnością i metod obliczeń dokładności można odnieść brak kompleksowego podejścia do obliczeń dokładności kinematycznej, dynamicznej i statycznej oraz aspektów konstrukcyjnych, technologicznych i eksploatacyjnych.

Na dokładność eksploatacyjną kształtu i wymiarów części o małej sztywności, przy ich wykonaniu, dominujący wpływ mają właściwości fizyko-mechaniczne materiału, poziom naprężeń szczątkowych i ich nierównomierność w przekrojach wzdłużnym i poprzecznym półfabrykatu, a także błędy wnoszone przez odkształcenia sprężyste i plastyczne układu technologicznego i obrabianego wału.

Zaprezentowano opracowane rozwiązania w zakresie nowych metod obróbki części o małej sztywności, w przypadku poszczególnych operacji technologicznych, poprzez wprowadzenie nowych elementów konstrukcyjnych i technologicznych, umożliwiających odpowiednie ustawienie części i ich obróbkę, sterowanie parametrami technologicznymi procesów oraz opracowanie jakościowo nowych procesów technologicznych. Jakość gotowych wyrobów i ich dokładność eksploatacyjna zależą od całego procesu technologicznego, z uwzględnieniem wzajemnych powiązań operacji i ich dziedziczności technologicznej, przekazywanej przez półfabrykat.

Najbardziej efektywnymi metodami zwiększenia jakości i wydajności wytwarzania wałów są te, które, obok sposobów tradycyjnych, stosują układy sterowania automatycznego, w przypadku których charakterystyczne jest o wiele szersze zastosowanie informacji o charakterze procesu technologicznego.

Opracowano i przedstawiono metodologię budowy modeli matematycznych obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężystości – odkształcalnym. Przy opisie matematycznym obiektu sterowania – funkcji odkształceń wałka o małej sztywności – przy ustalonych parametrach – uwzględniono wiele czynników: sposoby zamocowania, warunki obciążenia i inne. Model matematyczny w zaproponowanym ujęciu jest zadaniem identyfikacji strukturalnej. Jest on wystarczająco prosty do dalszego stosowania, w zadaniach sterowania dokładnością, i jednocześnie odpowiada a priori informacjom o mechanizmie, powiązaniach i parametrach zjawisk. Wyodrębniono czynniki, wykazujące dominujący wpływ na dokładnościowe wskaźniki procesu obróbki.

Przeprowadzone, w oparciu o opracowane modele, badania wykazały, że rozbieżności, między wynikami analitycznymi i eksperymentalnymi, wynoszą od 3 do 12% i mogą być spowodowane przyjętymi założeniami, przy wyborze schematów obliczeniowych.

Sterowanie stopniem dokładności obróbki mechanicznej, w stanie sprężystości – odkształcalnym części długowymiarowych, zrealizowano poprzez sterowanie dwoma parametrami: siłą rozciągającą i mimośrodem jej przyłożenia. Obciążenie części siłą rozciągającą, wywołującą stan sprężystości – odkształcalny, jest ekwiwalentne dodatkowej podporze, powodującej zwiększenie sztywności statycznej elementu. Dlatego bazowanie i zamocowanie półfabrykatów można realizować w uchwytach samocentrujących lub w tulei sprężynującej.

Na podstawie przeprowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych opracowano sposób obróbki mechanicznej, który umożliwia osiągnięcie dokładności w trakcie toczenia i jednocześnie sterowanie stanem sprężystości – odkształcalnym wałków w układzie technologicznym.

Sterowanie automatyczne odkształceniami sprężystymi części w układzie technologicznym, w wyniku zastosowania dodatkowych oddziaływań siłowych, zmieniających jej stan sprężystości – odkształcalny, umożliwia zwiększenie dokładności obróbki oraz wydajności procesu technologicznego.

Z przeprowadzonych badań wynika, że najprostsze w technicznej realizacji, z punktu widzenia zwiększenia dokładności obróbki części o małej sztywności, są układy, w których jako oddziaływania sterownicze są stosowane: siła rozciągająca, działająca wzdłuż osi części i siła mimośrodowa.

Siła rozciągająca, przykładana z przemieszczeniem (mimośrodem), tworzy dodatkowy moment zginający w kierunku przeciwnym momentom zginającym, pochodzącym od siły skrawania.

Przedstawiono sposób obróbki mechanicznej, który umożliwia osiągnięcie odpowiedniej dokładności, w trakcie toczenia i jednocześnie sterowanie stanem sprężystości – odkształcalnym wałków w układzie technologicznym.

Do obróbki wałków o małej sztywności w stanie sprężystości – odkształcalnym, w celu uzyskania odpowiedniej dokładności i wydajności, opracowano szereg konstrukcji koników do tokarek, które mogą znaleźć szerokie zastosowanie w zakładach przemysłowych, przy produkcji jednostkowej oraz seryjnej.

Zaprezentowany sposób obróbki wibracyjnej wałów długowymiarowych, o małej sztywności, umożliwia zwiększenie stabilności kształtu i wymiarów w okresie eksploatacji długowymiarowych wałków osiowosymetrycznych, o małej sztywności. Zmniejszenie poziomu naprężeń szczątkowych, w objętości materiału, w wyniku intensyfikacji procesów relaksacyjnych, bardziej równomiernego wzdłużnego rozkładu osiowych naprężeń szczątkowych, z racji kompleksowego oddziaływania wibracyjnego. Zwiększenie wydajności, poprzez zmniejszenie wielkości paczenia pooperacyjnego, jak również wykorzystanie na obróbkę czasu składowania międzyoperacyjnego.

Poprzez zmianę parametrów technologicznych obróbki wibracyjnej (częstość oddziaływania, twardość i bezwładność półfabrykatu) można sterować naprężeniami szczątkowymi, wzdłuż każdej części półfabrykatu; należy przy tym kontrolować położenie i przemieszczenia stref nagrzania pierwotnego.

Obniżenie odkształcenia, w wyniku zmniejszenia technologicznych naprężeń szczątkowych, umożliwia zmniejszenie liczby operacji technologicznych, zwiększenie wydajności oraz niezawodności eksploatacyjnej wyrobu gotowego.

Badania technologii wytwarzania części o dużej dokładności potwierdziły, że błędy obróbki, przy tradycyjnej kolejności operacji, powstają z określoną cyklicznością. Każdy cykl zawiera operacje skrawania, obróbki cieplnej, prostowania i sezonowania. Po realizacji cyklu powstaje nowy rozkład błędów, związanych z biciem promieniowym. Ma miejsce, tak zwana dziedziczność technologiczna błędów położenia powierzchni, określana współczynnikami dziedziczności. Otrzymano zależności, określające błędy w końcowej obróbce, związane z odkształceniem. Przedstawiona nowa kolejność obróbki opravek, o dużej dokładności, umożliwia wyeliminowanie wielu operacji cieplnych. Zastosowanie opracowanego sposobu obróbki cieplno – siłowej, stopniowanych części osiowosymetrycznych, umożliwia minimalizację wielkości ugięcia wyrobu i stabilizację poziomu naprężeń szczątkowych, wzdłuż części, na wszystkich stopniach, co z kolei powoduje zwiększenie dokładności eksploatacyjnej gotowych wyrobów, na przykład stopniowanych wałków długowymiarowych o małej sztywności i zwiększenie jakości wyrobów gotowych.

W celu zwiększenia dokładności i stabilności kształtu geometrycznego części o małej sztywności opracowano sposób, łączący w sobie proces prostowania i obróbki cieplnej. Jego zastosowanie umożliwia prostowanie

osiowe półfabrykatów wałów, przy jednoczesnej ich obróbce cieplnej, poprawienie początkowego ugięcia półfabrykatu, w wyniku wyciągnięcia włókien w przekroju poprzecznym do granicy plastyczności i ukształtowanie w półfabrykacie symetrycznych, odnośnie osi naprężeń szczątkowych.

Sformułowane zależności uniwersalne, opisujące układ obróbki cieplno – siłowej części osiowosymetrycznych o małej sztywności, z uwzględnieniem zmiany ich parametrów geometrycznych, umożliwiają przeprowadzenie oceny błędów wtórnego działania sprężystości.

Powiązania parametrów wejściowych i wyjściowych, obiektu sterowania – układu dynamicznego są opisane liniowymi równaniami różniczkowymi ze stałymi współczynnikami drugiego i wyższych rzędów.

Zastosowano nowe podejście do tworzenia modeli matematycznych, opisujących zachowanie sprężyste i niesprężyste części, przy pomocy transmitancji operatorowych i schematów strukturalnych, umożliwiających zastosowanie metody częstotliwościowej oceny zachowania dynamicznego półfabrykatu jako ciała sztywnego.

Przeprowadzono badania w urządzeniu do obróbki cieplno – siłowej, w przypadku prostowania osiowego wałów, połączonego z operacją hartowania (wykonywaną w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali).

Opracowane i zaprezentowane przez autora w książce rozwiązania mają charakter utylitarny. Zastosowanie proponowanych sposobów obróbki wałków, o małej sztywności w przedsiębiorstwach przemysłu maszynowego, umożliwi w sposób znaczący podniesienie jakości tych wyrobów, przy dużej wydajności ich wytwarzania.

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

OZNACZENIA

- A** - amplituda
 a_p - głębokość skrawania
 d - średnica części mm
 e - mimośród siły rozciągającej przy rozciąganiu z przemieszczeniem względem osi kłów
 E - moduł Younga (sprężystości podłużnej)
 f - posuw, częstotliwość drgań
 F_c - główna siła skrawania
 F_f - składowa posuwowa siły skrawania
 F_p - składowa promieniowa siły skrawania
 F_{x1} - siła rozciągająca
 I - moment bezwładności przekroju
 j - sztywność układu, elementów, części
 j_k - sztywność konika
 j_o - sztywność obrabiarki
 L - długość wałka obrabianego
 M - moment zginający
 n - prędkość obrotowa wrzeciona
 r_e - promień zaokrąglenia naroża ostrza
 R_a - średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości
 R_z - wysokość chropowatości wg 10 punktów
 W - wskaźnik wytrzymałości na zginanie
 v_c - prędkość skrawania
 x, y, z - osie prostokątnego układu współrzędnych
 y - odkształcenia sprężyste części obrabianej, układu technologicznego (UT)
 γ - kąt natarcia
 κ, κ' - kąt przystawienia: główny, pomocniczy
 λ - kąt pochylenia krawędzi skrawającej ostrza
 Ψ - współczynnik pochłaniania
 ω - częstość

SKRÓTY

- HB** - twardość Brinella
HRC - twardość wg Rockwella w skali C
US - układ sprężysty
UT - układ technologiczny (OUPN)
OUPN - obrabiarka – uchwyt – przyrząd – narzędzie
UAS - układ sterowania automatycznego
NC - Numerical Control
PSH - podtrzymka samocentrująca hydrauliczna
CHAFC - charakterystyka amplitudowo – fazowo – częstotliwościowa

LITERATURA

1. Abakumov A., Taranenko V., Zubrzycki J. Wolos D.: Controlling the dynamical system of machine tools by elastic–deformable shafts machining. Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroenija: Mezhdunarodnyj sbornik nauchnykh trudov. Vypusk 32. Doneck: DonNTU 2006, s. 272 – 278.
2. Abakumov A.M., Taranenko V.A., Taranenko G. V.: Zadnjaja babka tokarnogo stanka. MKI B23B 23/00. Zajavka na patent Rossii. Iskh. № 2/263 ot 19.02.97.
3. Abakumov A.M., Taranenko V.A., Taranenko G. V.: Spособ mekhanicheskoy obrabotki nezhestkikh osesimetricznykh detalej i ustrojstvo dlia ikh realizacii. MKI B23B 1/00, B23Q 15/00. Zajavka na patent Rossii. № 96109283 ot 22.05.96.
4. Abakumov A.M., Vidmanov Ja. I., Mikhelevich V.N.: Algoritmizacija processa prodol'nogo tochenija. Stanki i instrument № 9, 1972, s. 29–31.
5. Adaptivnoe upravlenie tekhnologicheskimi processami. Solomencev Ju.M., Mitrofanov V.G., Protopopov S.P., i dr.: Moskva: Mashinostroenie 1980.
6. Adaptivnoe upravlenie stankami (red. B. S. Balpkshina). Moskva: Mashinostroenie 1973.
7. Anel'chik D.E., Fotti S. S.: Droblenie struzhki pri obrabotke. Mashinostroitel' № 1, 1988, s. 45–46.
8. Asercin R.I., Skprypin U. V.: Tekhnologicheskaja i ehkspluatacionnaja nasledstvennost' i ee vlijanie na dolgovechnost' mashiny. Minsk: Nauka i tekhnika 1978.
9. Automation and control in industry. Editors Świć A., Lipski J. Lublin: Lublin University of Technology 2008, 77 s.
10. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 559970, S21D 1/30; 1977.
11. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1230715, V21D 3/16, 1986.
12. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 113583. Spособ vibroobrabotki detalej. V.G. Gorenko i dr. 1985. BI №3.
13. Bakhvalov N.S.: Chislennye metody. Moskva: Nauka 1973.
14. Balakshin B. S.: Osnovy tekhnologii mashinostroenija. Moskva: Mashinostroenie 1969.
15. Barmin B. P.: Vibracii i rezhimy rezanija. Moskva: Mashinostroenie 1972.
16. Bazrov B.M.: Osnovy tekhnologii mashinostroenija. Moskva: Mashinostroenie 2007.

17. Bazrov B.M.: Raschety tochnosti mashin na EhVM. Moskva: Mashinostroenie 1984.
18. Bazrov B. M.: Tekhnologicheskie osnovy proektirovanija samopod-nastraivshijjsja stankov. Moskva: Mashinostroenie, 1978.
19. Biderman V. L.: Prikladnaja teorija mekhanicheskikh kolebanijj. Moskva: Vysshaja shkola 1972.
20. Bojjko V. B.: Obespechenie kachestva detalejj tipa valov posredstvom upravlenija naprjazhjonno-deformirovannym sostojaniem. Problemy ehkspluatacii i remonta avtomobil'nykh transportnykh sredstv: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchn. – tekhn. Konferencii Sevastopol': SevGTU, 1997, s. 48 – 50.
21. Bojjko V.B., Mitrofanov V. G., Skhirtladze A. G., Taranenko V. A.: Modelirovanie tochnosti modulejj tochenija s uchetom progibov ot osta-tochnykh naprjazhenijj. Technologia i Automatyzacja Montažu, wydanie specjalne Kwartalnika Naukowo – Technicznego do Nr 4(26) 1999, s. 23 – 27.
22. Bojko V., Mitrofanov V., Taranenko V.: Precision enhancement of the weak shafts by forming state conditions. International conferece technologia' 97. 9 - 10.09.1997, Bratislava: Proceeding Volume II, s. 442.
23. Borodjanskijj V.I., Klevcov V.A., Mukhanko V.I.: Avtomatizirovannaja sistema proektirovanija tekhnologii mekhanicheskojj obrabotki. Pribory i sistemy upravlenija № 11, 1981, s. 2–3.
24. Bubnicki Z.: Identyfikacja obiektów sterowania. Warszawa: PWN 1974.
25. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. Warszawa: WNT 1998.
26. Carrino L., Giorleo G., Polini W., Prisco U.: Dimensinal errors in longitudinal turning based on the unified generalized mechanics of cutting approach. Part II: Machining process analysis and dimensional error estimate. Intenational Journal of Machine Tools & Manufacture 2002; 42: 1517–1525.
27. Choroszy B.: Technologia maszyn. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2000.
28. Cichosz P.: Narzędzia skrawające. Warszawa: WNT 2006.
29. Cichosz P. (red.), Darlewski J., Dopierała A., Grzesik W., Karpiński T., Koch J., Mackiewicz H., Pszczółowski W., Samek A., Stós J., Streubel A., Żebrowski H.: Nowoczesne narzędzia skrawające i oprzyrządowanie. Automatyzacja produkcji '97. Innowacje w technice i zarządzaniu. Tom 1. Wrocław: Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej 1997, s. 213 – 242.
30. Cieniuszek W., Świć A.: Analiza porównawcza badań teoretycznych i eksperymentalnych sterowania dokładnością szlifowania wałków o małej sztywności. Problemi tekhniki. Nauchno-virobochnyj zhurnal № 2, 2004, s. 239 – 242.

31. Cieniuszek W., Świć A.: Wpływ podatności układu technologicznego na dokładność kształtu wałków o małej sztywności przy szlifowaniu. *Folia Societatis Scientiarum Lublinensis*, Vol. 12, 2003, technika, s. 18 – 26.
32. Cylc R., Świć A.: Projektowanie procesów technologicznych. *Automatyzacja procesów technologicznych*. Lublin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej 1985, 130 s.
33. Darlewski J., Gawlik J., Grzesik W., Jemielniak K., Kawalec M., Ruszaj A., Weiss E., Żebrowski H. (red.): *Trendy w ubytkowych metodach obróbki. Automatyzacja produkcji '97. Innowacje w technice i zarządzaniu*. Tom 1. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1997, s. 175–212.
34. Davidenkov N.N.: *Ob ostatochnykh naprjazhenijakh*. Zavodskaja laboratorija. Moskva: 1935, t.4, №6, s. 688 – 698.
35. Dmochowski J.: *Podstawy obróbki skrawaniem*. Warszawa: WNT 1983.
36. Dmochowski J., Uzarowicz A.: *Obróbka skrawaniem i obrabiarki*. Warszawa: PWN 1984.
37. Drachev A.O.: *Novye metody vibrostabilizacionnoj obrabotki valov*. Tezisy dokladov mezhdunarodnoj konferencii: *Problemy ehkspluatacii avtomobil'nykh transportnykh sredstv Sevastopol'*: SevNTU 1997, s. 55 – 56.
38. Drachev A.O., Alekseev O. K.: *Model' processa termosilovoj obrabotki osesimetriceskikh detalej*. Trudy 2 – ojj mezhdunarodnoj konferencii: *Nauchno – tekhnicheskie problemy prognozirovanija nadezhnosti i dolgovechnosti metallokonstrukcii i metody ikh reshenija*. Sankt Petersburg: Izdatel'stvo SRBGtU 1997, s. 32 – 34.
39. Drachev O. I.: *Tekhnologija izgotovlenija malozhestkikh osesimetricznykh detalej*. Sankt Petersburg: Izdatel'stvo Politehnika 2005, 289 s.
40. Drachev A.O., Taranenko G.V., Taranenko V.A., Svic' A.: *Sposob termomekhanicheskij obrabotki nezhestkikh dlinnomernykh valov*. Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: *Materialy mezhdunarodnoj nauchno – tekhnicheskij konferencii*. Sevastopol': Izdatel'stvo SevNTU 2009, c. 56 – 59.
41. Drachev A.O., Drachev O. I., Taranenko G.V., Taranenko V.A., Svic' A.: *Termosilovaja obrabotka stupenchatykh osesimetricznykh detalej*. Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskij konferencii*. Sevastopol': Izdatel'stvo SevNTU 2009, s. 18 – 21.
42. Drachev O. I., Skidanenko V. I., Mazur V. K.: *O vozmozhnosti upravlenija osevmi nagruzkami pri termomekhanicheskij obrabotke osesimetricznykh detalej*. Identifikacija i avtomatizacija tekhnologicheskikh

- processov. Kuibyshev: Aviacionnyj institut 1988, s. 99 – 105.
43. Drachev A.O., Rastorguev D.A., Taranenko G.V., Taranenko V.A., Svic' A.: Issledovanie dinamicheskoy sistemy tokarnoy obrabotki nezhestkikh valov. Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroenija: Mezhdunarodnyj sbornik nauchnykh trudov. Doneck: DonNTU, 2009. Vypusk 38, c. 83 – 94.
 44. Draczow O., Taranenko W.: Technologia modułowa wytwarzania osiowosymetrycznych wałów długowymiarowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 230 Mechanika, z. 67. Modułowe technologie i konstrukcje w budowie maszyn. Rzeszów 2006, s. 47 – 50.
 45. Draczow O., Taranenko W., Hałas W., Taranenko G.: Sterowanie obróbką wibracyjną wałów o małej sztywności. Pomiary. Automatyka. Robotyka. Miesięcznik naukowo – techniczny nr 2, 2008, s. 224 – 227.
 46. Drachev O. I., Taranenko G. V., Taranenko V. A.: Eksperimental'nye issledovaniya stabilizacii osi malozhestkoy detali pri ispol'zovanii samocentrirujushchikh ljunetov. Mashinostroitel'nye tekhnologii i tekhnika avtomatizacii. Erevan: GIUA 2008.
 47. Draczow A., Taranenko G., Taranenko W., Hałas W., Świć A.: Sterowanie obróbką wibracyjną wałów długowymiarowych. Pomiary. Automatyka. Robotyka. Miesięcznik naukowo – techniczny nr 2, 2009, s. 132 – 138.
 48. Draczow A., Taranenko G., Taranenko W., Hałas W., Świć A.: Sterowanie układem dynamicznym obróbki części osiowosymetrycznych o małej sztywności. Pomiary. Automatyka. Robotyka. Miesięcznik naukowo – techniczny nr 2, 2009, s. 125 – 131.
 49. Draczow A., Taranenko G., Taranenko W., Świć A.: Sterowanie dokładnością obróbki elektrochemicznej wałów długowymiarowych. Pomiary. Automatyka. Robotyka. Miesięcznik naukowo – techniczny, nr 2, 2009, s. 139 – 141.
 50. Drachev A.O., Drachev O. I., Taranenko G. V., Taranenko V. A., Svic' A.: Termosilovaja obrabotka stupenchatykh osesimmetrichnykh detalej. Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Sevastopol': Izdatel'stvo SevNTU 2009, s. 18 – 21.
 51. Drachev A., Taranenko G., Taranenko V., Svic' A.: Sposob termomekhanicheskoy obrabotki nezhestkikh dlinnomernykh valov. Modern technologies, quality, restructuring. Kishinev 2009.
 52. Draczow O., Taranenko W., Świć A., Hałas W.: Controlling thermal deformations during mechanical shafts processing. Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroenija: Mezhdunarodnyj sbornik nauchnykh trudov. Doneck: DonNTU 2007. Vypusk 34, s. 278 – 283.

53. Draczow O., Taranenko W., Zubrzycki J., Halas W.: Stanowisko badawcze i układ sterowania automatycznego procesu obróbki wałów. Przegląd Mechaniczny Nr 5S, 2007, s. 53-55.
54. Fedorenko B. Ja i dr.: Primenenie sbornykh rezcov v uslovijakh GPS. Mashinostroitel' № 2, 1987, s. 17.
55. Feld M.: Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn. Warszawa: WNT 2007.
56. Feld M.: Technologia budowy maszyn. Warszawa: PWN 2000.
57. Feldstein E., Maruda R.: Wpływ chłodzenia mgłą emulsyjną na wybrane parametry chropowatości powierzchni podczas toczenia stali C45. Przegląd Mechaniczny nr 12, 2007, s. 15 – 18.
58. Frer F., Ortenburger F.: Vvedenie v ehlektronnuju tekhniku regulirovanija. Moskva: Ehnergija 1973, 423 s.
59. Garbarczuk W., Zinowicz Z., Świć A.: Kiberneticheskijj podkhod k proektirovaniju sistem zashhity informacii. Ukrainskaja akademija informatiki, Volynskijj gosudarstvennyj universitet im. Lesi Ukrainki, Ljublinskijj politekhnicheskijj universitet. Kiev-Luck-Lublin 2003, 657s.
60. Garbarczuk W., Świć A.: Podstawy ochrony informacji. Lublin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej 2005, 502 s.
61. Garbarczyk W., Świć A. Wójcik W.: Projektowanie systemów ochrony informacji. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2006, 218 s.
62. Goranskijj G. K., Benderova Eh. I. Tekhnologicheskoe proektirovanie v kompleksnykh avtomatizirovannykh sistemakh podgotovki proizvodstva. Moskva: Mashinostroenie 1981.
63. Grzesik W.: Podstawy skrawania materiałów metalowych. Warszawa: WNT 1998.
64. Hałas W., Taranenko W.: Badania doświadczalne dokładności obróbki wałów w przemyśle maszynowym. W: Zagadnienia pękania i skrawania materiałów plastycznych. Monografia, red. Józef Jonak. Lublin: Wydawnictwo Lubelskiego Towarzystwa Naukowego 2008, s. 75 – 86.
65. Hałas W., Taranenko G., Taranenko W., Świć A.: Modelowanie poszczególnych operacji procesu technologicznego wytwarzania wałów. Modelowanie inżynierskie, Tom 6, nr. 37. Gliwice: Zakład Graficzny Politechniki Śląskiej 2009, s. 121 – 130.
66. Hałas W., Taranenko G., Taranenko W., Świć A.: Systemowe podejście do modelowania operacji procesu technologicznego wytwarzania wałów. Modelowanie inżynierskie, Tom 6, Nr.37. Gliwice: Zakład Graficzny Politechniki Śląskiej 2009, s. 131 – 140.
67. Halas W., Taranenko W., Świć A.: Kształtowanie struktury operacji procesu technologicznego obróbki wałów w CIM. Przegląd Mechaniczny Nr 5S, 2007, s. 62 – 65.

68. Halas W., Taranenko V., Swic A., Taranenko G.: Investigation of influence of grinding regimes on surface tension state N.T. Nguyen et al. (Eds.): IEA/AIE 2008, LNAI 5027, pp. 749 – 756, 2008. © Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2008.
69. Halas W., Taranenko V., Swic A., Taranenko G.: Designing structure of operations of technological process of machining shafts in CIM considering the technological inheritance. Preprints 9th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'08) Szczecin, Poland 2008, s. 245 – 250.
70. Halas W., Taranenko V., Świć A.: The technological inheritance impact in the holder manufacturing. Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: Materialy mezhdunarodnoj nauchno – tekhnicheskoy konferencii. Sevastopol': Izdatel'stvo SevNTU 2007, s. 5 – 7.
71. Halas W., Taranenko V., Swic A., Taranenko G.: The technological inheritance for shafts processing and recommended order of operations. Acta Mechanica Slovaca, Journal published by Faculty of Mechanical Engineering, the Technical University in Kosice, Kosice, 2–A, 2008, Ročník 12. pp. 249 – 257.
72. Ishlinskij V. A.: Prikladnye zadachi mekhaniki, Kniga 2, Mekhanika uprugikh i absoljutno tverdykh tel. Moskva: Nauka, 1986.
73. Il'nickij I.I.: Kolebanija v metallorezhushchikh stankakh i puti ikh ustraneniya. Moskva – Sverdlovsk: Mashgiz 1958.
74. Informacyjne aspekty zarządzania i sterowania produkcją. Red. A. Świć. Lublin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej 2005, 199 s.
75. Ivashov – Musatov O. S.: Teorija verojatnostej i matematicheskaja statistika. Moskva: Nauka 1979.
76. Iovovich V. A.: Perekhodnye matricy v dinamike uprugikh sistem. Moskva: Mashinostroenie 1969, 199 s.
77. Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych. Warszawa: WNT 2007.
78. Jashhericyn P. I., Ryzhov E. V., Averchinkov V.I.: Tekhnologicheskaja nasledstvennost' v mashinostroenii. Minsk: Nauka i tekhnika 1977.
79. Jaworski J.: Tendencje rozwoju materiałów narzędzi skrawających. Przegląd Mechaniczny nr 11, 2005, s. 33 – 36.
80. Jemielniak K.: Przemysłowe układy diagnostyki stanu narzędzia i procesu skrawania. Mechanik nr 11, 1998, s. 625 – 631.
81. Kabaldin U. G. i dr.: Uprochnenie tverdosplavnogo instrumenta. Mashinostroitel' № 3, 1988, s. 25 – 26.
82. Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej, ścierniej i erozyjnej. Warszawa: WNT 1973.
83. Karpushkin V. A.: Issledovanie uprugikh progibov nezhestkikh detalej pri tokarnoj obrabotke s rastjazheniem. Vesci Akademii navuk Belaruskai SSR, Ser. Fiehika – tekhnichnykh nauk № 1, 1978, s. 6 – 9.

84. Klusin M. I.: Rezanie metallov. Moskva: Mashgiz 1953.
85. Kocjubinskijj O. V.: Koroblenie chugunnykh otlivok ot ostatochnykh naprjazhenijj. Moskva: Mashinostroenie 1965, 176 s.
86. Koptev D.V.: Zakonomernosti dvizhenija chastic pyli v zone dejstvija mestnogo otsosa. Sbornik nauchnykh trudov. Moskva: VCSPS. Vypusk. 57, 1982, s. 9 – 14.
87. Korzyński M.: Metodyka Eksperymentu. Warszawa: WNT 2006.
88. Kosmol J.: Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem. Warszawa: WNT 1995.
89. Kudinov V. A.: Dinamika stankov. Moskva: Mashinostroenie 1967.
90. Kudinov V. A., Todorov N. T.: Zakonomernosti razvitija kolebanijj i volnistosti kruga i izdelija pri vreznom shlifovanii. Stanki i instrument № 2, 1970, s. 1 – 3.
91. Kukiełka L.: Podstawy badań inżynierskich. Warszawa: PWN 2002.
92. Kumabe D.: Vibracionnoe rezanie. Perevod s ang. C. L. Maslennikova. Pod redakcej I. I. Portnova, V. V. Belova. Moskva: Mashinostroenie 1985.
93. Kuznecov Ju. V., Kukharec A. V.: Novye zazhimnye mekhanizmy stankov – avtomatov. Kiev: Tekhnika 1979.
94. Lipski J., Świć A.: Modelowanie numeryczne drgań w procesach skrawania. MECHANICS 2004. Proceedings of the International Scientific Conference. Rzeszów 2004, s. 225 – 228.
95. Makarov A. D.: Optimizacija processov rezanija. Moskva: Mashinostroenie 1976.
96. Marchełek K.: Dynamika obrabiarek. Warszawa: WNT 1995.
97. Matalin A. A.: Tekhnologija mekhanicheskijj obrabotki. Moskva: Mashinostroenie 1977.
98. Meldner B., Darlewski J.: Narzędzia skrawające w zautomatyzowanej produkcji. Warszawa: WNT 1991.
99. Mirzhakandov A. R.: Primenenie bystrosmennykh sbornykh rezcov – vstavok. Mashinostroitel' № 4, 1988, s. 31 – 32.
100. Mikhel'kevich V. N.: Avtomaticheskoe upravlenie shlifovaniem. Moskva: Mashinostroenie 1975.
101. Modeling and designing in production engineering. Editors Świć. A., Lipski J. Lublin: Lublin University of Technology 2009, 150 s.
102. Modern techniques in mechanical engineering. Editors Świć. A., Lipski J. Lublin: Lublin University of Technology 2009, 150 s.
103. Monashkov I.A., I. A., Monashkov V. I.: Ustroistvo dlja obrabotki nezhestkikh stupenchatykh valov. Stanki i instrument № 3, 1976, s. 33 – 35
104. Muminov N. A., Mitrofanov V.G: Adaptivnoe upravlenie tekhnologicheskimi processami v mashinostroenii. Tashkent: FAN 1976.
105. Niezgodziński T.: Mechanika ogólna. Warszawa: PWN 2006.

106. Niezgodziński M., Niezgodziński T.: Wytrzymałość materiałów. Warszawa: PWN 2004.
107. Niszczeta W.W., Świć A., Płowaś B.: Ossobennosti dinamiki processa rezanija pri mnogoprokhodnom tochenii. V: Mezhdunarodnaja Nauchno – tekhnicheskaja Konferencija: Tochnost' i nadezhnost' tekhnologicheskikh transportnykh sistem. Penza 1999, s. 159 – 162.
108. Nowicki B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni. Warszawa: WNT 1991.
109. Oczos K.E.: Rozwój innowacyjnych technologii ubytkowego kształtowania materiałów. Cz. I. Obróbka skrawaniem. Mechanik nr 8 – 9, 2002, s. 537 – 550.
110. Oprędkiewicz J.: Podstawy niezawodności obrabiarek i systemów produkcyjnych. Warszawa: WNT 1989.
111. Ordinarcev I.A., Khaev G.L., Gudzenko V. S.: Sbornye instrumenty povyshennoj zhestkosti. Mashinostroitel' № 3, 1982, s. 29 – 30.
112. Ore O.: Teorija grafov. Pod redakciej N. N. Vorob'eva. Moskva: Nauka 1968.
113. Orlikov M.L.: Dinamika stankov. Kiev: Vyssha shkola 1989, 272 s.
114. Orłoś. Z.: Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń. Warszawa: PWN 1977.
115. Osiński Z.: Teoria drgań. Warszawa: PWN 1980.
116. Ostatocne naprjazhenija. Red. Osgud V.R.. B.:IL, 1957, 169 s.
117. Patent № 2169058 RF, MKI V23V 29/03. Ustrojstvo dlja obrabotki glubokikh otverstijj.
118. Pavlov A. G.: Prognozirowanie dinamicheskijj tochnosti detalej. Mashinostroitel' № 9, 1986, s. 23.
119. Podporkin V. G.: Obrabotka nezhestkikh detalej. Moskva: Mashgiz 1959, 231 s.
120. Poduraev V. N.: Avtomaticheski reguliruemye i kombinirovannye processy rezanija. Moskva: Mashinostroenie 1977.
121. Postnikov V. S.: Vnutrennee trenie v metallakh. Moskva: Metallurgija 1974, 23 s.
122. Projektowanie i automatyzacja procesów produkcyjnych. Redakcja Antoni Świć. Lublin: Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej 2005, 172 s.
123. Projektowanie systemów i procesów technologicznych. Monografia pod red. A. Świcia. Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe 2003, 211 s.
124. Puff T.: Technologia budowy maszyn. Warszawa: PWN 1982.
125. Push V. Eh., Pigert R., Sosonkin V. L.: Avtomaticheskie stanocnyye sistemy. Moskva: Mashinostroenie 1982.
126. Rastarguev D., Drachev A., Taranenko G., Taranenko V., Svic' A.: Sposob vibracionnoj obrabotki dlinomernykh valov. V monografii: Konstruktorsko-tekhnologicheskie aspekty informatiki v promyshlennosti.

- Pod redakcejj Viktora Taranenko. Lublin: Wydawnictwo Lubelskiego Towarzystwa Naukowego 2009, s. 61 – 69.
127. Raputin F. O.: Opisanie metoda ispol'zovanija vibracii v oblasti mekhanicheskoyj obrabotki dlja izmerenija vnutrennikh naprjazhenii. Perevod s nemeckogo № 5030.
128. Razrabotka i vnedrenie rekomendacii po snizhenii koroblenija detalej: otchet NIIRTmash. Rukovoditel' V.A. Kolot. Inv № 0281.2.004482. Kramatorsk 1981, 78 s.
129. Reshetov D. I., Kaminskaja V. V. i dr.: Detali i mekhanizmy metallorzhushhikh stankov, T. 1, T. 2. Moskva: Mashinostroenie 1972.
130. Ryzhov M. N. Vibracii pri rezanii metallov i metody ikh ustraneniya. Moskva: Mashgiz 1961.
131. Samopodnastraivajushhiksja stanki. Upravlenie uprugimi peremeshhenijami na stankakh. Pod red. B. S. Balakhshina, 2-e izd. Moskva: Mashinostroenie 1970.
132. Schmidt J., Lang H., Dyck M.: Trockenbearbeitung ist wirtschaftlich und umweltfreundlich. Maschinenmarkt nr 29, 2001, s. 20 – 23.
133. Senczyk D.: Dyfraktometria rentgenowska w badaniach stanu naprężeń i własności sprężystych materiałów polikrystalicznych. Poznań: Wyd. Politechniki Poznańskiej 1995.
134. Senczyk D.: Naprężenia własne. Wstęp do generowania, sterowania i wykorzystania. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1995.
135. Senczyk D.: Makronaprężenia. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1997.
136. Senczyk D.: Rentgenowskie pomiary tensora naprężenia. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1998.
137. Senczyk D.: Podstawy tensometrii rentgenowskiej. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2005.
138. Shron L., Bogucki W., Świć A., Taranenko W.: Eksploatacja i remont maszyn technologicznych w elastycznych systemach produkcyjnych. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2007, 192 s.
139. Smazochno – okhlazhdajushie tekhnologicheskie sredstva i ikh primenenie pri obrabotke rezaniem (Pod obshhejj redakcejj. L. Khudobina). Spravochnik. Moskva: Mashinostroenie 2006.
140. Sobaszek A., Niszcza W., Świć A.: Jakość powierzchni przy wieloprześciowej obróbce tokarskiej. W monografii: Technologiczne systemy informacyjne. Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe 1999, s. 150 – 152.
141. Sobaszek A., Niszcza W., Świć A.: Obespechenie kachestva kachestva poverkhnosti pri mnogoprokhodnoj tokarnoj obrabotke. Mezhdunarodnaja Nauchno – Tekhnicheskaja Konferencija: Tochnost' i nadezhnost' tekhnologicheskikh i transportnykh sistem. Penza 1999, s. 50 – 52.

142. Sokolovskijj A. P.: Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroenija. Moskva–Leningrad: Mashgiz 1952.
143. Sogalevich V. M., Savelev V.F.: Stabil'nost' svarnykh soedinenijj. Moskva: Mashinostroenie 1986, 264 s.
144. Sredstva zashity v mashinostroenii (Pod obshhejj redakcej S. V. Belova). Spravochnik. Moskva: Mashinostroenie 1989.
145. Stiskin G. M.: Progressivnye prispособlenija i instrumenty dlja tokarnykh rabot. Kiev: Tekhnika, 1982.
146. Świć A.: Elastyczne systemy produkcyjne. Technologiczno – organizacyjne aspekty projektowania i eksploatacji. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 1998, 229 s.
147. Świć A.: Reguljuvannja jakosti poverkhni pri bagatoprokhidnomu tokarnomu obrablenniu. 6–jj Mizhnarodnijj Simpozim ukrains'kikh inzhenerov–mekhanikov u L'vovi. 2003, s. 102 – 103.
148. Świć A., Gorecki T.: Program komputerowy doboru warunków skrawania przy toczeniu. W monografii Problemy kształcenia technicznego w dobie transformacji gospodarczej kraju. Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe 1996, s. 100 – 106.
149. Świć A., Gorecki T.: Zastosowanie wspomagania komputerowego dla doboru warunków skrawania przy toczeniu. Informatyka stosowana. Numer specjalny S2/96. I Regionalna Konferencja Informatyczna. Kazimierz Dolny, s. 137 – 140.
150. Świć A., Hałas W.: Wpływ naprężeń na dokładność wytwarzania części maszyn. Scientific bulletin of Chełm. Section of technical sciences, s. 209 – 213.
151. Świć A., Maliszewski A., Sobaszek A.: Eksperymentalne określenie relacji pomiędzy parametrami obróbki przy wieloprześciowym toczeniu a parametrami jakości powierzchni. W monografii: Systemy informacyjne i informatyczne w inżynierii produkcji. Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe 2003, s. 35 – 41.
152. Świć A., Taranenko W., Cieniuszek W., Wartacz A.: Obespechenie kachestva poverkhnosti pri mnogoprokhodnoj tokarnoj obrabotke. Materialy mezhdunarodnoj nauchno – tekhnicheskoy konferencii: Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija. Sevastopol' 2004, s. 6 – 10.
153. Świć A., Płowaś B., Sobaszek A.: Tochnost' poverkhnosti pri mnogoprokhodnoj tokarnoj obrabotke. Materialy mezhdunarodnoj naguchno – tekhnicheskoy konferencii: Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija. Sevastopol' 2002, s. 206 – 213.
154. Świć A., Sobaszek A.: Geometryczna jakość powierzchni przy wielozabiegowym toczeniu. W monografii: Technologiczne systemy informacyjne w inżynierii produkcji i kształceniu technicznym. Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe 2001, s. 511 – 515.

155. Świć A., Sobaszek A., Cieniuszek W.: Reguljuvanija jakosti poverkhni pri bagatoprshhkhidnomu tokarnomu obroblenni. Mashinoznavstvo. Vseukrains'kij shhomisjachnijj naukowo – tekhnichnijj i virobnichijj zhurnal № 8, 2003 s. 51 – 54.
156. Świć A., Taranenko W.: Projektowanie technologiczne elastycznych systemów produkcyjnych. Lublin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej 2003, 320 s.
157. Świć A., Wartacz A.: Trendy rozwojowe obróbki tokarskiej. Folia Societatis Scientiarum Lublinensis, Vol. 12, 2003, technika, s. 27 – 36.
158. Świć A., Wartacz A.: Vlijanie parametrov obrabotki rezaniem pri tochenii na prochnost' lezviya i na kachestvo obrabatyvaemojj poverkhnosti. Problemi tekhniki. Nauchno–virobochnyj zhurnal № 3, 2003, s. 81 – 86.
159. Świć A., Zubrzycki J., Wartacz A.: Vlijanie parametrov mnogoprokhodnojj tokarnoj obrabotki na iznos instrumenta. 6–jj Mizhnarodnijj Simpozim ukrains'kikh inzhenerov-mekhanikov u L'vovi. L'viv 2003, s. 90 – 91.
160. Taranenko V., Taranenko G.: Modelirovanie tochnosti tekhnologicheskikh processov obrabotki rezaniem osesimetrichnykh detalejj. VI Międzynarodowe Sympozjum: Obróbka skrawaniem i narzędzia. Kraków: OSIN 1999, s. 263 – 270.
161. Taranenko G., Taranenko V., Wolos D.: System causal–clause analysis of recision and safety relations by shafts with small stiffness controlling. V – th International Congress “Mechanical engineering technologies, 06” (mt,'06), september 20 –23.2006, Varna – Bulgaria. Proceedings, s. 80 – 83.
162. Taranenko W., Świć A.: Technologia kształtowania części maszyn o małej sztywności. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2005, 282 s.
163. Taranenko W., Świć A.: Urządzenia sterujące dokładnością obróbki części maszyn o małej sztywności. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2006, 186 s.
164. Taranenko W., Taranenko G., Szabelski J., Świć A.: Identyfikacja układu dynamicznego szlifowania wałów o małej sztywności. Modelowanie Inżynierskie, Tom 4, Nr 35, Gliwice: Zakład Graficzny Politechniki Śląskiej 2008, s. 115 – 130.
165. Taranenko G., Taranenko V., Szabelski J., Swic A.: Indentification and automation of shaft machining in elastic–deformable condition. Information systems architecture and technolodgy, Model Based Decisions, Part IV, Wrocław University of Technolodgy. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 2008, pp. 203 – 223.
166. Taranenko G., Taranenko V., Szabelski J., Swic A.: Systemic analysis of models of dynamic systems of shaft machining in elastic-deformable condition. Applied Computer Science. Business Process Optimisation. Vol. 3, No 2, 2007 Technical University of Žilina, Slovenska Republika.

167. Taranenko W., Świć A., Bagimow I., Taranenko G., Szabelski J.: Konik obrabiarki. Zgłoszenie w sprawie uzyskania patentu P 386 794 z dnia 2008.12.12.
168. Taranenko W., Świć A., Bagimow I., Taranenko G., Szabelski J.: Konik obrabiarki: Zgłoszenie w sprawie uzyskania patentu P 386795 z dnia 2008.12.12.
169. Taranenko V., Świć A., Wołos D.: Algoritmization of automated turning process. Proceedings of the 9th international scientific conference flexible technologies – MMA 2006, 15 – 16 June, 2006, Novi Sad, Serbia and Montenegro, Novi Sad, 2006, s. 129 – 130.
170. Taranenko W., Świć A., Wołos D.: Kolejność procedur i operacji projektowych dla typowego procesu zautomatyzowanego projektowania procesów technologicznych wałów o małej sztywności. W: Urządzenia sterujące dokładnością obróbki części maszyn o małej sztywności. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2006, s. 45 – 60.
171. Taranenko W., Świć A., Wołos D.: Modelowanie parametrów chropowatości powierzchni przy toczeniu sprężystości – odkształcalnych wałów o małej sztywności. W: Technologia kształtowania części maszyn o małej sztywności. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2005, s. 246 – 267.
172. Taranenko W., Świć A., Wołos D., Taranenko G.: Konik obrabiarki. Zgłoszenie w sprawie uzyskania patentu P 384 071 z dnia 17.12.2007.
173. Taranenko W., Świć A., Wołos D., Taranenko G.: Konik obrabiarki. Zgłoszenie w sprawie uzyskania patentu P 384 072 z dnia 17.12.2007.
174. Taranenko W., Świć A., Wołos D., Taranenko G., Szabelski J.: Konik obrabiarki. Zgłoszenie w sprawie uzyskania patentu P 386 792 z dnia 2008.12.12.
175. Taranenko W., Świć A., Wołos D., Taranenko G., Szabelski J.: Konik obrabiarki. Zgłoszenie w sprawie uzyskania patentu P 386 793 z dnia 2008.12.12.
176. Tverskoy M. M.: Avtomaticheskoe upravlenie rezhimami obrabotki detalej na stankakh. Moskva: Mashinostroenie 1982.
177. Tymowski J.: Automatyzacja procesów technologicznych w przemyśle maszynowym. Warszawa: WNT 1966.
178. Tymowski J.: Technologia budowy maszyn. Warszawa: WNT 1989.
179. Uajld D.: Metody poiska ehkstreuma Moskva: Nauka 1967.
180. Vasil'evich L. A.: Tokarnaja obrabotka nezhestkikh valov s prednamerennym smeshheniem zadnego centra. Stanki i instrument № 7, 1971, s. 20 – 21.
181. Vejic V. A., Dondoshanskij V. K., Chirayev V. Iju: Vynuzhdenne kolebanija v metallovezhushikh stankakh. Moskva – Leningrad: Mashgiz 1959.

LITERATURA

182. Vlasov A. F.: Udalenie pyli i struzhki ot rezhushhikh instrumentov. Moskva: Mashinostroenie 1982.
183. Weniger ist oft mehr, maschine + werkzeug nr 9, 1996, s. 81 – 84.
184. Wołos D.: Konstrukcja konika tokarki do obróbki wałów w stanie sprężyste–odkształcalnym. Przegląd Mechaniczny nr 12S, 2006, s. 154 – 155.
185. Wolos D., Taranenko G.: Safety analysis of automated machining. ROBTEP 2006 Automation. Robotics in theory and practice. Košice: Acta Mechanica Slovaca 2006.
186. Wolos D., Taranenko V.: Accuracy reliability and safety of automated lathe work. Materiały mezhdunarodnojj nauchno – tekhnicheskoyj konferencii: Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija. Sevastopol' 2006, s. 45 – 46
187. Wołos D., Taranenko V., Świć A.: Increasing the technological reliability of shafts' with small stiffness machining. Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroenija: Mezhdunarodnyjj sbornik nauchnykh trudov. Doneck: DonNTU, 2007, Vypuskk. 34, s. 291 –297
188. Wołos D., Taranenko W., Świć A.: Klasyfikacja metod osiągnięcia niezawodności technologicznej obróbki wałów o małej sztywności. Przegląd Mechaniczny nr 5S, 2007, s. 154 – 155.
189. Wolos D., Taranenko V, Swic A.: Technological bases of controlling the precision and safety of shafts machining. Materiały mezhdunarodnojj nauchno – tekhnicheskoyj konferencii: Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija. Sevastopol' 2006, s. 123 – 124.
190. Wysiecki M.: Nowoczesne materiały narzędziowe. Warszawa: WNT 1997.
191. Zhyranov E. V., Zharin Ju. S.: Vybor tverdykh splavov dlja rezhushhikh plastin. Mashinostroitel' № 10, 1985, s. 19 – 20.
192. Zhitomirskijj V. K. Mekhanicheskie kolebanija i praktika ikh ustranienija. Moskva: Mashinostroenie, 1966.

TECHNOLOGIA OBRÓBKI WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

STRESZCZENIE

Monografia jest syntetyczną prezentacją prac prowadzonych przez autora z zakresu technologii wytwarzania części o małej sztywności.

Celem pracy jest przedstawienie możliwości intensyfikacji procesów wytwarzania długowymiarowych wałów o małej sztywności w oparciu o opracowane przez autora i kierowany przez niego zespół naukowy rozwiązania

Przeanalizowano procesy obróbki wałów toczeniem, wibracyjnej oraz ciepłno siłowej.

Utworzono modele matematyczne obróbki wałków sprężystości – odkształcalnych przy warunkach ustalonych, opracowano podstawy teoretyczne metod sterowania dokładnością obróbki oraz metody technologiczne podwyższenia dokładności wytwarzania. Przedstawiono metodę technologiczną sterowania dokładnością obróbki wałków o małej sztywności, układy sterowania automatycznego, opracowane konstrukcje: samocentrującej podtrzymki hydraulicznej oraz koników do tokarek, przeznaczone do stosowania przy różnych warunkach produkcji.

Zaprezentowano podstawy sterowania obróbką wibracyjną wałów o małej sztywności, wpływ dziedziczności technologicznej przy obróbce wałów, zalecaną kolejność operacji w procesie technologicznym oraz urządzenie do obróbki wibracyjnej wałów długowymiarowych o małej sztywności.

Opracowano:

- modele matematyczne obróbki ciepłno – siłowej, umożliwiające zastosowanie metody częstotliwościowej do oceny zachowania półfabrykatu jako ciała sztywnego oraz określenie analityczne prostoliniowości osi wału o małej sztywności przy jego hartowaniu w odpowiednim urządzeniu;
- nowoczesne technologie obróbki ciepłno – siłowej wałków długowymiarowych o małej sztywności;
- specjalne przyrządy do prostowania półfabrykatu w temperaturze hartowania oraz stabilizacji cieplnej w temperaturze odpuszczania.

Zaprezentowane rozwiązania mają charakter użytkowy. Zastosowanie proponowanych sposobów obróbki wałków, o małej sztywności w przedsiębiorstwach przemysłu maszynowego, umożliwi w sposób znaczący podniesienie jakości tych wyrobów, przy dużej wydajności ich wytwarzania.

LOW RIGIDITY SHAFT MACHINING TECHNOLOGY

SUMMARY

The monograph is cohesive presentation of research work conducted by the author in the field of technology of manufacturing low rigidity shafts.

The main aim of the work is to present the possibility of increasing the intensity of long, low rigid shafts manufacturing processes, basing on results of research worked out by the author and research group lead by him.

The shaft turning processes, vibratory and force-thermal were examined.

The book presents formulated mathematical models of elastic deformable shafts machining process in stationary state, the theoretical principles of machining accuracy control methods and technological methods for increasing the accuracy of manufacturing. The technological method of controlling the exactitude of low rigidity shafts processing and the automatic control system were introduced as well as worked out constructions of self-centring hydraulic rest and lathe tailstocks, designed to be applied in the various production conditions.

The principles of controlling the vibratory processing of low rigid shafts, the influence of technological inheritance on shafts machining process, recommended operation sequence in the technological process and the device for vibratory processing long, low rigid shafts were introduced.

Authors present worked out:

- mathematical models of thermal – force processing, allowing to use frequency method to the evaluation of the semi manufactured element behaviour as a rigid body and analytic qualification of rectilinearity of the non rigid shaft axis while hardening in the suitable device;
- modern technologies of the thermal-force processing of long, low rigidity shafts;
- special devices for straightening semi-finished product in the tempering temperature and thermal stabilization in the tempering temperature.

Worked out and presented solutions have the utilitarian character. The use of the proposed methods to process low rigidity shafts in machine industry companies, will in the significant way make possible increasing the quality of these parts, and in the same time keep large efficiency of production.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ

АННОТАЦИЯ

Настоящая монография является комплексной презентацией научных работ, проводимых автором в области технологии изготовления нежестких деталей.

Цель работы заключается в показании возможности интенсификации процессов изготовления нежестких валов, в том числе, и длинномерных на основе разработанных автором и руководимым им научным коллективом решений и достижений. Проанализированы процессы токарной, вибрационной и термосиловой обработки валов.

Разработаны математические модели обработки нежестких упругодеформированных валов в установившихся режимах, теоретические основы управления точностью обработки и технологические способы повышения точности изготовления валов. Приводятся примеры технологических способов управления точностью обработки, систем автоматического управления, разработанных конструкций самоцентрирующегося гидравлического люнета и задних бабок токарных станков, которые могут быть использованы при различных видах производства.

Приводятся теоретические основы управления вибрационной обработки нежестких валов с целью устранения и выравнивания остаточных напряжений в изготовленных деталях, показано влияние технологической наследственности на точность обработки, предложена новая последовательность операций технологического процесса и конструкции устройств для вибрационной обработки длинномерных нежестких валов.

Разработаны математические модели термосиловой обработки, позволяющие использовать частотные методы для оценки поведения заготовок как жестких тел, приводятся примеры аналитического определения прямолинейности оси вала при его закалке в соответствующем устройстве, новые технологии термосиловой обработки длинномерных нежестких валов, конструкции специальных устройств для правки заготовок нежестких валов при температуре закаливания и температурной стабилизации при температуре отпуска.

Использование разработанных и представленных научных решений по повышению точности обработки нежестких валов в различных отраслях машиностроения позволит, в значительной степени, повысить качество изготовления деталей при высокой производительности.