



POLITECHNIKA LUBELSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Instytut Technologicznych
Systemów Informacyjnych



mgr inż. Witold Hałas

**Badanie wpływu naprężeń szczątkowych
na dokładność wytwarzania wałów**

Rozprawa doktorska

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Wiktor Taranenko

Lublin 2010

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	4
WSTĘP	5
1. STAN ZAGADNIENIA I UZASADNIENIE KIERUNKU BADAŃ	7
1.1. Przyczyny powstawania naprężeń szczątkowych	7
1.2. Metody mierzenia naprężeń szczątkowych	14
1.2.1. Metody mechaniczne mierzenia naprężeń szczątkowych	14
1.2.2. Metody fizyczne mierzenia naprężeń szczątkowych	17
1.3. Metody obliczeń odkształceń i naprężeń szczątkowych	18
1.4. Metody technologiczne osiągania wymaganej dokładności przy występowaniu naprężeń szczątkowych	23
2. BADANIA DOKŁADNOŚCI WYTWARZANIA WAŁÓW W RÓŻNYCH GAŁĘZIACH PRZEMYSŁU	28
2.1. Analiza wymagań odnośnie jakości obróbki wałów	28
2.2. Analiza rzeczywistej jakości wytwarzania wałów	30
3. TEMAT, TEZA, CEL I ZAKRES PRACY	33
3.1. Uzasadnienie wyboru tematu	33
3.2. Teza naukowa pracy	33
3.3. Cel pracy	33
3.4. Zakres pracy	34
4. PODSTAWY TEORETYCZNE OSIĄGNIĘCIA NIEZAWODNOŚCI EKSPLOATACYJNEJ WYTWARZANIA WAŁÓW	35
4.1. Wskaźniki operacji i czynniki oddziaływujące na proces wytwarzania. Zagadnienie modelowania	35
4.2. Modelowanie poszczególnych operacji procesu technologicznego	37
4.2.1. Modelowanie operacji toczenia	38
4.2.2. Modelowanie operacji obróbki cieplnej	42
4.2.3. Modelowanie operacji frezowania rowków wpustowych	47
4.2.4. Modelowanie operacji szlifowania	49
4.3. Relacja między zmiennymi opisującymi operacje procesu technologicznego. Ogólny model procesu	51
5. BADANIA DOŚWIADCZALNE DOKŁADNOŚCI OBRÓBKİ WAŁÓW PRZY WYSTĘPOWANIU NAPRĘŻEŃ SZCZĄTKOWYCH	55
5.1. Ogólna metoda badań. Materiały, wyposażenie, instrumenty, narzędzia pomiarowe	55

5.2.	Badania naprężeń szczątkowych w przekrojach wałów.....	61
5.2.1.	Przyczyny wypaczenia wałów.....	61
5.2.2.	Badania wpływu bicia nierównomiernego naddatku na wypaczenie wałów.....	64
5.2.3.	Badania eksperymentalne naprężeń szczątkowych w przekrojach wałów.....	66
5.2.4.	Eksperymentalne sprawdzenie otrzymanej zależności.....	69
5.3.	Badania bicia promieniowego w podstawowych operacjach wytwarzania oprawek.....	70
5.3.1.	Planowanie czół i nakiełkowanie.....	73
5.3.2.	Odształcenia w czasie obróbki we wrzecionie z podparciem kła konika.....	73
5.3.3.	Badania niedokładności związanej z odształceniem przy frezowaniu rowków wpustowych.....	75
5.3.4.	Zalecenia dotyczące kompensacji niezerównoważonych naprężeń przy usuwaniu nierównomiernego naddatku.....	78
5.3.5.	Metoda obróbki z obciążeniem półfabrykatu siłami osiowymi.....	79
5.4.	Badania wpływu parametrów szlifowania na naprężenia szczątkowe.....	82
5.4.1.	Metodyka i oprzyrządowanie do badań eksperymentalnych.....	82
5.4.2.	Model matematyczny powstawania naprężeń szczątkowych w części.....	84
5.4.3.	Sprawdzenie istotności współczynników modelu.....	88
5.4.4.	Sprawdzenie adekwatności modelu.....	89
5.5.	Dziedziczność technologiczna przy obróbce wałów.....	90
6.	OPRACOWANIE ZALECEŃ PRAKTYCZNYCH W CELU ZWIĘKSZENIA DOKŁADNOŚCI KSZTAŁTU I WYMIARÓW WAŁÓW.....	98
6.1.	Kształtowanie struktury procesu technologicznego.....	98
6.1.1.	Opracowanie zbioru odwzorowań określających strukturę procesu technologicznego.....	98
6.1.2.	Metodyka kształtowania składu i kolejności operacji procesu technologicznego.....	101
6.2.	Konstrukcja hydraulicznej podtrzymki samocentrującej.....	105
6.3.	Układ stabilizacji przekroju warstwy skrawanej.....	110
6.4.	Układ regulacji odształceń cieplnych przy obróbce wałów.....	113
6.5.	Obróbka wibracyjna wałów o małej sztywności.....	119
	WNIOSKI.....	129
	LITERATURA.....	131
	STRESZCZENIE.....	139
	ABSTRACT.....	140
	АННОТАЦИЯ.....	141

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

OZNACZENIA

L	-	długość części obrabianej
d	-	średnica części
r	-	promień części
M	-	moment zginający
x, y, z	-	osie prostokątnego układu współrzędnych
F_x	-	siła rozciągająca, ściskająca
F_y	-	siła zginająca
R_e	-	granica plastyczności
R_m	-	granica wytrzymałości na rozciąganie
σ	-	naprężenia normalne
τ	-	naprężenia styczne
E	-	moduł sprężystości
f	-	posuw
v_c	-	prędkość skrawania
a_p	-	głębokość skrawania
n	-	prędkość obrotowa wrzeciona
F_c	-	główna siła skrawania
F_f	-	składowa posuwowa siły skrawania
F_p	-	składowa promieniowa siły skrawania
σ_L	-	naprężenia szcztkowe wzdłużne
σ_T	-	naprężenia szcztkowe styczne
σ_R	-	naprężenia szcztkowe promieniowe
ν	-	współczynnik Poissona
T	-	temperatura
A	-	pole przekroju
I	-	moment bezwładności pola przekroju
y_0	-	ugięcie szcztkowe początkowe
y_σ	-	ugięcie szcztkowe

SKRÓTY

POP	-	powierzchniowa obróbka plastyczna
UT	-	układ technologiczny (OUPN)

WSTĘP

Uzyskanie wysokiej dokładności wytwarzania w budowie maszyn nabiera szczególnego znaczenia w dzisiejszych warunkach w związku ze wzrostem prędkości i precyzji ruchu pracujących części maszyn. Zakłady produkcyjne dysponują precyzyjnymi obrabiarkami, gwarantującymi bardzo wysoką dokładność wymiarów i jakość powierzchni wytwarzanych części. Pomimo tego efekt końcowy obróbki jest często niezadowalający i nie do zaakceptowania. Część wykonana bardzo dokładnie, zgodnie z wymaganiami określonymi w dokumentacji konstrukcyjnej, po kilku dniach od zakończenia procesu technologicznego traci dokładność wymiarów w stopniu dyskwalifikującym jej użycie. Dotyczy to szczególnie wałów o małej sztywności, to znaczy takich, których wymiary wzdłużne są znacznie większe od wymiarów przekroju poprzecznego.

Przyczyną tego zjawiska jest stan naprężeń powstający w obrabianym materiale na poszczególnych etapach procesu technologicznego i pozostający w gotowej części po usunięciu oddziaływań zewnętrznych, powodując znaczne odkształcenia we wszystkich kierunkach – wypaczenie.

Liczne badania, przeprowadzone w ostatnim czasie, dały pozytywną odpowiedź na szereg pytań związanych z eliminacją skutków tych naprężeń. Jednak analiza niektórych zagadnień, w zakresie dokładności obróbki związanej z wypaczeniem części, znajduje się w fazie początkowej. Praktycznie każda technologia wytwarzania odpowiedzialnej części przewiduje określone przedsięwzięcia zmniejszające wypaczenie. W przeważającej większości przypadków technolodzy przyjmują następujące rozwiązanie: skomplikować technologię przez zastosowanie „pośredniej” obróbki cieplnej z późniejszym powtórzeniem tego samego typu operacji. Praktyka dowodzi, że takie rozwiązanie problemu nie zawsze jest efektywne, ponieważ następująca po obróbce cieplnej obróbka ubytkowa na nowo zakłóca równowagę stanu naprężeń. To z kolei wywołuje pojawienie się wewnętrznych momentów zginających i w konsekwencji odkształcenie części.

Otwarte pozostają pytania związane ze zmniejszeniem wypaczenia wałów w czasie ich obróbki, a także jakością powierzchni części precyzyjnych w czasie szlifowania. W związku z powyższym występuje konieczność opracowania metody uzyskiwania dokładności obróbki części typu „wał” w warunkach produkcyjnych różnych gałęzi budowy maszyn oraz naukowego opracowania uzasadnionych zaleceń prowadzących do zwiększenia dokładności.

Praca składa się z sześciu rozdziałów:

W pierwszym rozdziale dokonano analizy dotychczasowego stanu wiedzy na temat stanu naprężeniowo – odkształceniowego półfabrykatów oraz opisano znane metody obliczeń i pomiarów naprężeń szczątkowych.

Drugi rozdział zawiera analizę wymagań jakości wytwarzania wałów, określonych dokumentacją konstrukcyjną, a następnie analizę rzeczywistej jakości wytwarzania na przykładzie dwóch zakładów produkcyjnych.

Trzeci rozdział zawiera uzasadnienie wyboru tematu, tezę naukową, cel i zakres pracy.

Czwarty rozdział poświęcono podstawom teoretycznym znanych sposobów obniżania stanu naprężeń szczątkowych w procesie wytwarzania wałów. Omówiono zagadnienie modelowania operacji procesu technologicznego, takich jak: toczenie, obróbka cieplna, frezowanie rowków wpustowych, szlifowanie.

Piąty rozdział poświęcono badaniom przyczyn powstawania naprężeń szczątkowych w trakcie procesu technologicznego wytwarzania wałów. Zwrócono szczególną uwagę na wpływ bicia promieniowego nierównomiernego naddatku na wypaczenie wałów. Przeanalizowano szczegółowo wpływ parametrów szlifowania na naprężenia szczątkowe.

W szóstym rozdziale dokonano analizy wyników badań oraz przedstawiono propozycje działań, zmierzających do minimalizacji skutków naprężeń szczątkowych.

1. STAN ZAGADNIENIA I UZASADNIENIE KIERUNKU BADAŃ

1.1. Przyczyny powstawania naprężeń szczątkowych

Współczesna technologia, zapewniająca otrzymanie wyrobów o wysokiej jakości, przewiduje rozwiązywanie zagadnień złożonych i wzajemnie powiązanych. Dzięki licznym pracom naukowym szereg podstawowych problemów, związanych z zapewnieniem wysokiej jakości wytwarzania części, zostało rozwiązanych pomyślnie. Istnieją jednak zagadnienia, które nie zostały jeszcze dostatecznie wyjaśnione i są nadal przedmiotem badań. Jednym z nich jest paczanie się części powstające w czasie obróbki i sezonowania.

Przyczyną wypaczenia jest stan naprężeń istniejący w części po zakończeniu procesu wytwarzania i przy braku oddziaływania sił zewnętrznych. Naprężenia te w literaturze określane są jako: naprężenia własne, pozostałe, reszkowe lub szczątkowe [103, 104]. Praktycznie wszystkie procesy technologiczne wytwarzania części maszyn prowadzą do powstawania naprężeń szczątkowych [11]. Już na etapie projektowania należałoby znać stan naprężeń, jaki będzie istnieć w częściach maszyn w czasie procesu eksploatacji. Pomimo, że z przejawami działania naprężeń szczątkowych spotykano się już wcześniej, uważa się, że ich badanie rozpoczęli W. I. Rodman w 1857 r. i I. A. Umow.

Systematyczne badania naprężeń szczątkowych rozpoczął rosyjski metalurg N. W. Kałakucki i po raz pierwszy opracował metodę ich obliczeń. W 1887 r. autor opublikował wyniki swojej wieloletniej pracy, dotyczącej określenia naprężeń szczątkowych - stycznych i promieniowych - w lufach armatnich. Analizując zmianę średnicy wytoczonego pierścienia określał naprężenia działające w części. Prace N. W. Kałakuckiego stały się podstawą licznych metod badań naprężeń szczątkowych, polegających na pomiarze odkształceń próbek, powstających w czasie ich niszczenia. Przejście od zmierzonych odkształceń do naprężeń odbywa się na podstawie ogólnej teorii sprężystości [107].

I. A. Birger usystematyzował i matematycznie uzasadnił mechaniczne metody wyznaczania naprężeń szczątkowych w częściach o najbardziej rozpowszechnionych kształtach [10, 11]. E. Heyn opisał schemat tworzenia się naprężeń w odlewach [50]. Autor rozpatrzył mechanizm powstawania naprężeń z punktu widzenia mechaniki teoretycznej i wytrzymałości materiałów. Jego teoria opiera się na założeniu idealizacji stanu metalu sprężystego i plastycznego oraz istnieniu temperatury krytycznej w czasie przechodzenia ze stanu plastycznego w stan sprężysty. W rzeczywistości materiał w dowolnym stanie posiada właściwości sprężysto - plastyczne. Oprócz tego nie uwzględnił on wpływu kształtu

na naprężenia szczątkowe. Liczni naukowcy uściślili teorię E. Heyna. W pracy [61] dokonano porównania metod wyznaczania naprężeń w odlewach, opracowanych przez E. Heyna, I. A. Birgera i stwierdzono, że w pewnym stopniu są ze sobą zgodne, chociaż w założeniu metoda E. Heyna dotyczy modelu ciała sztywnego, natomiast metoda I. A. Birgera dotyczy ciała idealnie sprężysto-plastycznego. Zwrócono uwagę, że zachodzi konieczność obliczania naprężeń w ciałach o dowolnych kształtach. W latach 30. XX w. N. N. Dawidenkow i G. Sachs rozpoczęli wszechstronne badania naprężeń szczątkowych.

N. N. Dawidenkow zaproponował klasyfikację naprężeń szczątkowych, która obecnie jest bardzo szeroko stosowana. Za kryterium podziału przyjmuje się wielkość obszaru, w którym równoważą się naprężenia danego rodzaju. Na podstawie powyższego kryterium rozróżniamy następujące rodzaje naprężeń.

Naprężenia pierwszego rodzaju, zwane makronaprężeniami; są to naprężenia równoważące się w obszarach, których wielkość porównywalna jest z wielkością danego ciała. Makronaprężenia powstają podczas: niejednorodnego nagrzewania lub chłodzenia, zabiegów obróbki plastycznej, przemian fazowych, zabiegów obróbki mechanicznej. Kontrola makronaprężeń ma duże znaczenie, pozwala bowiem na zwiększenie niezawodności maszyn przez eliminowanie niepożądanych stanów naprężeń.

Naprężenia drugiego rodzaju, zwane mikronaprężeniami; są to naprężenia równoważące się w obszarach rzędu wielkości ziaren. Powstają one, np. podczas lokalnych przemian strukturalnych towarzyszących nawęglaniu, azotowaniu stali. Fazy w warstwach powierzchniowych mają inną objętość właściwą niż fazy pozostałe, co prowadzi do powstawania mikronaprężeń.

Naprężenia trzeciego rodzaju równoważące się w obszarach wielkości atomów i będące wynikiem drgań cieplnych.

Istnieje jeszcze klasyfikacja oparta na licznych naprężeniach wykrytych w czasie badań rentgenowskich [105]. Klasyfikacja wg szerokich kryteriów jest wygodna i wystarczająca do celów praktycznych.

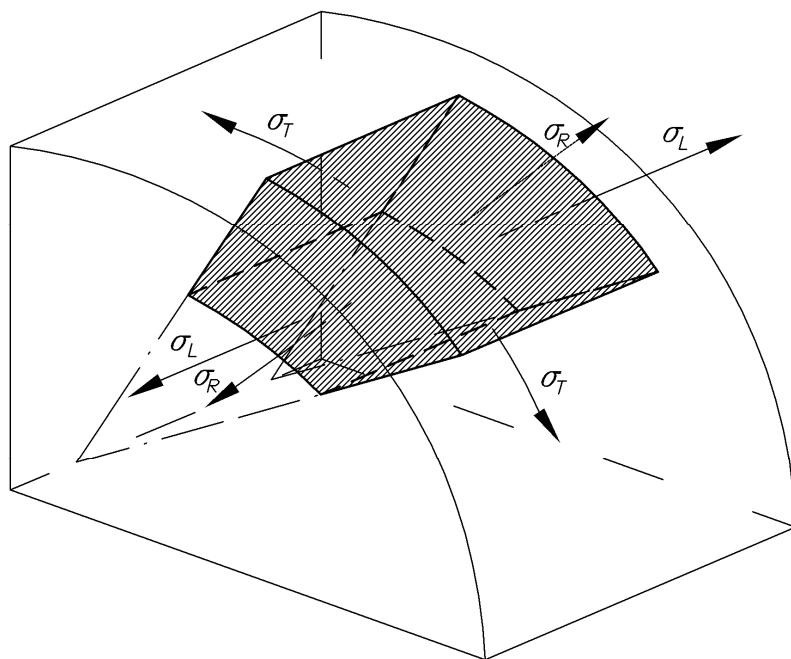
Makronaprężenia wzbudzają największe zainteresowanie naukowców, dlatego poświęca się im najwięcej uwagi. Technologiczne naprężenia szczątkowe, w odróżnieniu od powszechnie przyjętego podziału na trzy rodzaje, dzieli się wg sposobu ich powstawania na różnych etapach wytwarzania części [128]:

- naprężenia szczątkowe powstające w półfabrykacie w czasie procesu kształtowania (odlew, odkuwka, wyrób walcowany);

– naprężenia szczątkowe powstające z powodu nierównomiernego plastycznego odkształcenia w warstwach wierzchnich w czasie oddziaływania sił w procesie obróbki skrawaniem, wywołanego lokalnym nagrzaniem warstwy wierzchniej, a także fazowymi przemianami powierzchni, powodującymi tworzenie się licznych struktur o różnych objętościach właściwych.

W wielu publikacjach przedstawiono informacje o występowaniu „gwarantowanego poziomu naprężeń szczątkowych” w wyrobach otrzymywanych metodami obróbki plastycznej na zimno [4, 61, 107]. Ale w większości przypadków, przy ogólnej ocenie jakości wyrobów metalowych, które często traktowane są jako półfabrykaty ciał obrotowych, autorzy ograniczają się do stwierdzenia o istnieniu „korzystnego” lub „niekorzystnego” rozkładu naprężeń, lub też występowaniu naprężeń ściskających albo rozciągających. Przyczyny kryją się w braku sprawdzonych metod dokładnego pomiaru naprężeń szczątkowych i ilościowej oceny ich wpływu na właściwości eksploatacyjne.

Rzeczywisty stan naprężeń w elementarnej objętości określony jest kilkoma wektorami, które umownie mogą być zredukowane do trzech głównych wektorów, położonych w trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyznach [55]; zgodnie z tym, w częściach obrotowych rozróżnia się trzy rodzaje naprężeń: promieniowe, osiowe i styczne (rys. 1.1). Badanie naprężeń szczątkowych sprowadza się do wyznaczenia głównych składowych wektorów naprężeń.



Rys. 1.1. Składowe głównych wektorów naprężeń w elementarnej objętości ciała obrotowego:
 σ_T - naprężenia styczne, σ_L - naprężenia osiowe, σ_R - naprężenia promieniowe

W pracy [96] przedstawiono wyniki badań stanu naprężeń powstających w strefie skrawania. Autor zakłada, że naprężenia szczątkowe można obliczyć dwoma sposobami: wg naprężeń z wykorzystaniem twierdzenia Henke „o zaniku naprężeń”; wg odkształceń z uwzględnieniem uogólnionego wykresu „naprężenie-odkształcenie”. Jeżeli nie zachodzi konieczność określania stanu naprężeń (pod warunkiem, że ciało jest idealnie sprężyste), to druga droga jest prostsza. Wykorzystując ją, autor proponuje rozwiązanie zagadnienia określenia naprężeń szczątkowych, tworzących się przy swobodnym skrawaniu ortogonalnym.

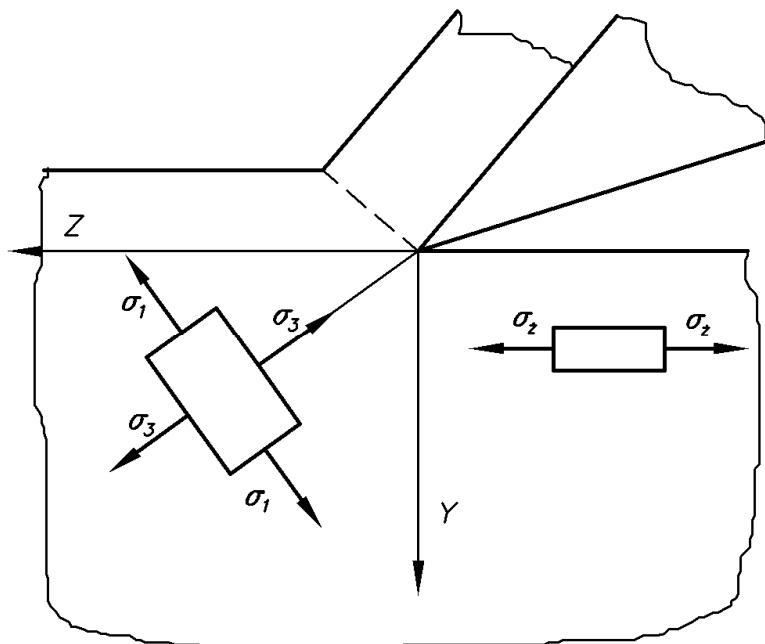
W tym przypadku stan naprężeniowo-odkształceniowy w strefie skrawania określony jest następującymi wzorami (rys. 1. 2):

$$\sigma_1 \neq 0, \quad \sigma_2 \neq 0, \quad \sigma_3 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2), \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_3, \quad \varepsilon_2 = 0 \quad (1.1)$$

Temu stanowi odpowiada następujący stan naprężeń szczątkowych:

$$\sigma_z^o \neq 0, \quad \sigma_y^o = 0; \quad \sigma_x^o = \nu\sigma_z^o, \quad (1.2)$$

gdzie: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ - odkształcenia główne, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - naprężenia główne w czasie procesu skrawania, $\sigma_x^o, \sigma_y^o, \sigma_z^o$ - naprężenia szczątkowe.



Rys. 1. 2. Stan naprężeniowo odkształceniowy w warstwie wierzchniej wyrobu w czasie procesu skrawania i po jego zakończeniu [96]

W celu bezpośredniego eksperymentalnego określenia orientacji osi głównych stanu naprężeń szczątkowych opracowano metodę [96], za pomocą której określone odchylenie głównych osi stanu naprężeń szczątkowych znalazło analityczne potwierdzenie.

Jak zauważa autor, następstwem odchylenia głównych osi naprężeń szczątkowych jest ich rozbieżność z osią symetrii części. Liczbę rodzajów obróbki ustalono w taki sposób, że wektor prędkości skrawania jest równoległy lub prostopadły do jednej z osi wyrobu. Orientacja głównych naprężeń szczątkowych w tym przypadku zależy od warunków przebiegu procesu skrawania. W niektórych przypadkach odchylenie osi głównych stanu naprężeń szczątkowych od osi wyrobu może być spowodowane schematem kinematycznym obróbki. Przewidywanie kierunku głównych wektorów naprężeń szczątkowych, istniejących w półfabrykatach, jest wyjątkowo skomplikowane.

Wg definicji zamieszczonej w pracy [23] naprężeniami pierwotnymi nazywamy naprężenia istniejące w materiale w warunkach uważanych jako normalne, określonych przez stan fizyczny materiału np: brak obciążenia, równomierna temperatura, równowaga strukturalna. Różnicę między naprężeniami pierwotnymi i naprężeniami istniejącymi w materiale przy działaniu sił zewnętrznych, temperatury oraz innych oddziaływań trwałych, nazywamy naprężeniami wtórnymi lub wewnętrznymi.

W pracy [83] wprowadzono pojęcie naprężeń początkowych. Na podstawie tego pojęcia opracowano zasadniczo nowy model matematyczny mechanizmu powstawania naprężeń i odkształceń szczątkowych jako procesu jednolitego, który tworzy ich nierozzerwalny związek z początkowymi naprężeniami technologicznymi oraz dziedzicznymi technologicznie naprężeniami szczątkowymi.

W przypadku niewystępowania naprężeń szczątkowych w półfabrykacie, właśnie pierwotne naprężenia technologiczne, a nie naprężenia szczątkowe powstające w czasie obróbki, są przyczyną powstawania technologicznych odkształceń szczątkowych. Całemu procesowi technologicznemu wytwarzania części z reguły towarzyszy zmiana stanu naprężeniowego. W ogólnym przypadku obróbki półfabrykatu jednocześnie z usuwaniem nadmiaru zanika część dziedzicznych technologicznie naprężeń szczątkowych. Oprócz tego sam proces obróbki w większości przypadków wywołuje ogólne albo lokalne zmiany objętościowe części. Te procesy zakłócają równowagę naprężeń szczątkowych w częściach, co powoduje powstawanie w nich nie zrównoważonych naprężeń, nazywanych naprężeniami początkowymi, to znaczy naprężeniami istniejącymi w częściach po obróbce, ale przed ich odkształceniem. Po oswobodzeniu części od oddziaływań zewnętrznych ulegają one

przekształceniu w naprężenia szczątkowe, część przyjmuje nowy zrównoważony stan naprężeniowo-odkształceniowy.

Odkształcenia szczątkowe, pojawiające się w czasie obróbki części o małej sztywności, zwracają uwagę również innych naukowców.

Wg pracy [82] przez technologiczne odkształcenia szczątkowe rozumie się zmianę kształtu, wymiarów oraz wzajemnego położenia powierzchni części, które pojawiają się w wyniku zmiany stanu naprężeń w czasie procesu technologicznego wytwarzania i całkowicie ujawniają się po oswobodzeniu ciała od zewnętrznych powiązań i oddziaływań.

Szczególne zainteresowanie wzbudza poznanie stanu naprężeń warstwy wierzchniej, tworzącego się w wyniku obróbki ubytkowej.

Odkształcenia szczątkowe, powstające w czasie obróbki skrawaniem, są jednym z podstawowych składników ogólnej niedokładności obróbki, i w związku z tym słuszny jest pogląd, że rezerwą możliwości podwyższenia dokładności obróbki jest poszukiwanie sposobu obniżenia wielkości odkształceń szczątkowych przez określenie optymalnej struktury procesu technologicznego.

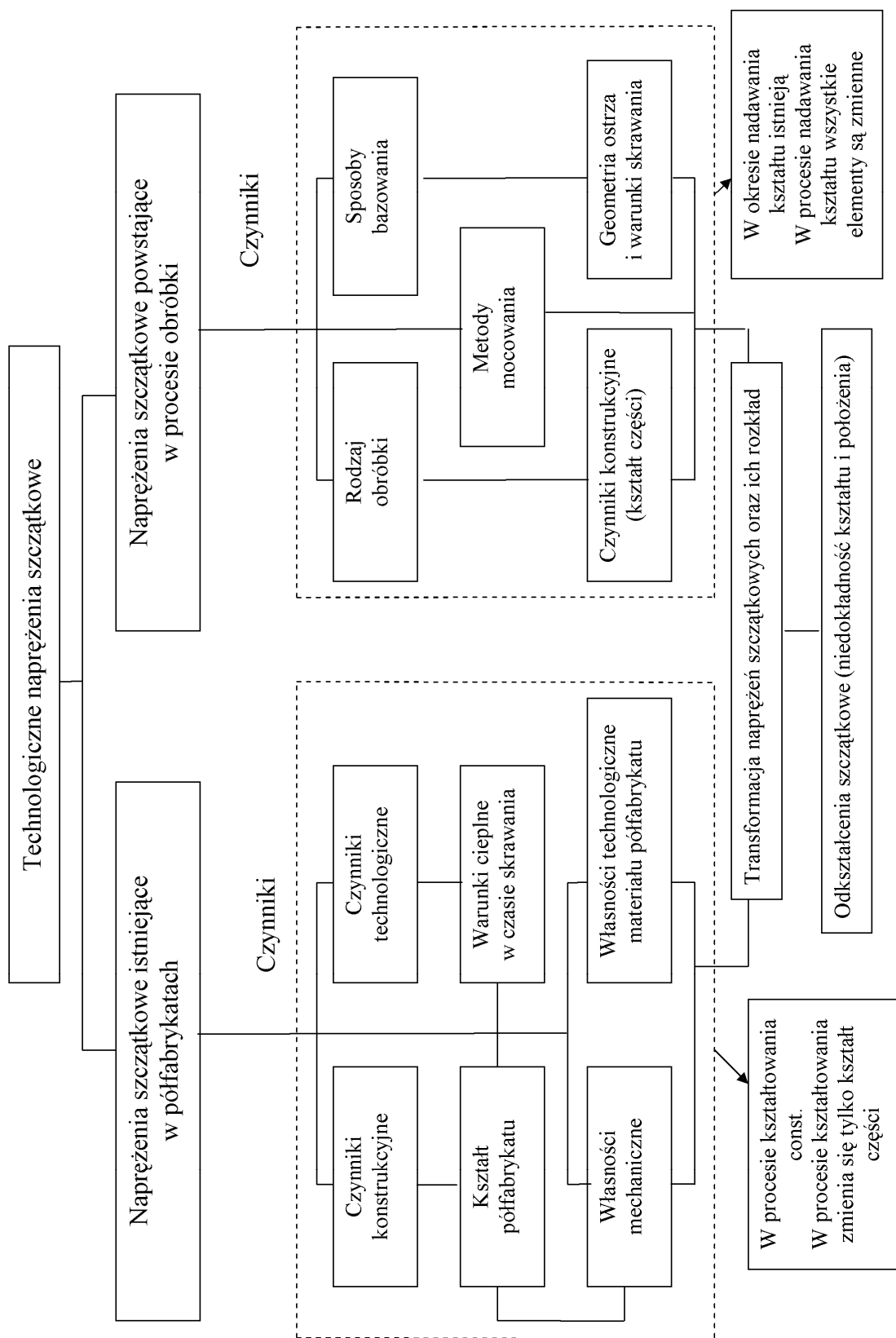
Zagadnieniom związanym ze sterowaniem odkształceniami szczątkowymi, powstającymi przy obróbce części o małej sztywności, poświęcona jest praca [126].

Powstawanie odkształceń szczątkowych w czasie obróbki powierzchni różnych części, w tym wałów o małej sztywności w procesie toczenia i szlifowania rozpatrywane jest w pracach [96, 125]. Czynniki istotne w jednych warunkach obróbki w innych okazują się mało ważne, to powoduje, że poglądy naukowców na przyczyny powstawania odkształceń szczątkowych nie są zgodne.

Kształtowanie się odkształceń szczątkowych w wyniku działania naprężeń szczątkowych przedstawiono schematycznie na rys. 1. 3 [60]. Istnieją również inne schematy kształtowania się odkształceń szczątkowych [108].

Nierównomierne odkształcenia plastyczne w przekroju części spowodowane są obróbką plastyczną metali (kucie swobodne, kucie matrycowe, walcowanie, prasowanie). W procesach odlewniczych powstają znaczne naprężenia szczątkowe w wyniku nierównomiernego chłodzenia oraz skurczu różnych obszarów odlewu w formie, co prowadzi do pęknięć i wypaczeń części odlewanych.

W pracy [11] wyjaśniono, że powstawanie naprężeń szczątkowych w czasie obróbki ubytkowej uwarunkowane jest jednoczesnym działaniem nierównomiernego odkształcenia plastycznego i miejscowego nagrzania cienkich warstw wierzchnich, a także przemianami fazowymi.



Rys. 1.3. Schemat powstawania błędów obróbki w zależności od naprężeń szczątkowych

Praktyka dowodzi, że nierównomiernie przebiegające procesy (chłodzenie, skurcz itp.) nie zawsze powodują tworzenie się dużych naprężeń szczątkowych.

Ważnym czynnikiem wpływającym na sposób rozkładu naprężeń szczątkowych jest relaksacja [11, 13, 115]. Relaksacja może przebiegać bez oddziaływań czynników zewnętrznych lub w czasie nagrzewania, jak również przy oddziaływaniu obciążeń statycznych i cyklicznych, prowadząc do zmian wymiarów i kształtu części.

1.2. Metody mierzenia naprężeń szczątkowych

Metody mierzenia naprężeń szczątkowych można różnie klasyfikować. Jedną z podstawowych klasyfikacji jest podział na metody niszczące i nieniszczące. Metody niszczące oparte są na pomiarze odkształceń powstających w materiale po naruszeniu jego całości pod wpływem naprężeń, których równowaga została zakłócona tym naruszeniem. Badany przedmiot poddaje się pewnym zabiegom (przecięcie, toczenie, frezowanie), mającym na celu zakłócenie stanu równowagi naprężeń szczątkowych, którego wynikiem są pewne odkształcenia. Mierzac powstałe odkształcenia można wyznaczyć wartość występujących wcześniej naprężeń. Wadą tych metod jest częściowe lub całkowite zniszczenie badanej części. Z tego względu przyszłość należy do nieniszczących metod pomiaru naprężeń szczątkowych.

Inną klasyfikacją metod pomiaru naprężeń szczątkowych jest podział na metody mechaniczne i fizyczne. Pierwsze z nich są z reguły metodami niszczącymi, a drugie metodami nieniszczącymi [105].

Wśród metod nieniszczących największe zainteresowanie wzbudzają: dyfrakcyjne (szczególnie rentgenograficzne), magnetosprężyste, ultradźwiękowe.

1.2.1. Metody mechaniczne mierzenia naprężeń szczątkowych

Mechaniczne metody określania naprężeń szczątkowych można podzielić na: niszczące, częściowo-niszczące, nieniszczące. Metody mechaniczne niszczące polegają na rozcięciu lub sukcesywnym usuwaniu cienkich warstw materiału. Istnieje wiele metod określania naprężeń szczątkowych. Podstawę wszystkich metod mechanicznych określania naprężeń szczątkowych stanowi teza, że rozcięcie powierzchni odpowiada przyłożeniu do powierzchni przekroju naprężeń szczątkowych przeciwnego znaku, czyli naprężeń przeciwnych [10].

Metodę Heyna-Bauera [50] stosuje się w celu określenia naprężeń wzdłużnych w częściach obrotowych poprzez warstwowe usunięcie materiału i pomiar powstających odkształceń.

Naprężenia wzdłużne obliczane są wg wzoru:

$$\sigma_L = E \left[r_n^2 (l_n - l_0) - r_{n-1}^2 (l_{n-1} - l_0) \right] : \left[(r_{n-1}^2 - r_n^2) \cdot l_0 \right], \quad (1.3)$$

gdzie: r , l_0 - promień i długość początkowa próbki,

n , $n-1$ - numery kolejnych usuwanych warstw materiału,

l_n , l_{n-1} - długości próbek po usunięciu n i $n-1$ warstwy.

W pracy [107] odnotowano, że metoda Heyna-Bauera jest analogiczna do metody określania naprężeń wzdłużnych, polegającej na usuwaniu kolejnych warstw materiału z jednej strony pręta i jednoczesnym pomiarze powstających odkształceń.

Metoda wzdłużnego rozcięcia [70] jest jednym z uproszczonych sposobów określania naprężeń szczątkowych. Przy określaniu naprężeń potrzebny jest pomiar wielkości rozchylenia rozciętej części próbki, naprężenia wzdłużne można wyrazić równaniem:

$$\sigma_L = \left[E / (1 - \nu^2) \right] \cdot (l / \rho); \quad (1.4)$$

gdzie: l – odległość powierzchni od osi obojętnej przekroju poprzecznego połowy koła,

ρ - promień krzywizny.

Przedstawiona metoda opiera się na założeniu liniowości rozkładu naprężeń w przekroju pręta. W wyniku badań ustalono, że minimalna długość rozcięcia pręta o średnicy 20 – 40 mm powinna wynosić (5 -10) d . Metoda ta znajduje ograniczone zastosowanie, ponieważ liniowy rozkład naprężeń w przekroju pręta występuje wyjątkowo rzadko.

Problemom dotyczącym rozkładu naprężeń w tulejach poświęcono prace [52, 82]. Przedstawione metody mechaniczne można odnieść do przybliżonych, w tych metodach również określona jest jedna składowa naprężeń lub przyjmowany jest założony charakter rozkładu naprężeń w przekroju poprzecznym, lub uzyskiwana jest tylko ocena jakościowa naprężeń, co powoduje konieczność przeprowadzenia korekty eksperymentalnej. Dokładność i wydajność określenia naprężeń szczątkowych można w sposób istotny podwyższyć stosując metodę wzdłużnego rozcięcia osiowego przedstawioną w pracy [82]. Jest to metoda prosta i do przyjęcia, nawet w przypadku materiałów trudnych do obróbki. Metoda ta polega na wykonaniu w osiowym przekroju części obrotowej rozcięcia o szerokości δ (do 0,2 średnicy pręta) i długości l , przekraczającej, wg przyjętej reguły, pięć średnic.

Wykonywane są pomiary odkształcenia wzdłużnego Δl oraz odkształcenia y_o , wynikającego ze zginania obu części pręta. Następnie z cylindrycznych powierzchni połówek pręta na długości rozcięcia metodą wytrawiania, szlifowania lub toczenia usuwane są koncentryczne warstwy wierzchnie i wykonywane są pomiary odkształcenia końców, pochodzącego od zginania $y(a)$.

W oparciu o wyniki pomiarów przeliczane są osiowe naprężenia szczątkowe wg wzoru [82]:

$$\sigma_{(a)} = 0,33 \frac{E}{l^2} \left[\frac{dy_{(a)}}{da} - 6y_{(a)} \cdot (R - a) \right] + 1,55 \left(1 - 3 \frac{a}{R} \right) \sigma_0 \quad (1.5)$$

Metoda ta z powodzeniem konkuruje z dokładnymi metodami opracowanymi przez Sachsa, za pomocą których można określić naprężenia szczątkowe w różnych częściach: prętach smukłych, tarczach jednolitych o dużych średnicach, rurach o dowolnych średnicach.

Metoda jest szczególnie cenna przy określaniu naprężeń szczątkowych tworzących się w czasie procesu skrawania. H. Bühler [101] zaproponował metodę określania naprężeń w przekrojach ciał obrotowych wzdłuż niepowtarzalnej krzywej odkształcenia. W związku z niedokładnością obliczeń odkształcenia nieobrobionej części ciała obrotowego, krzywa odkształcenia, a więc i metoda okazują się przybliżone.

Jednak, jak zauważają autorzy [59], najbardziej nowoczesnym (w tamtym czasie) sposobem określenia naprężeń szczątkowych w częściach jednolitych grubościennych obrotowych okazuje się metoda Sachsa. Wyższość tej metody polega na możliwości określenia przestrzennego obrazu rozkładu naprężeń szczątkowych wzdłużnych, stycznych i promieniowych w całej próbce. W czasie warstwowego roztaczania lub wiercenia za każdym razem mierzona jest długość i średnica próbki, przy czym określana jest względna zmiana długości ε oraz zewnętrznej średnicy δ ciała obrotowego.

Zastosowanie przy pomiarze odkształcenia czujników umożliwiło ulepszenie klasycznej metody Sachsa, dzięki temu powstała możliwość dokładnego pomiaru odkształcenia próbki w czasie usuwania warstw materiału. W celu obliczeń naprężeń szczątkowych zaproponowano zależności [59]:

$$\sigma_L = \frac{E}{1 - \nu^2} \left[(A_0 - A) \frac{d\lambda}{dA} - \lambda \right],$$

$$\sigma_T = \frac{E}{1-\nu^2} \left[(A_0 - A) \frac{d\theta}{dA} - \frac{A_0 - A}{2A} \theta \right], \quad (1.6)$$

$$\sigma_R = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{A_0 - A}{2A} \theta,$$

gdzie: $\lambda = \varepsilon + \nu\delta$, $\theta = \delta + \nu\varepsilon$.

Metoda Sachsa została rozwinięta w pracy [52] w zakresie określania naprężeń szczątkowych w częściowo niejednorodnych ciałach obrotowych.

Godną uwagi jest metoda zaproponowana w pracy [118]. Zastosowanie tej metody jest ograniczone z powodu trudności stworzenia schematu układu sił zewnętrznych odpowiadającego rzeczywiście działającym w przekroju naprężeniom szczątkowym. Zagadnieniom związanym z określaniem naprężeń wzdłuż osi pręta prostoliniowego poświęcone zostały prace [10, 107], a w prętach o małej i dużej krzywiznie [5, 6].

Wszystkie metody określania naprężeń szczątkowych, niezależnie od sposobu powstawania odkształceń w czasie usuwania warstw materiału, są ekwiwalentne.

W celu określenia naprężeń szczątkowych w częściach o kształtach złożonych stosowane są częściowo niszczące metody mechaniczne. Metody polegają na wydzieleniu z ciała elementów o niewielkich rozmiarach, na których przeprowadzane są badania. Stosowana jest metoda nacięć i rowków, metoda otworów, metoda pasków cylindrycznych, wiercenia.

Metody mechaniczne nieniszczące są stosowane przy określaniu naprężeń w warstwie wierzchniej bezpośrednio w czasie ich narastania [10]. Nieniszczące metody mechaniczne zostały przedstawione w pracach [11, 104, 105].

1.2.2. Metody fizyczne mierzenia naprężeń szczątkowych

Podstawową zaletą metod fizycznych [105, 106] jest to, że są one nieniszczące. Do cech fizycznych materiałów zalicza się: moduł sprężystości, gęstość, przenikalność magnetyczną, przewodność elektryczną, szybkość rozchodzenia się fal. Do podstawowych metod fizycznych zalicza się: rentgenowskie, ultradźwiękowe, optyczne, magnetyczne, pomiaru twardości.

Podstawową wadą większości metod fizycznych jest konieczność dokonywania bardzo dokładnych pomiarów oraz pokonywania trudności związanych z opracowaniem wyników eksperymentów.

Istnieją różne analizatory naprężeń, niektóre posiadają typowe charakterystyki pozwalające otrzymywać wysokiej jakości rozkłady naprężeń oraz dokonywać pomiary w jednym punkcie. Pomiary naprężeń dokonywane są bez konieczności mocowania tensometrów. Analizator praktycznie pozwala na pomiar naprężeń we wszystkich materiałach konstrukcyjnych: metalu, ceramice, tworzywach polimerowych, materiałach kompozytowych. Nowoczesne analizatory posiadają funkcje pozwalające na precyzyjne wskazanie położenia punktu koncentracji naprężeń.

1.3. Metody obliczeń odkształceń i naprężeń szczątkowych

Przesłanką wyjściową do obliczeń naprężeń szczątkowych jest wiedza z zakresu wytrzymałości materiałów, teorii przewodności cieplnej, mechaniki ogólnej. Najpełniejsze badania zostały opracowane i opublikowane w pracach [61, 64, 68, 82, 128].

W pracy [64], na podstawie wiedzy z zakresu wytrzymałości materiałów (hipoteza płaskich przekrojów, zgodnie z którą przy rozciąganiu, ściskaniu lub czystym zginaniu belki jej przekrój poprzeczny pozostaje płaski w czasie całego procesu wzrostu i zaniku obciążeń), stosując założenie E. Heyna otrzymano wzory do obliczeń naprężeń szczątkowych, powstających w odlewie ciała obrotowego o dużej długości:

naprężenia szczątkowe promieniowe:

$$\sigma_R = \frac{ER\beta^*v^*}{\beta^*(1-\nu)} \left\{ \frac{1}{16} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \left[1 - \frac{(\nu_1^*)^2}{8} \right] \right\}, \quad (1.7)$$

naprężenia szczątkowe styczne:

$$\sigma_T = \frac{ER\beta^*v^*}{\beta^*(1-\nu)} \left\{ \frac{1}{16} \left(1 - 3 \frac{r^2}{R^2} \right) \left[1 + \frac{(\nu_1^*)^2}{8} \right] \right\}, \quad (1.8)$$

naprężenia szczątkowe osiowe:

$$\sigma_L = \frac{ER\beta^*v^*}{\beta^*(1-\nu)} \left\{ \frac{1}{8} \left(1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right) \left[1 - \frac{(\nu_1^*)^2}{8} \right] \right\}, \quad (1.9)$$

gdzie: E - moduł sprężystości,

R - promień zewnętrzny,

β - współczynnik rozszerzalności liniowej materiału odlewu,

ν - prędkość chłodzenia odlewu w momencie osiągnięcia temperatury t^* ,

ν - współczynnik Poissona metalu odlewu,

r - promień wewnętrzny,

ν_1 - pierwszy pierwiastek równania $\operatorname{ctg} \nu = \frac{\delta}{B_i}$ (gdzie: $B_i = \frac{\alpha_0}{\lambda} R$).

Powyższe przybliżone wzory umożliwiają z wystarczającą dokładnością obliczenie naprężeń szczałkowych w odlewach o kształtach prostych, a także w poszczególnych elementach odlewów o kształtach bardziej skomplikowanych. Mechanizm odkształcenia cieplnego odlewu w czasie stygnięcia przedstawiono w pracy [61], w której odnotowano, że wraz ze zmianą temperatury w czasie stygnięcia w sposób synchroniczny przebiega odkształcenie cieplne odlewu. Każde włókno materiału odlewu w dowolnym momencie ulega względnemu odkształceniu, które odpowiada równowadze układu przy danym chwilowym rozkładzie temperatury.

Rozkład temperatury w przekroju półfabrykatu zależy od prędkości stygnięcia, przewodności cieplnej, cech konstrukcyjnych półfabrykatu.

W pracy [1] udowodniono, że przy zachowaniu reżimu temperaturowego, gdy kryterium

Fouriera $F_0 = \frac{\alpha \cdot \tau}{d_0^2} \geq 0,3$, gdzie α - współczynnik przewodności cieplnej, τ - czas stygnięcia

półfabrykatu, d_0 - połowa grubości ścianki, rozkład naprężeń w przekroju płaskiego odlewu przebiega wg krzywej drugiego stopnia:

$$\sigma = \left(1 - 3 \frac{x^2}{d_0^2}\right) \frac{\beta E \Delta T}{3}, \quad (1.10)$$

gdzie: x - bieżąca współrzędna grubości ścianki, β - współczynnik rozszerzalności cieplnej, E - moduł sprężystości, ΔT - największa różnica temperatur w przekroju w czasie stygnięcia odlewu.

Podobny wzór otrzymano w pracy [61] przy analizie kinetyki wypaczenia odlewów o przekroju pryzmatycznym po obróbce ubytkowej:

$$\sigma = -\frac{3\sigma_0 x^2}{d_0^2} + \sigma_0, \quad (1.11)$$

gdzie: σ_0 - naprężenia w środkowej części odlewu pryzmatycznego przekroju.

Wielkość wypaczenia określono wzorem:

$$y = \frac{3 \sigma_0 l^2 e}{8 E d_0^2}, \quad (1.12)$$

gdzie: l - długość półfabrykatu, e - grubość nadatku.

Naprężenia szczątkowe występują nie tylko w odlewach o złożonych kształtach mających ścianki o różnych grubościach, ale także w odlewach o stałym przekroju. W pracy [61] zaproponowano wzór do obliczeń naprężeń szczątkowych:

$$\sigma_x = E\alpha(t_x - t_{sp}), \quad (1.13)$$

gdzie: E - moduł sprężystości, α - średni współczynnik rozszerzalności liniowej,

t_x - temperatura, którą posiada warstwa odlewu w momencie całkowitego przejścia

w zakres odkształceń sprężystych,

t_{sp} - średnia temperatura w przekroju.

Wzór przeznaczony jest do części wykonanych z materiału o dużej twardości i nie uwzględnia zanikających naprężeń sprężystych (teoria Henke). Ze wzoru wynika, że naprężenia szczątkowe są tym mniejsze, im bardziej jest równomierne pole temperaturowe odlewu w momencie zaniku odkształceń plastycznych. Wszystkie wyżej przedstawione obliczenia, są niewygodne w praktyce, ponieważ wymagają znajomości parametrów trudnych do określenia: t_{sp} , t_x .

Do obliczania odkształceń zalecany jest wzór:

$$y = \frac{3 K \Delta t \alpha e}{2 \lambda d_0}, \quad (1.14)$$

gdzie: $K = 0.35$, Δt - różnica między temperaturą początkową stygnięcia półfabrykatu i temperaturą otoczenia, α - współczynnik oddawania ciepła,

e - grubość nadatku,

λ - współczynnik przewodzenia ciepła, d_0 - połowa grubości półfabrykatu.

Ze wzoru wynika, że odkształcenie jest wprost proporcjonalne do wielkości nadkładu na obróbkę ubytkową i odwrotnie proporcjonalne do grubości części. Wzór ten jest przydatny do obliczeń odkształceń w częściach płaskich. Opracowano również metody w przypadku warunków obróbki jednostronnej ze zdjęciem wióra o jednakowej grubości na całej długości części [70] oraz na całym obwodzie [59]. Jednak znane metody obliczeń odkształceń szczytkowych zginania nie mają zastosowania przy obróbce wałów o małej sztywności. Wystarczająco dokładne metody, uwzględniające naprężenia początkowe, przedstawiono w pracy [82]:

$$\sigma_{o(x)} = \sigma_{P(x)} - \frac{E}{l} \left[\Delta l + \frac{8y}{l} \left(\frac{\delta}{2} - x \right) \right], \quad (1.15)$$

gdzie: $\sigma_{o(x)}$ - naprężenia szczytkowe, δ - grubość części, $\sigma_{P(x)}$ - naprężenia początkowe,
 l - długość części, y - strzałka ugięcia szczytkowego w środku długości części,
 Δl - wzdłużne odkształcenie szczytkowe części, x - bieżąca współrzędna grubości części.

Powstawanie naprężeń i odkształceń szczytkowych stanowi jeden wzajemnie powiązany proces, u podłoża którego leżą odkształcenia plastyczne, zmiany objętościowe materiału w przekroju części w czasie obróbki oraz zakłócenie równowagi dziedzicznych technologicznie naprężeń szczytkowych. Przedstawione metody przeznaczone są w zasadzie do obliczeń naprężeń w częściach pryzmatycznych.

Zagadnieniom związanym ze zmniejszeniem naprężeń szczytkowych zginających na etapie obróbki wstępnej wałów o małej sztywności poświęcona jest praca [68], w której założono sprężysto-plastyczny charakter odkształceń szczytkowych zginania, określono reguły ich powstawania w czasie toczenia wałów o małej sztywności oraz przedstawiono metodę obliczeń składowych odkształceń szczytkowych zginania.

Obliczenia [68] mają zastosowanie w przypadku zdejmowania nadkładu nierównomiernego, powstającego pod wpływem sił skrawania, w czasie toczenia wałów o małej sztywności. Otrzymano zależności pozwalające zastosować dwa sposoby określenia kierunku składowej y_σ odkształceń szczytkowych. Sposób pierwszy to technologiczne kształtowanie w warstwie wierzchniej półfabrykatu technologicznych naprężeń szczytkowych, zapewniających minimalne y_σ . Przejście naprężeń szczytkowych ściskających na powierzchni półfabrykatu w naprężenia rozciągające w warstwie wierzchniej wyrobu zachodzi w usuwanym nadkładzie

w czasie toczenia. Sposób drugi – to sterowanie składową y_σ w trakcie operacji przy prawidłowym określeniu położenia technologicznych powierzchni bazowych, uwzględniającym rzeczywiste skrzywienie półfabrykatu oraz sztywność układu technologicznego, a także zalecane parametry skrawania.

Z obliczeń wynika, że jeśli usuwany jest naddatek nierównomierny, to suma momentów pochodzących od naprężeń w warstwie wierzchniej powodowanych obróbką jest zrównoważona [68].

$$y_\sigma = \frac{1}{EJ} \left[\sum_{i=1}^{n_s} \frac{\Delta M_{\sigma_i} - \Delta M_{\sigma_{i-1}}}{2} \left[H[x_i(i-1)f_0] \cdot \left[\frac{x - (i-1)f_0}{f_0} \right]^2 - \left[\frac{L - (i-1)f_0}{f_0} \right]^2 \frac{x}{L} \right] \right], \quad (1.16)$$

gdzie: EJ - sztywność przy zginaniu;

$$n_s = \frac{L}{f_0}, \quad L - \text{długość wału}, \quad f_0 - \text{posuw};$$

$$H[x_i(i-1)f_0] - \text{funkcja Heaviside'a}, \quad \Delta M_{\sigma_0} = 0.$$

Autor otrzymał zależność, pozwalającą obliczyć składową ugięcia szczątkowego w zależności od rozkładu naprężeń w czasie obróbki wałów o małej sztywności z usunięciem nierównomiernego naddatku, uwarunkowanego wyjściowym skrzywieniem półfabrykatu. Nie uwzględniono jednak nieuniknionego przesunięcia nakiełków, w rezultacie czego siły skrawania są nierównomierne, co negatywnie wpływa na rozkład naprężeń. W pracy [68] przedstawiono metody sterowania odkształceniami szczątkowymi zginania w przypadku obróbki jednonarzędziowej wałów o małej sztywności bez wykorzystania podtrzymek przez zastosowanie:

- ulepszania cieplnego,
- rozciągania sprężysto-plastycznego półfabrykatów wałów o małej sztywności,
- celowego przesunięcia osi powierzchni bazowych wałów o małej sztywności w kierunku skrzywienia początkowego,
- wyznaczenia racjonalnych parametrów skrawania.

Do niezbadanych problemów należy zaliczyć wpływ kolejności operacji na końcową dokładność obróbki, a także badanie stanów naprężeniowo-odkształceniowych wałów. Dlatego problem dotyczący stanu naprężeniowo-odkształceniowego części o kształtach cylindrycznych w czasie ich obróbki wymaga dalszych badań.

1.4. Metody technologiczne osiągania wymaganej dokładności przy występowaniu naprężeń szczątkowych

W celu zmniejszenia wpływu naprężeń szczątkowych na dokładność obróbki opracowano wiele metod, które możemy podzielić na trzy podstawowe grupy:

Pierwsza grupa przewiduje obniżenie ogólnego poziomu naprężeń szczątkowych: różnorodne rodzaje obróbki cieplnej (wyżarzanie, wyżarzanie normalizujące, odpuszczanie), a także technologie otrzymywania półfabrykatów z regulacją prędkości chłodzenia.

Druga grupa przewiduje stabilizację stanu naprężeń przy nieznacznym obniżeniu poziomu naprężeń (starzenie naturalne, starzenie termouderzeniami, starzenie wibracyjne i inne). Zastosowanie tych metod pozwala na zmniejszenie wielkości wypaczenia półfabrykatów w czasie następnej obróbki.

Do trzeciej grupy zaliczają się metody pozwalające, drogą regulacji czynnikami technologicznymi, zmniejszyć momenty niezerównoważonych sił wewnętrznych, powstających w czasie obróbki ubytkowej i odpowiednio zmniejszyć wypaczenie części. Metody te zaliczane są do metod technologicznych i znajdują się w początkowym stadium rozwoju. Pierwsza i druga grupa są wystarczająco dobrze opisane w literaturze i dlatego ich analizę w tej pracy pominięto. Skupiono natomiast uwagę na analizie metod grupy trzeciej.

Znany jest również sposób obróbki półfabrykatów płaskich o małej sztywności, zgodnie z którym wykonywana jest obróbka powierzchni położonych naprzeciw siebie w kilku przejściach z następnym prostowaniem. W celu podwyższenia dokładności, drogą sterowania odkształceniami części o małej sztywności metodą powierzchniowej obróbki plastycznej (POP), prostowanie realizowane jest poprzez walcowanie narzędziem rolkowym. Metoda obróbki części o małej sztywności polega na sterowaniu odkształceniami sprężystymi układu technologicznego (UT). W celu podwyższenia dokładności i jakości warstwy wierzchniej oraz osiągnięcia jednoczesnej kompensacji odkształceń sprężystych liniowych i kątowych obrabianej części, do powierzchni czołowej w czasie skrawania przykładany jest moment zginający, a do środka części – dodatkowa siła [111].

Zagadnienia związane z badaniem wpływu kolejności operacji na wypaczenie części o małej sztywności klasy „korpus” w czasie obróbki mechanicznej wyjaśnione są w pracy [118], w której rozpatrzono wpływ współczynnika technologicznego - kolejności operacji na wypaczenie. Zagadnienie rozwiązano przy zastosowaniu teorii grafów i dziedziczenia technologicznego, co pozwoliło otrzymać poglądowe przedstawienie kolejności operacji w przypadku każdej ścianki a także zbadać charakter zmian i wzajemne powiązania

parametrów wypaczeń i wewnętrznych naprężeń szczątkowych. Badania eksperymentalne przeprowadzano z zastosowaniem tensometrycznej metody pomiaru naprężeń szczątkowych. Poziom technologicznej dziedziczności naprężeń szczątkowych w każdej ścianie części typu „korpus” określono wg współczynników dziedziczności, które są podstawową charakterystyką kolejności operacji obróbki ubytkowej. Na podstawie badań opracowano zalecenia dotyczące optymalnej kolejności operacji.

W pracy [118] przeanalizowano wpływ wielkości zdejmowanego naddatku w czasie obróbki ubytkowej na dokładność wytwarzania korpusów. Zagadnienie rozwiązano wychodząc z warunków powstawania naprężeń szczątkowych na podstawie teorii przewodności cieplnej. Przedstawiono metodę obliczeń naddatków w obróbce ubytkowej korpusów o małej sztywności z jednoczesnymi obliczeniami ich wypaczeń.

Paczenie się korpusów i pokryw reduktorów w czasie obróbki mechanicznej wyjaśniono w pracy [61]. Autorzy badali wpływ rozkładu naprężeń przy zdejmowaniu naddatku materiału na kształt otworów montażowych w czasie starzenia.

Znana jest metoda wibracyjnego zmniejszenia naprężeń szczątkowych [126], polegająca na zastosowaniu przenośnego wibratora o regulowanej wielkości mimośrod. Wibrator wyposażony w elektroniczny układ sterujący, przyrząd do pomiaru prędkości obrotowej oraz wielkości momentu skręcającego w czasie pracy zamocowany jest na części.

Zmniejszenie naprężeń szczątkowych metodą obróbki wibracyjnej rozpatrywane jest również w pracy [93]. Przedstawiono w niej wyniki badań doświadczalnych odnośnie części typu „wał”, „pierścień”, „płyta”. Wypaczenie pojawiające się po obróbce ubytkowej zostało zmniejszone do kilkuset mikrometrów. Badania pokazały, że metoda wibracyjnego zmniejszenia naprężeń szczątkowych może zastąpić wyżarzanie.

Jedną z metod przyspieszenia procesu relaksacji naprężeń w częściach metalowych jest obróbka elektrohydrauliczna [121]. Istota tej metody polega na tym, że obrabiane części metalowe zostają poddane działaniu fal uderzeniowych, wywołanych wyładowaniami elektroiskrowymi, zachodzącymi w środowisku wodnym. Drgania, w które wprowadzane są części, prowadzą do przyspieszenia procesu relaksacji. Przedstawione schematy i wykresy potwierdzają, że proces ten zachodzi z bardzo dużą prędkością. Pozwoliło to na zastosowanie tej metody do celów praktycznych: przy wstępnej obróbce części pracujących przy stałym stanie naprężeń.

Sposoby zmniejszania technologicznych odkształceń szczątkowych części o małej sztywności z uwzględnieniem dziedziczności technologicznej, a także schemat projektowania procesu

technologicznego obróbki oraz zalecenia dotyczące zwiększenia jakości obróbki zaprezentowano w pracy [83].

W pracy [108] wykazano, że stabilność wymiarowa części ze stali stopowych i stopów tytanowych związana jest z poziomem ukrytej energii i wielkością odkształceń w warstwie wierzchniej części. Zjawiska te wynikają z niejednorodnego strukturalnego wzmocnienia warstwy wierzchniej i w znacznym stopniu zależą od technologicznych parametrów obróbki. Przedstawiono modele umożliwiające optymalizowanie procesu skrawania istotnych części z uwzględnieniem stabilizacji ich rozmiarów. Na podstawie analizy reguł fizycznych i modeli matematycznych procesu skrawania sformułowano zasady sterowania stabilnością jego przebiegu i zapewnienia wysokiej jakości obróbki. Pokazano drogi zwiększania stabilności wymiarowej części i jednorodności właściwości fizyko-mechanicznych warstwy wierzchniej. W czasie obróbki części precyzyjnych do procesu technologicznego wprowadzane są zwykle dodatkowo jedna lub dwie operacje obróbki cieplnej, w celu stabilizacji naprężeń szczątkowych.

Przywrócenie zadanych parametrów dokładności drogą prostowania wału daje znikomy efekt, gdyż w procesie eksploatacji następuje utrata dokładności. W pracy [60] wyszczególniono dwa kierunki w rozwiązywaniu zagadnienia wypaczenia części w czasie obróbki ubytkowej. Pierwszy kierunek uwzględnia wpływ tylko naprężeń szczątkowych, istniejących w półfabrykacie; przy czym nie uwzględnia się naprężeń dodatkowych. Drugi kierunek – wielkość wypaczenia zależy od charakteru i poziomu naprężeń szczątkowych, ostatecznie ukształtowanych w plastycznie odkształconej warstwie wierzchniej, przy czym obliczenia przeprowadzono przy założeniu braku naprężeń szczątkowych w półfabrykacie. Przyczyną odkształceń łopatek turbin [89] są nie tylko naprężenia początkowe, pojawiające się w strefie obróbki, ale również naprężenia w półfabrykatach.

W pracy [96] pokazano związek między naprężeniami szczątkowymi, powstającymi w poprzednich operacjach technologicznych i naprężeniami wywołanymi obróbką skrawaniem. Jednak kompleksowe wyrażenie tego problemu w postaci matematycznej jeszcze nie istnieje.

Problem zapewnienia dokładności wytwarzania części, związany z ich wypaczeniem w czasie obróbki, jest nadal aktualny. Szczególnie odnosi się to do części obrotowych. Części te są jednymi z najbardziej rozpowszechnionych w budowie maszyn i stanowią w zależności od rodzaju produkcji od 20 do 40 % ogólnej liczby części. Badania stanu naprężeń części typu „wał” i ich wpływu na wypaczenie powierzchni przy różnych rodzajach obróbki są nadal prowadzone.

Wały, osie, rolki to duża grupa różnorodnych części o powierzchniach gładkich, stożkowych, kulistych i gwintowych, posiadających rowki wpustowe, ściecia.

Obróbka mechaniczna 35-50%			
Wały do 30%	Pozostałe części	Montaż 25-30%	Pozostałe operacje 10-20%

Rys. 1.4. Struktura ogólnej pracochłonności wytwarzania części w budowie maszyn

Struktura ogólnej pracochłonności wytwarzania części w budowie maszyn została przedstawiona na rys. 1.4 [68]. Z rysunku wynika, że obróbka mechaniczna stanowi od 35 do 50 % wszystkich operacji technologicznych.

a)	Wały gładkie 20%	Wały stopniowe 80%
b)	Wały dokładne 70%	Wały pozostałe 30%
c)	Wały sztywne 60%	Wały o małej sztywności 40%
d)	Stal C45, 41Cr4 80-90%	

Rys. 1.5. Struktura wytwarzania wałów [68] (a – wg kształtu, b – wg dokładności, c – wg sztywności, d – wg materiału)

Strukturę wytwarzania wałów przedstawiono na rys. 1.5. Zgodnie z potrzebami technicznymi i technologicznymi wały wykonywane są w 6-9 klasie dokładności. Struktura wytwarzania wałów z punktu widzenia ich sztywności pokazuje, że wały sztywne stanowią około 60%, a o małej sztywności 40%.

Procesy technologiczne obróbki wałów o małej sztywności w różnych zakładach, z reguły, zawierają takie podstawowe operacje jak: planowanie czół, wykonanie nakiełków, toczenie zgrubne, obróbka cieplna, toczenie wykańczające, szlifowanie, frezowanie rowków wpustowych.

Na podstawie analizy literatury możemy sformułować następujące wnioski:

Pomimo dużej liczby opracowań naukowych z zakresu badania dokładności obróbki części, problem wypaczenia pozostaje nadal jednym z podstawowych nierozwiązanych do końca zadań.

Badania stanu naprężeń części typu „części obrotowe” zrealizowane zostały niewystarczająco dokładnie. W związku z tym zalecenia zmierzające do zmniejszania wypaczeń tych części wymagają dopracowania.

W większości badań poświęconych stanom odkształceniowo-naprężeniowym w częściach obrotowych zakłada się, że odkształcenia powstające w czasie obróbki tych części uwarunkowane są naprężeniami szczątkowymi, powstającymi w warstwie wierzchniej w wyniku obróbki i nie uwzględnia się naprężeń szczątkowych już istniejących w półfabrykatch.

Do chwili obecnej wiedza o niezbędnej kolejności operacji i jej wpływie na wypaczenie jest praktycznie znikoma.

Analiza znanych metod obliczeń odkształceń szczątkowych części typu „wał” pokazuje, że chociaż w ostatnim czasie poświęca się tym problemom wiele uwagi, wymagają one dalszych badań.

Istniejące sposoby sterowania odkształceniami szczątkowymi w czasie obróbki części są opracowane w zasadzie do obróbki dwustronnej części o małej sztywności. Jednak w odniesieniu do obróbki ubytkowej powierzchni obrotowych, metody te zostały zbadane w stopniu niewystarczającym.

2. BADANIA DOKŁADNOŚCI WYTWARZANIA WAŁÓW W RÓŻNYCH GAŁĘZIACH PRZEMYSŁU

Do wytwarzania części typu „ciało obrotowe” stosowane są różne materiały. Ale najbardziej rozpowszechnionymi materiałami są: stal C45 (45) oraz stal 41Cr4 (40H), z których produkowanych jest 80-90% wszystkich wałów.

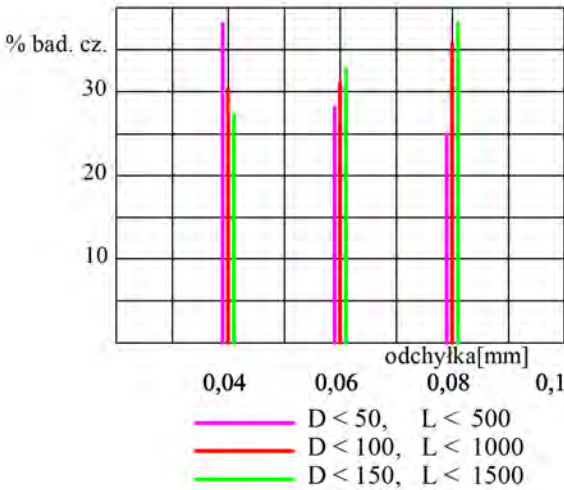
2.1. Analiza wymagań odnośnie jakości obróbki wałów

Analizę przeprowadzono w zakładach budowy maszyn, dokonując podziału części na trzy grupy, zgodnie z kryterium przedstawionym w tab. 2.1 [37, 46].

Tab. 2.1. Kryteria podziału badanych części

L.p.	Nazwa części	Średnica zewnętrzna D[mm]	Długość L[mm]
1.	Wały i osie	$D \leq 50$	$L \leq 500$
2.	-//-	$D \leq 100$	$L \leq 1000$
3.	-//-	$D \leq 150$	$L \leq 1500$

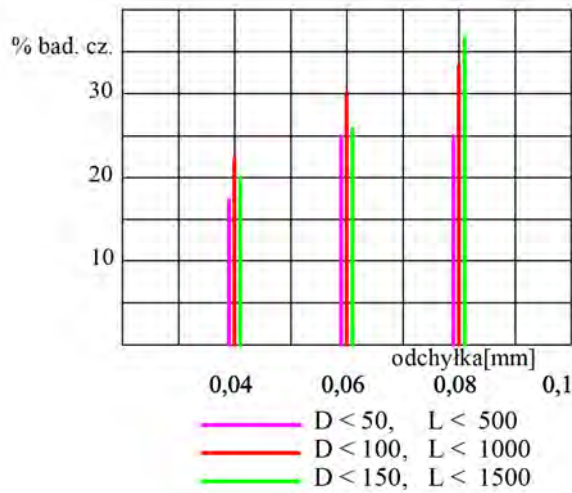
Badania przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie przeanalizowano rysunki oraz wymagania stawiane każdej części. W sumie przeanalizowano około 150 rysunków.



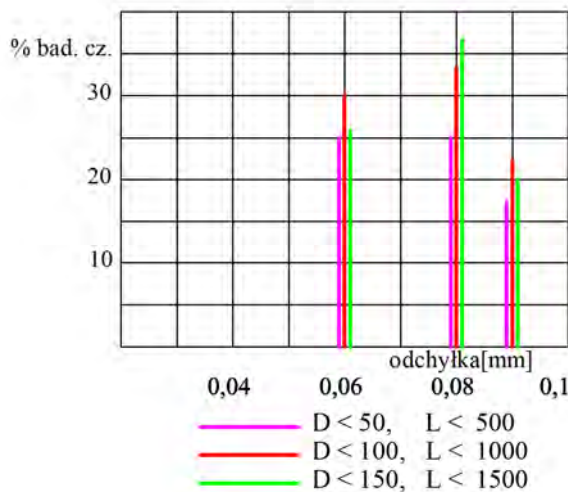
Rys. 2.1. Dopuszczalne bicie promieniowe powierzchni wałów

Wyniki analizy stawianych wymagań dotyczących dokładności przedstawiono na wykresach (rys. 2.1 - rys. 2.3), z których wynika, że odchyłki równoległości,

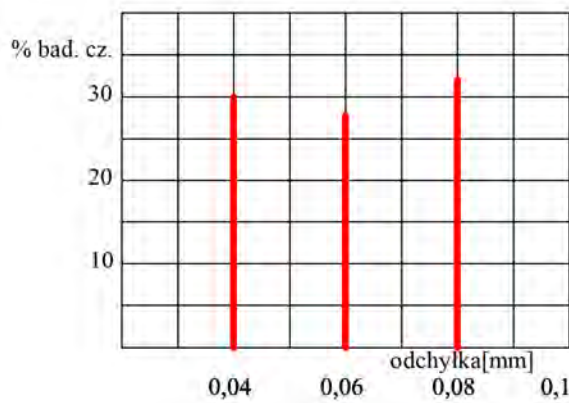
prostopadłości oraz bicie promieniowe są stosunkowo duże. Wszystkie parametry tolerancji położenia i kształtu odnoszą się do jednego metra długości.



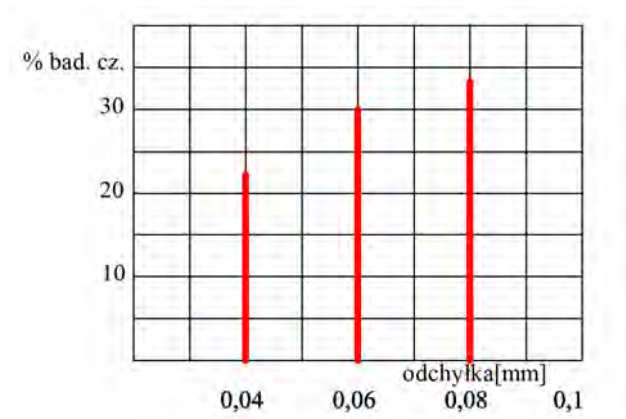
Rys. 2.2. Dopuszczalne odchyłki równoległości powierzchni wałów



Rys. 2.3. Dopuszczalne odchyłki prostopadłości powierzchni wałów



Rys. 2.4. Uśrednione dopuszczalne bicie promieniowe powierzchni wałów



Rys. 2.5. Uśrednione dopuszczalne odchyłki równoległości powierzchni wałów

Uśrednione dopuszczalne odchyłki położenia powierzchni przedstawiono na wykresach (rys. 2.4, rys. 2.5). Z wykresów wynika, że największe wymagania dotyczą bicia promieniowego.

2.2. Analiza rzeczywistej jakości wytwarzania wałów

W drugim etapie wykonano badania rzeczywistej jakości wytwarzania części w wybranych zakładach. Badania przeprowadzono drogą pomiarów faktycznej dokładności bezpośrednio na wydziałach zakładów, w końcowych operacjach, z zastosowaniem uniwersalnych i specjalnych narzędzi pomiarowych [37, 46].

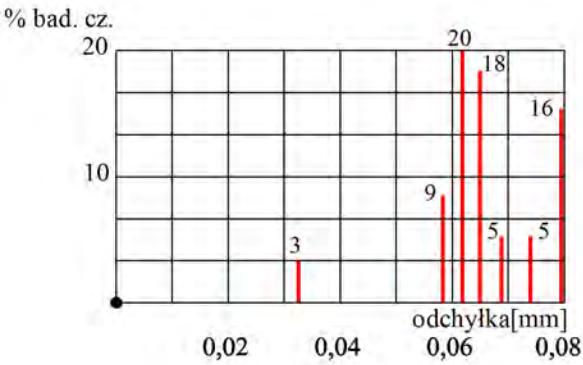
Tab. 2.2. Rzeczywiste bicie promieniowe

D/L	Zgodnie z rysunkiem [mm]	W przekrojach I, II, III [mm]	W odniesieniu do 1 metra [mm]
50/500	0,02	0,2	0,005
		0,15	0,04
		0,25	0,067
100/1000	0,04	0,08	0,034
		0,07	0,029
		0,06	0,025
150/1500	0,08	0,1	0,11
		0,09	0,099
		0,015	0.153

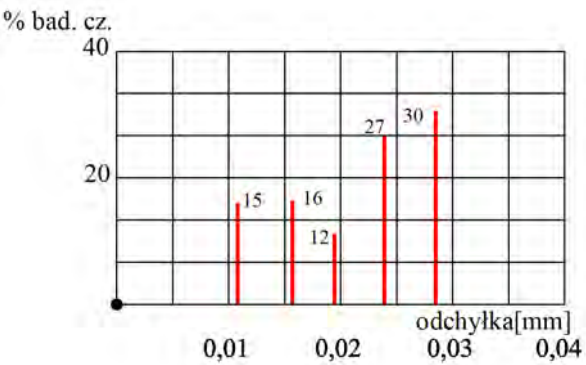
W sumie dokonano ponad 500 pomiarów. Pomiarom podlegały wały jednolite gładkie i stopniowe o różnej długości, wykonane ze stali konstrukcyjnej. Wały mierzono dwukrotnie: bezpośrednio na tokarkach i szlifierkach, następnie po upływie 24 – 36 h na płytach kontrolnych. Pomiarów bicia promieniowego dokonano w trzech przekrojach. Przeprowadzono także kontrolę innych parametrów niedokładności kształtu i położenia.

Uśrednienie wyników pomiarów rzeczywistej niedokładności w odniesieniu do jednego metra długości wykonano analogicznie do uśrednienia odchyłek dopuszczalnych. Badane części zostały pogrupowane wg podobieństwa geometrycznego, odchyłki rzeczywiste badanych części przedstawiono w tab. 2.2.

Następnie dla każdego parametru zbudowano wykresy zmian rzeczywistych odchyłek położenia powierzchni (rys. 2.6, rys. 2.7).



Rys. 2.6. Rzeczywista zmiana bicia promieniowego powierzchni wałów



Rys. 2.7. Rzeczywista zmiana odchyłek prostopadłości powierzchni wałów

W tabeli podano średnie dopuszczalne odchyłki wynikające z dokumentacji rysunkowej i rzeczywiste bicia promieniowe.

Z analizy danych zawartych w tabeli wynika, że największy procent braków jest spowodowany biciem promieniowym powierzchni.

Wyniki analizy wymagań dotyczących jakości obróbki wałów wykazały, że najwyższe wymagania odnoszą się do dokładności kształtu i względnego położenia powierzchni – bicia promieniowego, odchylenia od prostopadłości powierzchni.

Analiza badań statystycznych dokładności wytwarzania wałów wykazała, że dokładność kształtu i względnego położenia powierzchni wytwarzanych wałów w zakładach różnych dziedzin i o różnych charakterach produkcji nie odpowiada stawianym wymaganiom.

Dominującym czynnikiem wpływającym na powstawanie niedokładności jest odkształcenie powierzchni w wyniku istnienia naprężeń szczątkowych.

3. TEMAT, TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

3.1. Uzasadnienie wyboru tematu

Analiza literatury poświęconej zagadnieniom związanym z wytwarzaniem wałów o dużej dokładności prowadzi do wniosku, że wpływ naprężeń szczątkowych na uzyskanie ostatecznej dokładności pozostaje nadal jednym z nierozwiązanych do końca zagadnień.

Badania stanu naprężeń w częściach obrotowych zrealizowane zostały niewystarczająco dokładnie. W związku z tym zalecenia mające na celu zmniejszenie odkształceń szczątkowych tych części wymagają dopracowania.

W większości badań, poświęconych stanom odkształceniowo – naprężeniowym w częściach o kształtach cylindrycznych, zakłada się, że odkształcenia powstające w czasie obróbki uwarunkowane są naprężeniami szczątkowymi, tworzącymi się w strefie warstwy wierzchniej a nie uwzględnia się naprężeń szczątkowych już istniejących w półfabrykatch.

Do chwili obecnej wiedza o optymalnej kolejności operacji i jej wpływie na odkształcenia części jest niepełna.

Analiza znanych metod określania odkształceń szczątkowych części typu „wał” pokazuje, że chociaż w ostatnim czasie poświęca się tym problemom wiele uwagi, wymagają one dalszych badań.

Na podstawie przedstawionej analizy sformułowano następujący temat pracy: **„Badanie wpływu naprężeń szczątkowych na dokładność wytwarzania wałów”.**

3.2. Teza naukowa pracy

Uwzględniając obecny stan wiedzy, dotyczącej wpływu naprężeń szczątkowych na dokładność wytwarzania w budowie maszyn, sformułowano następującą tezę pracy:

Kompleksowa analiza procesu wytwarzania wałów, w oparciu o opracowane modele matematyczne jego operacji składowych, umożliwi uzyskanie struktury i kolejności operacji procesu technologicznego, zapewniającej obniżenie stanu naprężeń szczątkowych oraz zwiększenie dokładności wytwarzania wałów.

3.3. Cel pracy

Celem pracy jest opracowanie metod zwiększenia dokładności wytwarzania wałów oraz zapewnienia wymaganej jakości powierzchni przez obniżenie stanu naprężeń szczątkowych podczas obróbki. Dla osiągnięcia postawionego celu należy rozwiązać następujące zadania:

- badania statystyczne dokładności obróbki części typu „wał” bezpośrednio w zakładach produkcyjnych różnych branż budowy maszyn;
- określenie zależności analitycznych pomiędzy stanem naprężeniowo – odkształceniowym wałów oraz czynnikami technologicznymi w czasie obróbki mechanicznej;
- określenie zależności pomiędzy odkształceniem a dokładnością bazowania, wielkością naddatków na obróbkę, kolejnością operacji;
- określenie wzajemnego związku kolejności operacji i dziedzicznej niedokładności obróbki w zależności od czynników technologicznych.

3.4. Zakres pracy

W celu potwierdzenia postawionej tezy przyjęto następujący zakres pracy:

- badania dokładności wytwarzania wałów w wybranych zakładach:
 - badania wymagań odnośnie jakości obróbki wałów,
 - badania rzeczywistej jakości wykonania wałów.
- badania doświadczalne dokładności obróbki wałów w operacjach procesu technologicznego:
 - operacja toczenia,
 - operacja obróbki cieplnej,
 - operacja frezowania rowków wpustowych,
 - operacja szlifowania.
- opracowanie zaleceń w celu zwiększenia dokładności obróbki wałów:
 - propozycje w zakresie kompensacji naprężeń szczątkowych w czasie zdejmowania nierównomiernego naddatku,
 - opracowanie zaleceń odnośnie kolejności obróbki,
 - obróbka wibracyjna wałów,
 - układ sterowania odkształceniami cieplnymi.

4. PODSTAWY TEORETYCZNE OSIĄGNIĘCIA NIEZAWODNOŚCI EKSPLOATACYJNEJ WYTWARZANIA WAŁÓW

4.1. Wskaźniki operacji i czynniki oddziałujące na proces wytwarzania.

Zagadnienie modelowania

Ogólne podejście do rozwiązania zagadnienia sterowania i optymalizacji składa się z następujących etapów: sformułowanie celu sterowania i wybór kryterium optymalizacji; określenie ograniczeń; określenie charakterystyk optymalizowanego układu; znajdowanie algorytmu sterowania, zapewniającego osiągnięcie oczekiwanego kryterium optymalizacji.

Celem sterowania jest zapewnienie ekstremalnej wartości kryterium optymalizacji. Takie zagadnienie rozwiązywane jest drogą znajdowania algorytmu sterowania, zapewniającego wymaganą dokładność obróbki przy minimalnych kosztach własnych i założonej wydajności. Te ograniczenia powinny leżeć u podstaw opracowywania procesu technologicznego.

Poznanie właściwości układu technologicznego (UT), realizującego proces technologiczny (wejście obiektu) wymaga analizy nie tylko bieżących wartości wielkości wejściowych, ale również ich wartości w poprzednich cyklach (w poprzednich operacjach).

Jako zmienne wyjściowe UT rozpatrywane są te parametry, które będą zastosowane do regulacji w projektowanym układzie sterowania.

W każdej operacji procesu technologicznego wytwarzania części można wyróżnić szereg wskaźników i czynników bezpośrednio lub pośrednio oddziałujących na wynik obróbki (dokładność, chropowatość powierzchni, właściwości fizyko-mechaniczne). Układ technologiczny przedstawiany jest w postaci obiektu sterowanego (rys. 4.1), którego wielkościami wyjściowymi są następujące wskaźniki: wskaźniki charakteryzujące część

($\bar{X}^{wyj}$, $\overline{SP}$), w których zawarte są wskaźniki dokładności wymiarów, np. A_{Δ} i wskaźniki jakości warstwy wierzchniej, np. R_a ; charakteryzujące proces obróbki skrawaniem, np. szybkość zużycia narzędzia q , siła skrawania F , moc skrawania N_{skr} oraz inne; kryterium optymalizacji Q [40].

Kryterium optymalizacji powinno odzwierciedlać wymaganą jakość wytwarzanych wyrobów przy możliwie minimalnych kosztach własnych. Technologiczne koszty własne części związane są z ekonomicznymi parametrami skrawania, które rozumiane są jako okres trwałości narzędzia i odpowiadająca mu prędkość skrawania przy przyjętych wartościach

pomocniczego czasu maszynowego oraz przyjętych wydatkach, przy których koszt operacji będzie najniższy.

Parametrami wejściowymi są następujące grupy zmiennych: zmienne zakłócające

($X^{-wej}, \overline{SP}$), do których odnoszą się wskaźniki dokładności wymiarów półfabrykatu, wpływające na obróbkę, np. naddatek $\Delta_{pół}$ i wskaźniki jakości warstwy wierzchniej

półfabrykatu, np. twardość H ; zmienne sterujące ($\bar{Y}$), do których zaliczają się parametry obróbki, np. prędkość skrawania v_c , posuw f , głębokość skrawania a_p , wymiar ustawienia statycznego A_{st} ; zmienne konstrukcyjne, np. średnica d i długość L części.

Zmienne zakłócające to z reguły wielkości przypadkowe, których konkretne wartości są nieznane. Stąd sygnał wyjściowy obiektu jest funkcją wielkości przypadkowych, więc również jest przypadkowy. Duża liczba trudnych do określenia czynników powoduje, że zależności między sygnałami wejściowym i wyjściowym są przypadkowe.

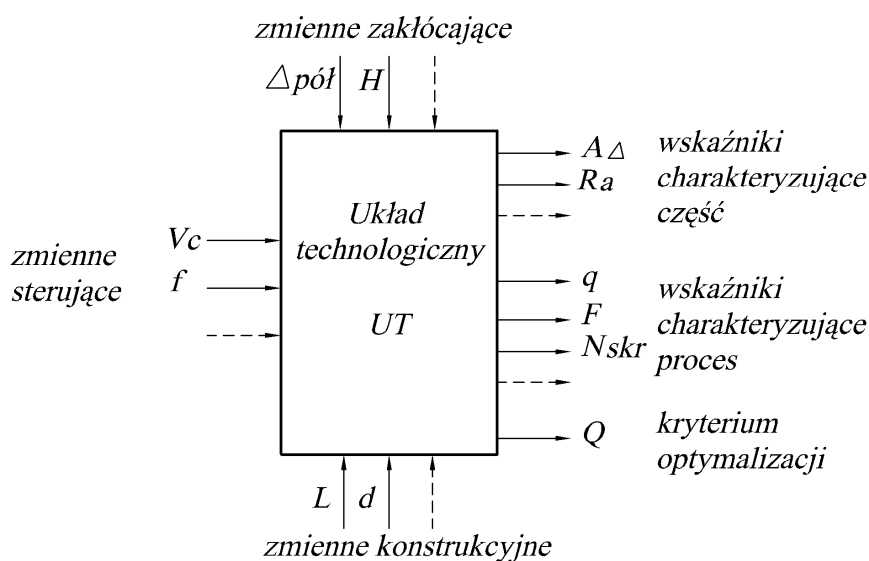
Analiza procesów zawiera: model matematyczny procesu, szczegółową analizę mającą na celu zbudowanie modelu matematycznego, syntezę i opis wyników w celu pełnego przedstawienia procesu.

Możliwe są dwa, spośród wielu, podejścia do poznania zjawisk, określenia związku funkcjonalnego między wielkościami wejściowymi i wyjściowymi.

Pierwsze – analityczne, oparte na zastosowaniu praw fizyki (równania Newtona, Maxwella) jest możliwe w przypadkach, kiedy zjawiska są stosunkowo proste lub przedstawiają sobą połączenie zjawisk prostych.

Drugie – eksperymentalne. Zadanie w tym przypadku polega na wyłonieniu hipotezy lub szeregu hipotez, a następnie potwierdzeniu jednej z nich. Hipotezy określane są w oparciu o informacje aprioryczne o charakterze badanego zjawiska. Podejście eksperymentalne stosowane jest przy opisywaniu zjawisk złożonych, zależnych od wielu czynników.

Procesy w UT są powielane, a więc porównywalne tylko statystycznie. Wynika to ze złożoności procesów fizycznych wzajemnego oddziaływania narzędzia i części obrabianej, a także dużej liczby trudnych do określenia czynników: temperatura otoczenia, temperatura strefy skrawania, różnorodność składu chemicznego materiału półfabrykatu, stan początkowy narzędzia skrawającego, skład zastosowanej cieczy chłodząco - smarującej.



Rys. 4.1. Układ technologiczny (UT) jako obiekt sterowany

Metoda eksperymentalno – statystyczna nie wyklucza zastosowania modeli analitycznych np. przy budowaniu modeli wymiarowych.

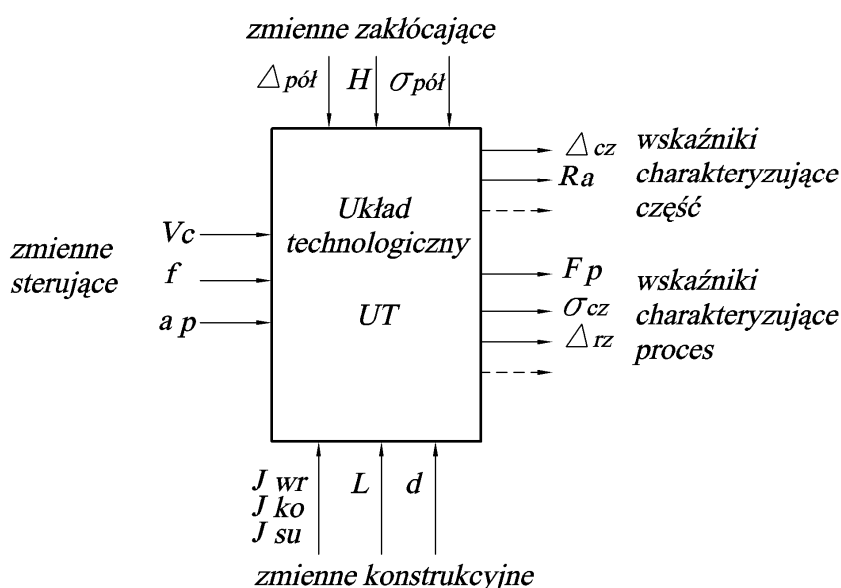
Konieczne jest rozsądne łączenie metod analitycznych i eksperymentalnych przy modelowaniu, metody czysto eksperymentalne nie mogą być stosowane w przypadku wysokich kosztów jednostkowych eksperymentu, a czysto analityczne w przypadku niedostatecznej dokładności, np. przy określaniu sił skrawania czy prędkości zużycia narzędzia skrawającego. Proces technologiczny obróbki części typu „wał” jest sumą operacji tokarskich, frezerskich, szlifierskich, wiertarskich oraz obróbki cieplnej, co jest charakterystyczne przy wszystkich typach produkcji. Przeanalizowano modele technologiczne każdej operacji jako sterowane obiekty technologiczne.

4.2. Modelowanie poszczególnych operacji procesu technologicznego

Jedną z dróg kompleksowego rozwiązania zagadnienia sterowania obróbką jest rozpatrzenie procesu technologicznego wykonania części jako jednolitego układu, łączącego wiele różnych operacji. W celu rozwiązania zagadnienia należy określić wartości sterowanych parametrów technologicznych oraz zbudować optymalną kolejność i strukturę operacji w procesie technologicznym. Do rozwiązania postawionego zagadnienia należy zbudować model matematyczny każdej operacji [40].

4.2.1. Modelowanie operacji toczenia

Niedokładność kształtu wału w kierunku wzdłużnym jest dominująca w ogólnej niedokładności obróbki i posiada istotny wpływ na charakterystykę eksploatacyjną części, często także na dynamikę maszyny, jej wydajność, niezawodność i żywotność. Przy czym wypaczenie wałów, wywołane przekształconym stanem naprężeń, obniża jakość wytwarzanych części, o czym świadczą liczne przypadki utraty dokładności względnego położenia powierzchni, ujawniające się w czasie montażu, pomimo że, po obróbce wykańczającej dokładność odpowiadała oczekiwany wymaganiom [40].



Rys. 4.2. Układ technologiczny toczenia jako obiekt sterowany

Badanie właściwości układu technologicznego realizującego proces toczenia zakłada analizę nie tylko bieżących wartości wielkości wejściowych, ale również wartości w poprzednich cyklach, otrzymanych w poprzedzających operacjach. W analizie UT toczenia jako obiektu sterowanego, parametrami wyjściowymi mogą być (rys. 4.2): wskaźniki charakteryzujące proces – składowa promieniowa siły skrawania F_p , naprężenia szczątkowe wewnątrz części σ_{cz} , odchyłka od rzeczywistej dokładności części Δ_{rz} ; wskaźniki charakteryzujące część – chropowatość powierzchni R_a , niedokładność kształtu części w kierunku wzdłużnym Δ_{cz} . Parametrami wejściowymi są: oddziaływania zakłócające – nierównomierny naddatek półfabrykatu $\Delta_{pół}$, twardość materiału półfabrykatu H , naprężenia szczątkowe wewnątrz półfabrykatu $\sigma_{pół}$; zmienne konstrukcyjne – średnica części d , długość części L , sztywność

wrzeciona J_{wr} , konika J_{ko} , suportu obrabiarki J_{su} ; zmienne sterujące - głębokość skrawania a_p , posuw f , prędkość skrawania v_c , prędkość obrotowa półfabrykatu n .

Zgodnie z przyjętymi oznaczeniami, zmienne charakteryzujące proces toczenia przyjmują następującą postać:

$$\overline{X}^{wej} = (\sigma_{pół}, H, \Delta_{pół}, d, L, J_{wr}, J_{ko}, J_{su}, v_c, f, a_p), \quad (4.1)$$

$$\overline{X}^{wyj} = (F_p, \sigma_{cz}, \Delta_{rz}, R_a).$$

W postaci ogólnej model matematyczny procesu technologicznego toczenia może być przedstawiony równaniem:

$$\overline{X}^{wyj} = f(\overline{X}^{wej}). \quad (4.2)$$

Na dokładność kształtu wału w kierunku wzdłużnym wpływają dwa zasadnicze czynniki: wielkość zmiennych sprężystych odkształceń części w czasie usuwania nierównomiernego naddatku oraz odkształcenia wywołane naprężeniami szczątkowymi:

$$\Delta_{rz} = f(\Delta_y, \Delta_\sigma) = \Delta_y + \Delta_\sigma, \quad (4.3)$$

gdzie: Δ_y - niedokładność wywołana sprężystymi odkształceniami części,

Δ_σ - niedokładność pochodząca od naprężeń szczątkowych.

Niedokładność wywołana zmiennymi odkształceniami sprężystymi części w czasie usuwania nierównomiernego naddatku Δ_y może być określona jako:

$$\Delta_y = \frac{F_p}{4} \left(\frac{1}{J_{wr}} + \frac{1}{J_{ko}} + \frac{1}{J_{su}} + \frac{16L^3}{3 \cdot \pi \cdot E \cdot d^3} \right), \quad (4.4)$$

gdzie: $F_p = C_p \cdot f^{y_p} \cdot a_p^{x_p} \cdot H^n$ - promieniowa składowa siła skrawania,

E - moduł sprężystości materiału półfabrykatu.

W celu obliczenia naprężeń szczątkowych wywołanych momentami zginającymi sił wewnętrznymi w czasie toczenia półfabrykatu z biciem naddatku należy znać charakter rozkładu naprężeń szczątkowych w przekroju poprzecznym półfabrykatu.

Ponieważ układ naprężeń w dowolnym momencie sam się równoważy to:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R \sigma_i \cdot dA = 0. \quad (4.5)$$

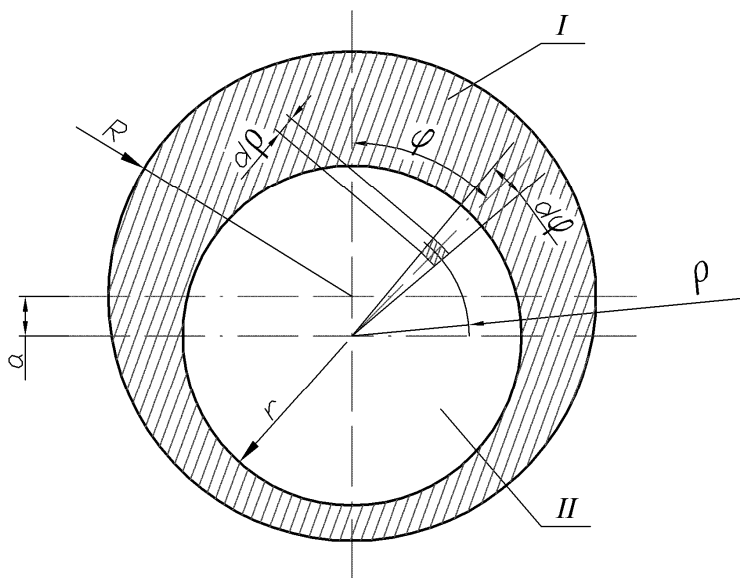
W czasie usuwania z półfabrykatu nierównomiernego naddatku w przekroju części powstaje moment zginający, który można określić jako moment naprężeń na powierzchni pierścienia I. Schemat do obliczeń momentów nie zrównoważonych sił przedstawiono na rys. 4.3 [40, 45].

Moment naprężeń działający na elementarne pole przekroju:

$$\begin{aligned} dM &= X \cdot \sigma_i \cdot dA, \\ dA &= \rho \cdot d\rho \cdot d\varphi, \\ X &= \rho \cdot \cos \varphi. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Tym sposobem:

$$dM = \sigma_i \cdot \rho^2 \cdot \cos \varphi \cdot d\rho \cdot d\varphi. \quad (4.7)$$



Rys. 4.3. Rysunek do obliczeń momentów nie zrównoważonych sił

Moment zginający naprężeń w przekroju II części:

$$M = 2 \int_0^{\pi r} \int_0^R \sigma_i \cdot \rho^2 \cdot \cos \varphi \cdot d\rho \cdot d\varphi, \quad (4.8)$$

$$M = 2 \int_0^{\pi r} \int_0^{\pi} (\sigma_0 - K \rho_1^2) \cdot \rho^2 \cdot \cos \varphi \cdot d\rho \cdot d\varphi.$$

Współczynnik K określany jest z warunków początkowych:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R (\sigma_0 - K \rho_1^2) \cdot \rho^2 \cdot d\rho \cdot d\varphi = 0, \quad (4.9)$$

$$\int_0^{2\pi} \left(\frac{\sigma_0 \cdot R^2}{2} - \frac{K \cdot R^4}{4} \right) d\varphi = 0,$$

Otrzymano:

$$K = \frac{2\sigma_0}{R^2}, \quad (4.10)$$

gdzie: R - promień zewnętrzny półfabrykatu.

Wyrażając ρ_1 przez zmienną całkowania ρ :

$$\begin{aligned} \rho_1^2 &= \rho^2 \sin^2 \varphi + (\rho \cdot \cos \varphi - a)^2. \\ \rho_1^2 &= \rho^2 \cdot \sin^2 \varphi + \rho^2 \cdot \cos^2 \varphi - 2a \cdot \rho \cdot \cos \varphi + a^2, \end{aligned} \quad (4.11)$$

ostatecznie otrzymano:

$$\rho_1^2 = \rho^2 - 2a \cdot \rho \cdot \cos \varphi + a^2. \quad (4.12)$$

podstawiając wyrażenie (4.12) do wzoru na moment zginający (4.8) otrzymano:

$$M = 2 \int_0^{\pi} \left[(\sigma_0 - K a^2) \cdot \frac{r^3}{3} - \frac{r^5}{5} \right] \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi + 2 \int_0^{\pi} \frac{2a \cdot K \cdot r^4}{4} \cdot \cos^2 \varphi \cdot d\varphi. \quad (4.13)$$

Pierwsza całka w wyrażeniu (4.13) jest równa zero. Ostatecznie po przekształceniach otrzymano:

$$M = \frac{\sigma_0 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot a}{R^2}. \quad (4.14)$$

Przewidywane wypaczenie wału po zdjęciu nierównomiernego naddatku:

$$y = \frac{M \cdot L^2}{8E \cdot I_x} = \frac{\sigma_0 \cdot \pi \cdot r^4 \cdot a \cdot L^2}{8R^2 \cdot E \cdot I_x}, \quad (4.15)$$

gdzie $I_x = \pi \cdot r^4 / 4$,

ostateczne wyrażenie może być zapisane w postaci:

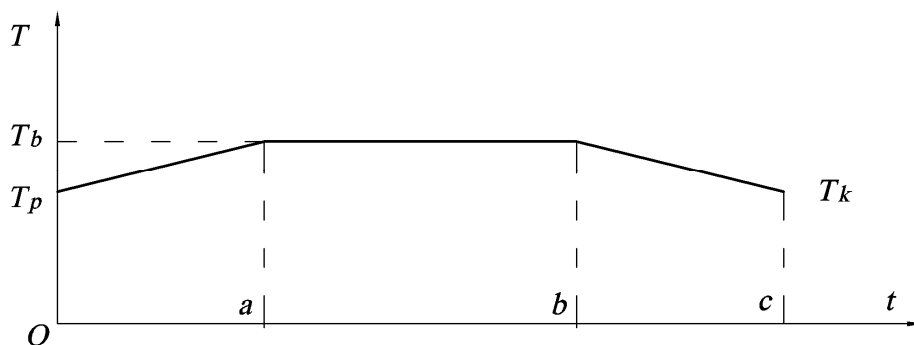
$$y = \frac{\sigma_0 \cdot L^2 \cdot a}{2R^2 \cdot E}. \quad (4.16)$$

Z zależności (4.16) wynika, że wielkość odkształcenia zależy głównie od mimośrod (a), długości części (L) oraz promienia półfabrykatu (R), a nie zależy od promienia części [39, 42].

Ponieważ na powierzchni półfabrykatu występują maksymalne naprężenia szczątkowe ściskające, to w wyniku usunięcia nierównomiernego naddatku odkształcenia szczątkowe prowadzą do tego, że strona, po której usunięto większy naddatek staje się wklęsła. W związku z tym pojawia się możliwość wykorzystania naprężeń szczątkowych w charakterze kompensatora ugięcia osi części spowodowanego odkształceniami sprężystymi.

4.2.2. Modelowanie operacji obróbki cieplnej

Przemiany fazowe materiału kształtowane są zasadniczo w maksymalnej temperaturze nagrzania, a wielkość naprężeń wewnętrznych jest funkcją zależności temperatury nagrzania i chłodzenia od czasu. Stan naprężeń pod wpływem temperatur jest opisany równaniami termodynamiki, termosprężystości i termoplastyczności, lecz niedoskonałość opisu analitycznego oraz wrażliwość rozwiązania na wahania stałych termodynamicznych powoduje, że bardziej racjonalny jest opis statystyczny, rozpatrujący proces obróbki termicznej jako obiekt sterowania. Przybliżoną zależność temperatury od czasu w trakcie obróbki cieplnej pokazano na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Przybliżona zależność temperatury od czasu w trakcie obróbki cieplnej

Na odcinku Oa zachodzi nagrzanie części, na odcinku ab – wygrzewanie, na odcinku bc – chłodzenie. Zależność ogólna opisana jest następującym równaniem:

$$T(t) = \begin{cases} T_p + K_1 \cdot t & \text{przy } 0 \leq t < a \\ T_b & \text{przy } a \leq t < b \\ \frac{T_b - T_k}{c - b} t - \frac{b(T_b - T_k)}{c - b} & \text{przy } b \leq t < c \end{cases}, \quad (4.17)$$

gdzie: K_1 - prędkość nagrzania, $K_2 = (T_b - T_k)/(c - b)$, - prędkość chłodzenia, która zależy od warunków chłodzenia (woda, olej itp.).

Urządzenie do obróbki cieplnej pozwala na regulację następujących parametrów procesu nagrzewanie - chłodzenie: K_1 - prędkość nagrzania; T_b - temperatura wygrzewania (maksymalna temperatura nagrzania); K_2 - prędkość chłodzenia, zależna od warunków chłodzenia; $\tau = b - a$ czas wygrzewania przy maksymalnej temperaturze.

Rozpatrując układ technologiczny jako obiekt sterowania w operacjach obróbki cieplnej (rys. 4.5) w ogólnym przypadku model matematyczny można przedstawić za pomocą równania:

$$\overline{X}^{wyj} = f(\overline{X}^{wej}), \quad \overline{X}^{wej} = (L, d, \Delta_w, \sigma_{pol}, K_1, T_b, \tau, K_2), \quad \overline{X}^{wyj} = (\Delta_A, H), \quad (4.18)$$

gdzie: L, d - długość i średnica półfabrykatu, zmienne pozwalające uwzględnić różnorodność części;

H - twardość uzyskana po obróbce cieplnej;

Δ_A - błąd kształtu w przekroju wzdłużnym, spowodowany odkształceniami cieplnymi;

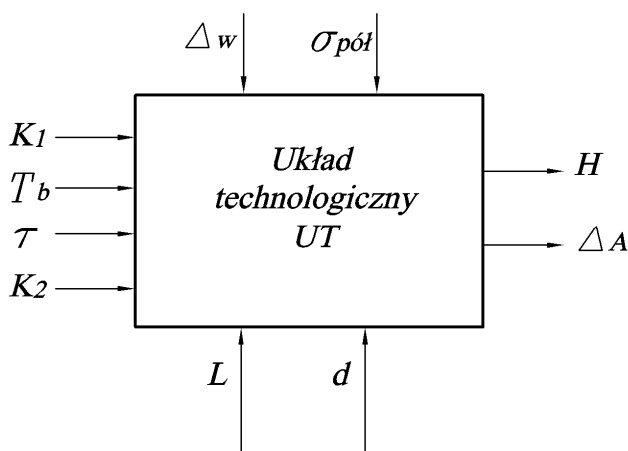
Δ_w - wielkość odkształcenia osi wału przed obróbką cieplną;

$\sigma_{pół}$ - naprężenia szczątkowe w półfabrykacie.

Model w postaci:

$$\Delta_F = \beta_0 \cdot K_1^{\beta_1} \cdot T_b^{\beta_2} \cdot K_2^{\beta_3} \cdot \tau^{\beta_4} \cdot L^{\beta_5} \cdot d^{\beta_6}, \quad (4.19)$$

otrzymano metodą planowania eksperymentu z zastosowaniem repliki typu 2^{6-3} . Stosując standardową metodę opracowywania danych eksperymentalnych z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów oraz regresywnej analizy otrzymano współczynniki modelu $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$.



Rys. 4.5. Układ technologiczny jako obiekt sterowania w operacjach obróbki cieplnej

Obróbce cieplnej (hartowanie, odpuszczanie, normalizacja) półfabrykatów towarzyszy zmiana stanu naprężeń. W procesie kształtowania się naprężeń szczątkowych w czasie chłodzenia można wyodrębnić trzy okresy. W początkowym okresie chłodzenia tworzą się naprężenia termiczne uwarunkowane różną prędkością stygnięcia warstw zewnętrznych i wewnętrznych. Naprężenia te osiągają maksimum w czasie osiągnięcia największej różnicy temperatur w przekroju poprzecznym półfabrykatu ΔT [41].

W miarę zmniejszenia się różnicy temperatur, wielkość naprężeń termicznych zmniejsza się i w pewnym momencie osiąga wartość zero, a półfabrykat uwalnia się od naprężeń. W czasie dalszego chłodzenia prędkość chłodzenia środka jest większa od prędkości chłodzenia powierzchni, dlatego tworzą się naprężenia przeciwnego znaku, które wzrastają do momentu całkowitego schłodzenia i pozostają w półfabrykacie: na powierzchni ściskające, a w środku rozciągające. Ogólną przyczyną odkształceń półfabrykatów w czasie obróbki cieplnej są nierównomierne odkształcenia termiczne, a także odkształcenia uwarunkowane naprężeniami fazowymi, które powstają w materiałach w czasie przemian fazowych.

Odpuszczanie następujące po hartowaniu albo ulepszanie cieplne porządkuje strukturę materiału i w sposób istotny zmniejsza naprężenia fazowe.

W związku z tym, że materiały mają ograniczoną przewodność cieplną, chłodzenie i odkształcenia termiczne przebiegają praktycznie równocześnie, to znaczy w dowolnym momencie każda elementarna cząsteczka części w przekroju posiada takie względne odkształcenie, które odpowiada statycznej równowadze układu przy danym chwilowym rozkładzie temperatur.

Osiowe naprężenia szczątkowe w warstwie elementarnej w dowolnej chwili określane są równaniem [59]:

$$\sigma_L = E[\varphi_{y+k} - \alpha_1 \cdot \varphi(y)], \quad (4.20)$$

gdzie: φ_{y+k} parametry kształtu w punkcie wyjściowym w postaci ogólnej, $\varphi(y)$ - funkcja rozkładu temperatury w przekroju, α_1 - współczynnik zależny od temperatury.

Rozkład temperatury w przekroju w czasie studzenia materiału określony jest kryterium temperatury Fouriera F_0 [1]. Jeżeli kryterium $F_0 \geq 0,3$ to temperatura, a więc i naprężenia osiowe, rozkładają się w przekroju wg krzywej parabolicznej drugiego stopnia, wówczas ma miejsce tak zwany regularny reżim temperaturowy. W trakcie stygnięcia części cylindrycznych oprócz naprężeń osiowych powstają także naprężenia promieniowe i styczne. W granicach odkształceń sprężystych można zapisać następujące równania:

$$\begin{aligned} \varepsilon_R &= \frac{1}{E}[\sigma_R - \nu(\sigma_T + \sigma_L)], \\ \varepsilon_T &= \frac{1}{E}[\sigma_T - \nu(\sigma_R + \sigma_L)], \\ \varepsilon_L &= \frac{1}{E}[\sigma_L - \nu(\sigma_R + \sigma_T)], \end{aligned} \quad (4.21)$$

gdzie: $\varepsilon_R, \varepsilon_T, \varepsilon_L$ - odkształcenia szczątkowe promieniowe, osiowe i styczne.

Naprężenia szczątkowe promieniowe i styczne wywołują odkształcenia szczątkowe powiększające wymiary półfabrykatu w przekroju poprzecznym. Odkształcenia wzdłużne określone są osiowymi naprężeniami szczątkowymi. Osiowe naprężenia szczątkowe w przekroju półfabrykatu określone są zależnością [1, 43]:

$$\sigma_L = \left(1 - \frac{3x^2}{2d^2}\right) \frac{\beta E \Delta T}{3}, \quad (4.22)$$

gdzie: β - współczynnik rozszerzalności liniowej.

Siła wzdłużna wywołana naprężeniami osiowymi jest określona jako:

$$F = \frac{2\beta E \Delta T d^2}{3}. \quad (4.23)$$

Przyjmując w przypadku stali $\beta E = 2,4 \frac{N}{m^2 K}$, K_3 - współczynnik proporcjonalności, dla stali $K_3 = 0,35$, α_2 - współczynnik oddawania ciepła, λ_1 - współczynnik przejmowania ciepła, $\Delta T = T_{pocz} - T_{ot}$. Podstawiając te wyrażenia do wzoru (4.23) otrzymano:

$$F = 0,56 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta T \cdot d / \lambda_1. \quad (4.24)$$

Siła osiowa F jest równomiernie rozłożona w przekroju półfabrykatu. Przy obliczeniach odkształceń przyjęto, że półfabrykat poddany obróbce cieplnej posiada początkową niedokładność kształtu w przekroju wzdłużnym. Równanie linii ugięcia osi wału przed obróbką cieplną:

$$y_l = \Delta_w \cdot \sin \frac{\pi x}{L}, \quad (4.25)$$

gdzie: Δ_w - wielkość odkształcenia osi wału przed obróbką cieplną,

x - bieżąca współrzędna.

W czasie obróbki cieplnej pod wpływem działania siły wał ugina się. Równanie linii ugięcia osi wału ma postać:

$$EI \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x), \quad (4.26)$$

gdzie: y - wielkość dodatkowego ugięcia osi wału po obróbce cieplnej w odległości x od początku układu współrzędnych.

Moment zginający pochodzący od siły osiowej jest określony jako:

$$M(x) = F \cdot (y + \Delta_w \cdot \sin \frac{\pi x}{L}). \quad (4.27)$$

Po rozwiązaniu równania (4.26) z uwzględnieniem wyrażenia (4.27) oraz, że $F_k = \pi^2 \cdot EI / L^2$ - siła krytyczna określająca stateczność układu (krytyczna siła Eulera), otrzymano wyrażenie na odkształcenie wału w czasie obróbki cieplnej:

$$\Delta_Q = \frac{\Delta_w}{1 - F / F_k}, \quad (4.28)$$

uwzględniając wyrażenie (4.24) ostatecznie otrzymano:

$$\Delta_Q = \Delta_w \cdot \frac{EI \cdot \lambda_1}{EI \cdot \lambda_1 - 0,56 \cdot \Delta T \cdot L^2 \cdot d \cdot \alpha_2}. \quad (4.29)$$

Model matematyczny obróbki cieplnej może być zapisany w postaci:

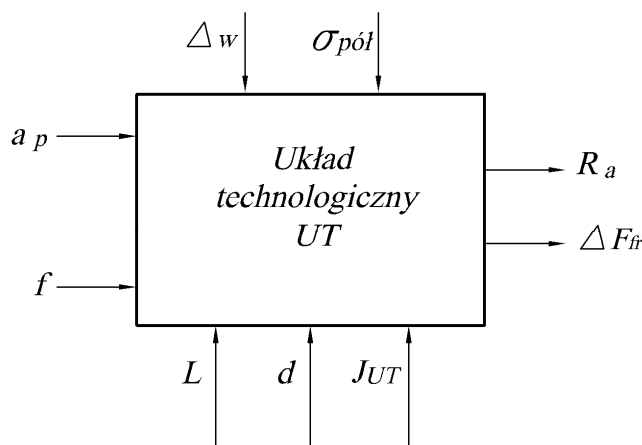
$$\Delta_Q = \Delta_w \cdot \left(1 + \frac{EI \cdot \lambda_1}{EI \cdot \lambda_1 - 0,56 \cdot \Delta T \cdot L^2 \cdot d \cdot \alpha_2} \right). \quad (4.30)$$

Przeprowadzona analiza otrzymanych wyrażeń oraz badania analityczne wykazały, że wielkość odkształcenia wałów można określić jeszcze na etapie opracowywania procesu technologicznego, w związku z tym można przyjąć odpowiednie minimalne naddatki na obróbkę.

4.2.3. Modelowanie operacji frezowania rowków wpustowych

W czasie frezowania rowków wpustowych część ustawiana jest na pryzmach, a siły mocowania przyłożone są naprzeciw punktów podparcia.

W procesie technologicznym jako obiekcie sterowania w trakcie operacji frezowania rowków wpustowych (rys. 4.6) parametrami wyjściowymi są wskaźniki charakteryzujące część: chropowatość powierzchni R_a oraz rzeczywisty błąd kształtu wału Δ_{Ffr} po frezowaniu [41].



Rys. 4.6. Układ technologiczny w operacji frezowania rowków wpustowych jako obiekt sterowania

Parametrami wejściowymi są: zmienne konstrukcyjne – średnica d i długość części L ; sztywność układu technologicznego J_{UT} ; zmienne sterujące: głębokość skrawania a_p , posuw f ; zmienne zakłócające: początkowe skrzywienie osi Δ_w , naprężenia szczątkowe w półfabrykacie $\sigma_{pół}$.

W ten sposób zmienne charakteryzujące proces są powiązane ze sobą następującymi zależnościami:

$$\bar{X}^{wyj} = f(\bar{X}^{wej}), \bar{X}^{wej} = (\Delta_w, \sigma_{pół}, a_p, f, d, L, J_{UT}), \bar{X}^{wyj} = (\Delta_{Ffr}, R_a). \quad (4.31)$$

Wyrażenie na sumaryczną niedokładność w danej operacji może być zapisane w postaci:

$$\Delta_{Ffr} = \Delta_b + \Delta_{moc} + \Delta_{obr} + \Delta_{odk}, \quad (4.32)$$

gdzie: Δ_b - niedokładność bazowania, Δ_{moc} - niedokładność mocowania,

Δ_{obr} - niedokładność związana z oddziaływaniem sił skrawania w czasie obróbki,

Δ_{odk} - niedokładność wywołana odkształceniami części w wyniku usunięcia nadmiaru.

Ponieważ ustawienie części przy frezowaniu rowków wpustowych odbywa się na pryzmach i siły mocowania są przyłożone naprzeciw punktów podparcia, dwie pierwsze postaci błędów nie mają wpływu na dokładność kształtu [107].

Model matematyczny przyjmuje postać:

$$\Delta_{Ffr} = \frac{F \cdot l^3}{48EI} - \frac{3 \cdot K \cdot \Delta T \cdot \alpha_2 \cdot a_1}{2 \cdot \lambda_1 \cdot d \cdot 10^3}, \quad (4.33)$$

gdzie: F - siła skrawania, l - rozstaw pryzm, a_1 - wielkość usuwanego naddatku,

ΔT - różnica temperatur stygnięcia i otoczenia,

$K \approx 0,35$ - współczynnik uwzględniający związek pomiędzy wymiarowym kryterium Bio (B_i) i kryterium temperatury (Q) przy obliczeniach naprężeń szczątkowych w przypadku stali konstrukcyjnych,

α_2, λ_1 - odpowiednio współczynniki oddawania ciepła i przewodności cieplnej materiału, w przypadku stali konstrukcyjnej $\alpha_2 / \lambda_1 \approx 2,5$ [107].

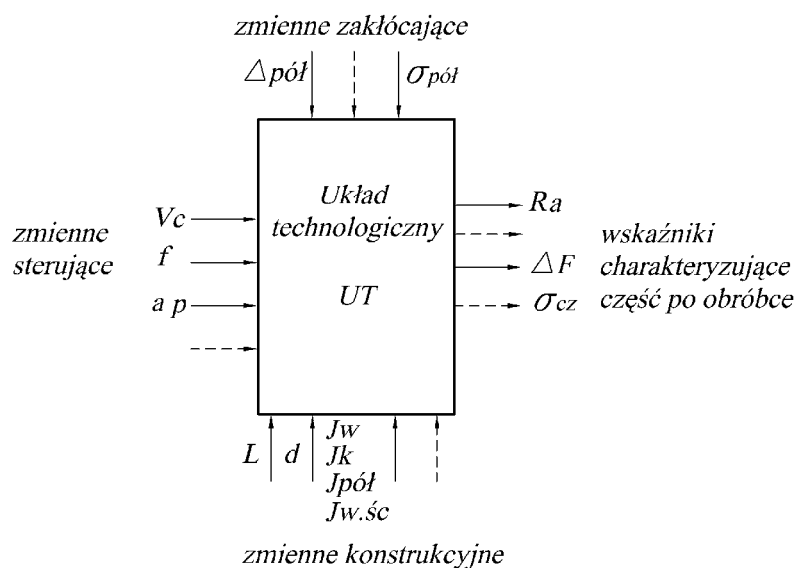
Analiza wyników badań eksperymentalnych (podrozdział 5.3.3) wykazuje, że ze wzrostem przesunięcia nakiełków przed poprzedzającą operacją toczenia niedokładność rowka wpustowego, związana z odkształceniem spowodowanym naprężeniami szczątkowymi, wzrasta przy frezowaniu rowków na wypukłej powierzchni wału i maleje przy obróbce na przeciwległej stronie. Przy czym udział niedokładności, związanej z odkształceniem, stale rośnie i osiąga 20% przy przesunięciu nakiełków równym 3 mm. Dokładna analiza wyników badań eksperymentalnych operacji frezowania rowków wpustowych jest przedstawiona w podrozdziale 5.3.3.

4.2.4. Modelowanie operacji szlifowania

Opis matematyczny operacji szlifowania rozpatrywanej jako obiekt sterowania (rys. 4.7) ma postać [41]:

$$\begin{aligned} \overline{X}^{wej} &= (\sigma_0, \Delta_{pół}, a_p, v_c, f, d, L, J_{wr}, J_{ko}, J_{su}), \\ \overline{X}^{wyj} &= (\Delta_{szl}, R_a), \end{aligned} \quad (4.34)$$

gdzie: $\Delta_{pół}$ - całkowita wielkość naddatku na szlifowanie, Δ_{szl} - rzeczywisty błąd kształtu po szlifowaniu.



Rys. 4.7. Układ technologiczny szlifowania jako obiekt sterowania

W czasie szlifowania wałów błąd obróbki określony głębokością skrawania i liczbą przejść można określić z zależności [63]:

$$\Delta_{szl} = a_p \cdot \frac{A \cdot (A^i - 1)}{A - 1} - K \cdot \Delta_{odk}, \quad (4.35)$$

gdzie: a_p - głębokość skrawania, i - liczba przejść,

$$A = \frac{1}{\frac{(1 - x/L)^2 \cdot C}{J_{wr}} + \frac{(x/L)^2 \cdot C}{J_{ko}} + \frac{C}{J_{su}} + \frac{x^2 (L - x)^2 \cdot C}{3E \cdot I}}. \quad (4.36)$$

Liczba przejść i określana jest na podstawie rzeczywistego naddatku, który jest równy:

$$N_{rz} = N_z + \Delta_{Ffr},$$

gdzie: N_z - nadatek na szlifowanie, Δ_{Ffr} - niedokładność uzyskana w poprzedniej operacji, C – stały współczynnik uwzględniający składową promieniową siły skrawania. Uwzględniając niedokładność powstałą w poprzedniej operacji (4.33) otrzymano:

$$\Delta_{szl} = \Delta_{Ffr} \cdot \left[1 + \frac{A(A^i - 1)}{i(A - 1)} - \frac{\sigma_0 \cdot L^2}{2E \cdot R^2} \right]^i. \quad (4.37)$$

Wiedząc, że przy zwiększeniu liczby przejść wzrasta niedokładność szlifowania można sformułować wniosek, że niedokładność kształtu (ugięcie osi) uzyskana w poprzednich operacjach sprzyja obniżeniu dokładności szlifowania.

Wyniki badań eksperymentalnych uzyskanej dokładności w operacjach szlifowania przedstawiono w podrozdziale 5.4.

4.3. Relacja między zmiennymi opisującymi operacje procesu technologicznego.

Ogólny model procesu

Analiza dokładności kształtu w czasie obróbki w poszczególnych operacjach wykazała, że ma miejsce technologiczna dziedziczność błędów powstających w poprzednich operacjach. Pojęcie o barierach oraz dziedziczności technologicznej wprowadzone w pracy [118], okazuje się umownym, ponieważ główna bariera - obróbka cieplna – tworzy niedokładność kształtu z uwzględnieniem dziedziczenia poprzednich niedokładności i może być określona analitycznie.

W czasie projektowania operacji technologicznych technolog musi pogodzić sprzeczne wymagania: osiągnięcie wymaganej dokładności obróbki oraz zapewnienie najmniejszych kosztów. Pierwsze można spełnić w wyniku rozbudowania procesu technologicznego drogą wprowadzenia dodatkowych operacji obróbki cieplnej, prostowania, szlifowania; drugie natomiast jest trudniejsze do rozwiązania

Rozwiązanie zagadnienia określenia sumarycznej niedokładności w czasie obróbki wielooperacyjnej umożliwia optymalizację procesu obróbki wałów o wysokiej dokładności, a więc jednocześnie uwzględnienie obu wymagań. W każdej operacji niedokładność jest funkcją dwóch składowych: błędów powstających bezpośrednio w trakcie operacji związanych z warunkami technologicznymi (niedokładność bazowania, odkształcenia sprężyste UT, zużycie narzędzia itp.); pośrednio - błędów powstających w poprzednich operacjach i wpływających na warunki obróbki w wyniku dodatkowych obciążeń dynamicznych.

Ogólna sumaryczna niedokładność kształtu w trakcie obróbki wielooperacyjnej jest określana drogą obliczeń jako niedokładność w końcowej operacji:

$$\Delta_{sum} = f(\bar{\Delta}_p, \bar{\Delta}_{p-1}), \quad (4.38)$$

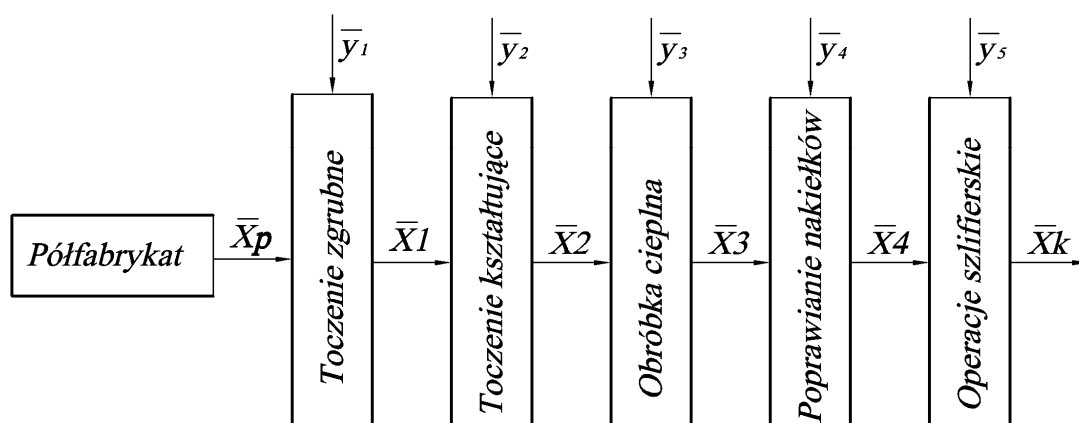
gdzie: $\bar{\Delta}_p$ - suma wektorowa błędów związanych z parametrami technologicznymi danej

operacji, $\bar{\Delta}_{p-1}$ - błąd z poprzedniej operacji, w kolejności $\bar{\Delta}_{p-1}$ kształtowany jako:

$$\bar{\Delta}_{p-1} = f(\bar{\Delta}_{p-1}, \bar{\Delta}_{p-2}). \quad (4.39)$$

Określenie sumarycznego błędu w obróbce wielooperacyjnej wymaga obliczenia błędów kształtu w każdej operacji wg przedstawionych niżej zależności. Kolejne obliczenia pozwalają uniknąć wyprowadzenia niezwykle trudnych i kłopotliwych wyrażeń na sumaryczny błąd i oprócz tego określić operacje i parametry obróbki, które powodują największe błędy. Dzięki temu technolog może wносить korekty do procesu technologicznego, a przy projektowaniu zautomatyzowanym prowadzić poszukiwania optymalnych warunków obróbki.

Metodykę określania błędu sumarycznego można zilustrować na przykładzie obróbki wału gładkiego, w przypadku którego przyjmowana jest następująca kolejność obróbki (rys. 4.8):



Rys. 4.8. Wzajemne oddziaływanie operacji procesu technologicznego w zagadnieniu optymalizacji

1. Obróbka tokarska zgrubna (uchwyt - kiel),
2. Obróbka tokarska wykańczająca (uchwyt - kiel),
3. Obróbka cieplna (hartowanie, odpuszczanie),
4. Operacje tokarskie (poprawienie nakielków),
5. Operacja szlifierska.

Po toczeniu zgrubnym, w wyniku usunięcia nierównomiernego naddatku, powstaje błąd kształtu w postaci skrzywienia półfabrykatu wzdłuż osi. Przyczyną ugięcia jest bicie naddatku, co prowadzi do powstania dodatkowego sprężystego przemieszczenia narzędzia w miejscu największego występowania wypukłości wału, a także odkształcenia obrabianego

półfabrykatu, powstania dodatkowych momentów sił nie zrównoważonych. Błąd kształtu powstający w trakcie toczenia zgrubnego określany jest jako:

$$\Delta_{t.zg.} = a \cdot \left[1 - \frac{1}{(L^3 / 24EI)(1 - \frac{25L^3 \cdot J_{ko}}{96EI} + 38L^3) + 1/J_{su} + 1} - \frac{\sigma_0 \cdot L^2}{2E \cdot R^2} \right]. \quad (4.40)$$

W czasie kolejnej operacji (toczenia wykańczającego) wielkość „a” – bicie naddatku, jest równa błędowi kształtu, otrzymanego przy toczeniu zgrubnym to znaczy $\Delta_{t.zg.}$.

$$\Delta_{t.wyk.} = \Delta_{t.zg.} \cdot \left[1 - \frac{1}{(L^3 / 24EI)(1 - \frac{25L^3 \cdot J_{ko}}{96EI} + 38L^3) + 1/J_{su} + 1} - \frac{\sigma_0 \cdot L^2}{2E \cdot R^2} \right]. \quad (4.41)$$

Błąd kształtu po obróbce cieplnej określany jest z uwzględnieniem błędu powstającego w trakcie toczenia wykańczającego:

$$\Delta_{ciep} = \left\{ \Delta_{t.zg.} \cdot \left[1 - \frac{1}{(L^3 / 24EI)(1 - \frac{25L^3 \cdot J_{ko}}{96EI} + 38L^3) + 1/J_{su} + 1} - \frac{\sigma_0 \cdot L^2}{2E \cdot R^2} \right] \right\} \times \left(1 + \frac{EI \cdot \lambda_1}{EI \cdot \lambda_1 - 0,56 \cdot \Delta T \cdot L^2 \cdot d \cdot \alpha_2} \right) \quad (4.42)$$

Błąd powstający przy poprawianiu położenia nakiełków określony jest z uwzględnieniem błędu powstającego w czasie obróbki cieplnej:

$$\Delta_{p.n.} = (1 + 0,4/L) \cdot \left\{ \Delta_{t.zg.} \cdot \left[1 - \frac{1}{(L^3 / 24EI)(1 - \frac{25L^3 \cdot J_{ko}}{96EI} + 38L^3) + 1/J_{su} + 1} - \frac{\sigma_0 \cdot L^2}{2E \cdot R^2} \right] \right\} \times \left(1 + \frac{EI \cdot \lambda_1}{EI \cdot \lambda_1 - 0,56 \cdot \Delta T \cdot L^2 \cdot d \cdot \alpha_2} \right) \quad (4.43)$$

Ostatecznie wyrażenie na błąd kształtu z uwzględnieniem operacji szlifowania posiada dość trudną i kłopotliwą do obliczeń postać. Dlatego obliczenia należy prowadzić po kolei w przypadku każdej operacji.

Przy określaniu błędu sumarycznego konieczne trzeba powiązać wszystkie operacje w jeden łańcuch, w którym parametry wyjściowe poprzedniej operacji stają się wejściowymi w następnych operacjach. Kryterium optymalizacji powinno odzwierciedlać, w pierwszej kolejności, poniesienie minimalnych kosztów własnych przy jednoczesnym uzyskaniu wymaganej dokładności:

$$\begin{aligned} \sum Q_i &\rightarrow \min, \\ \Delta_F &\leq \Delta_{dop}, \\ R_a &\leq R_{adop}, \\ \Delta_{Fi} &= \varphi_i(X_i, Y_i, K_i), \end{aligned} \tag{4.44}$$

gdzie: Q_i - koszty własne i -tej operacji, Δ_F - rzeczywista dokładność obróbki.

Ponieważ odkształcenia szczątkowe wału powstające w wyniku przekształcenia stanu naprężeń szczątkowych i działania momentów nie zrównoważonych sił wewnętrznych są przeciwne do kierunku odkształceń wywołanych odkształceniami sprężystymi UT w czasie usuwania nierównomiernego naddatku, można sformułować wniosek o pozytywnym wpływie naprężeń szczątkowych na dokładność kształtu w czasie obróbki wałów. Przy równości obu odkształceń teoretycznie wielkość błędu może być równa zero, co jest przesłanką do sterowania dokładnością obróbki wielooperacyjnej.

**5. BADANIA DOŚWIADCZALNE DOKŁADNOŚCI OBRÓBKI WAŁÓW
PRZY WYSTĘPOWANIU NAPRĘŻEŃ SZCZĄTKOWYCH**

5.1. Ogólna metoda badań. Materiały, wyposażenie, instrumenty, narzędzia pomiarowe

Podstawowe badania przeprowadzono bezpośrednio w wydziałach dwóch zakładów produkcyjnych, analizując produkowane części (wały gładkie, stopniowane, z rowkami wpustowymi itp.). Badania laboratoryjne wykonano na stanowisku do badań doświadczalnych w laboratorium metrologii PWSZ w Chełmie i laboratorium metrologii zakładów „SewMorZawod, „Jug”.

W badaniach użyto znane rodzaje materiałów: stal C45 (45), stal 41Cr4 (40H) oraz stal 15NiCr3 (18H2N4MA); wykorzystywane w produkcji narzędziowej (np. oprawki o podwyższonej niezawodności technologicznej do nacinania zębów). Skład chemiczny oraz własności mechaniczne badanych materiałów przedstawiono w tab. 5.1 i tab. 5.2.

Tab. 5.1. Skład chemiczny badanych materiałów

Rodzaj stali		Zawartość składników %								
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mg
1.	40H (41Cr4)	0,36- 0,44	0,17- 0,37	0,50- 0,80	0,03	0,03	0,8- 1,1	0,25	0,20	-
2.	45 (C45)	0,42- 0,50	0,17- 0,37	0,50- 0,80	0,04	0,04	0,25	0,25	0,25	-
3.	18H2N4MA (15NiCr3)	0,14- 0,20	0,17- 0,37	0,25- 0,5	-	-	1,35- 1,65	4,40	-	0,30- 0,40

Tab. 5.2. Własności mechaniczne badanych materiałów

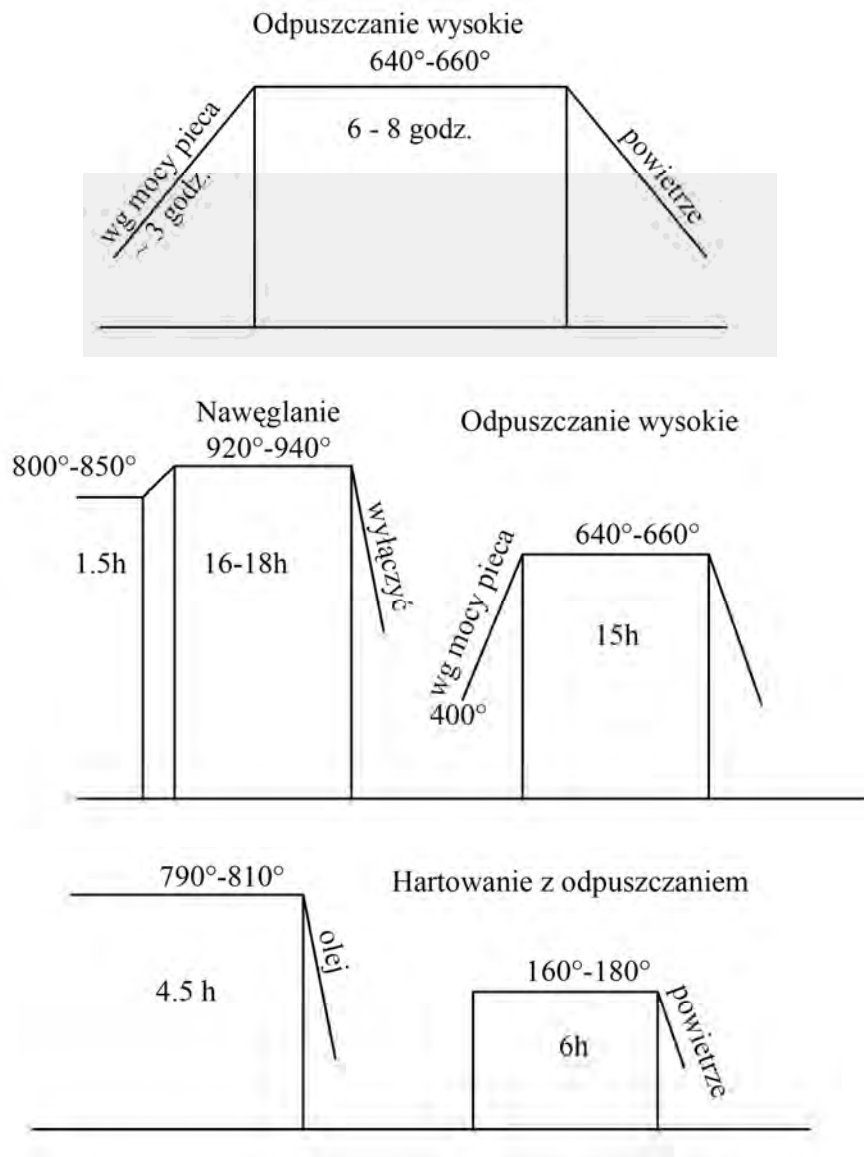
Rodzaj stali		Re, MPa	Rm, MPa	A ₅ , %	Z, %	K, Nm/cm ²
1.	41Cr4	637	784	10	40	59
2.	C45	313	588	16	38	34
3.	15NiCr3	833	1127	12	50	98

Zastosowana obróbka cieplna do próbek to: normalizacja, odpuszczanie wysokie, nawęglanie, hartowanie i odpuszczanie (rys. 5.1).

W warunkach produkcyjnych części były obrabiane na tokarkach, frezarkach pionowych, roztaczarkach, szlifierkach do wałków, szlifierkach do płaszczyzn. W warunkach laboratoryjnych badania eksperymentalne przeprowadzono na obrabiarkach wymienionych w tab. 5.3.

Części na stanowisku tokarskim były obrabiane w kłach, a także specjalnie opracowanym do tego celu przyrządzie. W warunkach produkcyjnych części na roztaczarkach poziomych ustawiano w pryzmach i mocowano ściskami. W warunkach laboratoryjnych części

ustawiano w uniwersalnych urządzeniach, mocowano za pomocą klucza dynamometrycznego.



Rys. 5.1. Wykresy obróbki cieplnej stosowanej w badaniach stanu naprężeń próbek

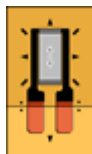
Narzędzie skrawające: wiertła skrotne przedłużone z ostrzem skrawającym wykonanym z materiału HS-6-5-2 (SW7M) o średnicach od 6,5 mm do 48 mm.

Tab. 5.3. Oprzyrządowanie technologiczne wykorzystane w warunkach laboratorium

Nazwa obrabiarki	Model obrabiarki
Tokarka	16K20, 16K20F3
Roztaczarka pozioma	2620BF
Roztaczarka współrzędnościowa	2A450
Szlifierka do wałków	3MI5IB
Frezarka pionowa	6MI3P, PT705F3

Średnie parametry obróbki w czasie roztaczania były następujące: $v_c = 0,5-0,9$ m/s, $f = 0,8$ mm/obr, $a_p = 1,5$ mm.

W celu określenia naprężeń szczątkowych zastosowano metodę Sachsa, polegającą na jednostronnym warstwowym roztaczaniu z późniejszym pomiarem odkształceń osiowych i stycznych [52]. Pomiarów dokonywano z wykorzystaniem metod tensometrii oporowej. Do pomiaru naprężeń wybrano tensometry konstantanowe firmy Vishay Measurements serii CEA o oznaczeniu kodowym 125UN (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Tensometry użyte do badań

Tensometry te mają rezystancję własną równą 120Ω , siatka pomiarowa zabezpieczona jest dodatkową warstwą ochronną z materiału identycznego jak materiał podłoża. Producent gwarantuje prawidłową ich pracę w zakresie temperatur od -75°C do $+175^{\circ}\text{C}$, w tym samym zakresie temperatur są również skompensowane temperaturowo. Zakres pomiarowy wynosi $\pm 1500\mu\epsilon$, a stała tensometru $k=2,1$. Czujniki przeznaczone są do pomiarów obciążeń zarówno statycznych jak i dynamicznych (do 10^5 cykli). Baza aktywna wynosi 9,7 mm, zaś szerokość – 4,8 mm. Wybór takich tensometrów uwarunkowany był tym, że podłoże charakteryzuje się stabilizacją wskazań w miarę upływu czasu, jego pełzanie jest niewielkie. Powierzchnię do naklejania tensometrów przygotowywano z wykorzystaniem technologii i materiałów firmy Measurements Vishay. Miejsca do naklejania czujników tensometrycznych oczyszczano papierem ściernym w taki sposób, aby nie pozostawały widoczne rysy. Czyszczenie wykonano we wzajemnie krzyżujących się kierunkach. Powierzchnie przygotowano za pomocą specjalnych substancji: solvent cleaner CSM-2 do odtłuszczania powierzchni oraz Neutralizer 5A do dezaktywowania substancji odtłuszczającej.

Przy występowaniu widocznych plam odtłuszczanie powtarzano. Uwzględniając to, że jednym z decydujących czynników określających wiarygodność i stabilność wyników jest jakość połączenia klejonego tensometru z obiektem, wyborowi kleju poświęcono szczególną uwagę. Uwzględniono zgodność właściwości kleju z właściwościami materiału podłoża tensometru i materiału doświadczalnego obiektu. Wybrano klej cyjanoakrylowy M-BOND 200 (Measurements Vishay, Niemcy) do klejenia „na zimno” w temperaturze pokojowej. Wybór tego kleju podyktowany był także tym, że do uzyskania trwałego i pewnego

połączenia, do zajścia wymaganych reakcji chemicznych w kleju, wystarczy temperatura ciała ludzkiego, np. kciuka.

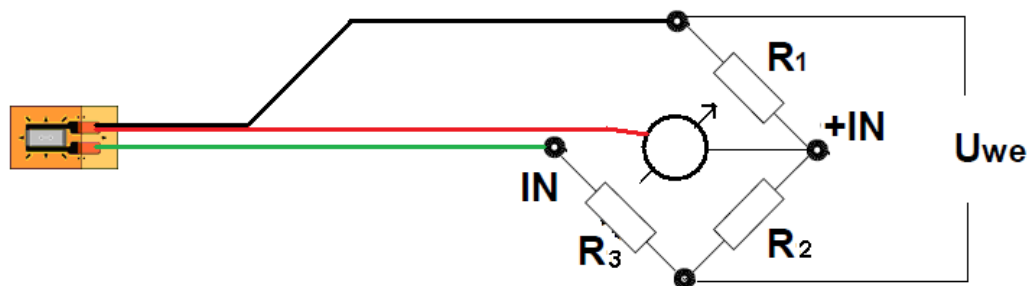
Części miały temperaturę pokojową. Cienką warstwę kleju наносzono tylko na tensometr. Tensometr przed nałożeniem kleju był wstępnie przytwierdzony specjalną taśmą samoprzylepną tak, aby jego oś pokrywała się z oznaczeniami traserskimi naniesionymi na podłoże. Po naniesieniu wymaganej warstwy kleju tensometr był silnie przyciskany kciukiem i pod naciskiem klejony przez jedną minutę. Jakość połączenia była określana za pomocą miernika. Sprawdzono rezystancję tensometrów w celu wyeliminowania przerwania i kontrolowano opór izolacji upewniając się, czy wynosi nie mniej niż 50 MΩ. Głównym narzędziem służącym do kontroli jakości wykonania połączenia był Gage Installation Tester 1300 firmy Vischay (rys. 5.3).



Rys. 5.3. Gage Installation Tester 1300

Spośród łączących przewodów wybrano montażowe trójżyłowe przewody 326-DFV o średnicy 0,12 mm o jednakowej długości, które łączono z wyjściowymi przewodami każdego tensometru. W celu zapewnienia izolacji przed wilgocią dobierano powłokę elastyczną, która dzięki temu z upływem czasu nie powinna kruszyć się, ponieważ to mogłoby doprowadzić do wypaczenia wyników pomiarów, szczególnie w czasie badań w końcowych etapach roztaczania otworów, kiedy wał staje się cienkościennym cylindrem. Zastosowano pokrycie M-Coat A, które bardzo dobrze chroni tensometry przed wilgocią,

nie jest kruche, posiada niezbędną lepkość, jest dobrym izolatorem i nie jest agresywne w odniesieniu do samego tensometru jak i kleju. Substancja ta jest łatwa w użyciu, szybko schnie i dokładnie pokrywa przyklejony tensometr. Może pracować w zakresie temperatur od -75°C do $+150^{\circ}\text{C}$ w krótkim okresie czasu i -75°C do $+120^{\circ}\text{C}$ w długim okresie czasu. Przed nałożeniem lakieru ochronnego wykonano połączenia lutownicze. Czujniki tensometryczne pracowały w układzie $\frac{1}{4}$ mostka pomiarowego, więc połączenia tensometrów z mostkiem pomiarowym wykonano techniką trójprzewodową (rys. 5.4). Trójprzewodowe połączenie tensometrów zabezpiecza układ pomiarowy przed wpływem temperatury otoczenia na kable połączeniowe i tym samym wyklucza wpływ temperatury na powstawanie błędów.



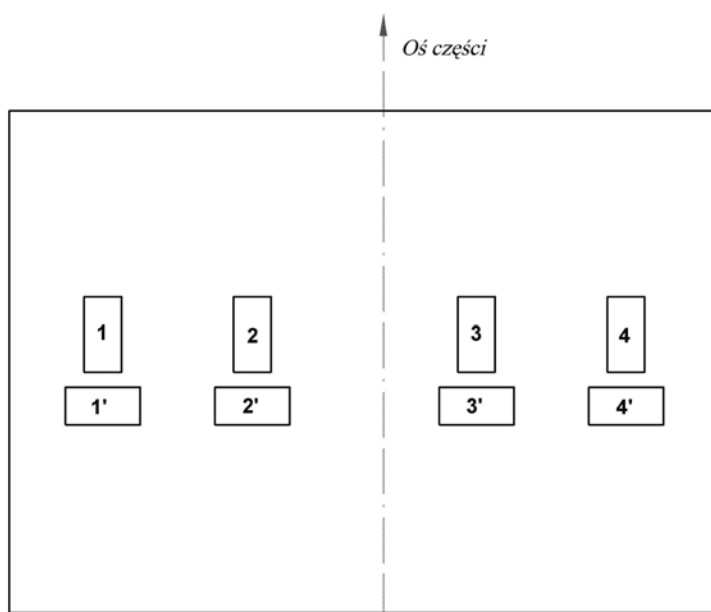
Rys. 5.4. Schemat podłączenia tensometru do mostka pomiarowego techniką trójprzewodową

Przewody łączące zostały wyprowadzone na łącza. Tensometry podłączono wg schematu ćwierćmostka pomiarowego (rys. 5.4). Rezystory nr 1,2 i 3 stanowią pozostałą część mostka mierniczego wbudowaną w urządzenie pomiarowe.

Sposób rozmieszczenia tensometrów pokazano na rys. 5.5. Tensometry 1, 2, 3 i 4 naklejono na badaną próbkę, stanowią one aktywne czujniki pomiarowe mierzące naprężenia główne. Tensometry 1', 2', 3' i 4' pełnią rolę tensometrów kompensacyjnych eliminujących wpływ momentu gnącego pochodzącego od siły posuwowej procesu wiercenia. Każdy z ośmiu tensometrów ma indywidualne połączenie z mostkiem pomiarowym. Połączenie takie podyktowane zostało możliwościami wykorzystanej aparatury kontrolno-pomiarowej użytej do badań. Aktywne i kompensacyjne tensometry, wchodzące w skład zewnętrznego ćwierćmostka, naklejano na powierzchni obiektu narażonego na odkształcenia wywołane ściskaniem lub rozciąganiem. Przy oddziaływaniu odkształceń na tensometr umieszczony w zewnętrznym ćwierćmostku pomiarowym, następowała różnica napięć mostka przyrządu pomiarowego. Względny wynik pomiaru oporu tensometru aktywnego określa wielkość odkształcenia:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}; \quad \frac{\Delta l}{l} = \varepsilon,$$

gdzie: ε - odkształcenie względne; l - długość tensometru aktywnego przy braku odkształceń; Δl - zmiana długości tensometru aktywnego przy zmianie odkształcenia obiektu doświadczalnego; R - opór tensometru aktywnego przy braku odkształceń; K - współczynnik czułości tensometru, zależny od materiału tensometru (w użytych tensometrach $k=2,1$).



Rys. 5.5. Schemat naklejenia tensometrów

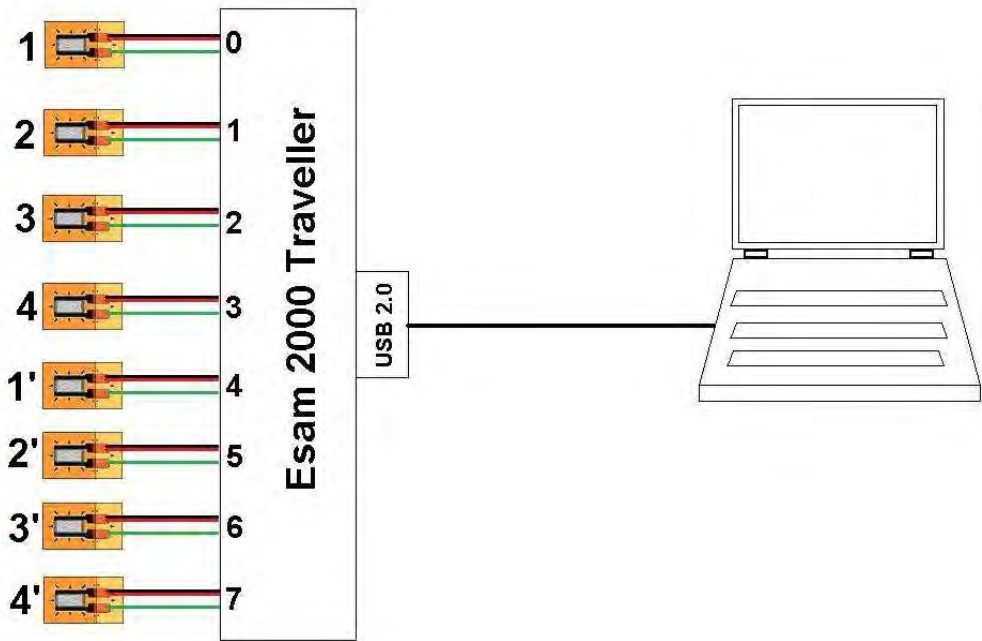


Rys. 5.6. Esam 2000 Traveller

Do pomiaru odkształceń został użyty system pomiarowy Esam 2000 Traveller firmy MGM Vishay, Niemcy (rys. 5.6). Jest to nowoczesne urządzenie pomiarowe dające możliwość pomiaru we wszystkich znanych układach pomiarowych, tj. $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ i pełnego mostka pomiarowego. Pobór i archiwizacja danych możliwa jest dzięki bezpośredniej współpracy mostka pomiarowego Esam z komputerem PC wyposażonym w specjalistyczne oprogramowanie. Oprogramowanie to umożliwia zarówno pobór danych, ich archiwizację,

analizę, jak również sterowanie mostkiem pomiarowym (np. jego zerowanie itp.), możliwe jest również bieżące monitorowanie i nadzorowanie procesu pomiarowego.

Ogólny schemat stanowiska do pomiaru odkształceń szczątkowych przedstawiono na rys. 5.7.



Rys. 5.7. Schemat stanowiska do pomiaru odkształceń szczątkowych

5. 2. Badania naprężeń szczątkowych w przekrojach wałów

5.2.1. Przyczyny wypaczenia wałów

Wśród podstawowych przyczyn niskiej jakości wytwarzania części typu „wał” w procesie ich obróbki paczenie okazuje się dominujące w wielu przypadkach. Świadczą o tym liczne przypadki utraty dokładności względnego położenia powierzchni, ujawniające się w czasie montażu, pomimo że po obróbce wykańczającej dokładność odpowiadała wymaganiom.

W pracy [68] ugięcie szczątkowe powstające w czasie toczenia wałów o małej sztywności przedstawiono w postaci sumy wektorowej:

$$\bar{y} = K_y \cdot \bar{y}_o + \bar{y}_\sigma + \bar{y}_{sp}, \tag{5.1}$$

gdzie: K_y - współczynnik zmniejszenia błędu początkowego półfabrykatu,

$\bar{y}_o$ - ugięcie szczątkowe początkowe,

$\bar{y}_\sigma$ - ugięcie szczałkowe powstające w wyniku przekształcenia stanu naprężeń w półfabrykacie po usunięciu nierównomiernego naddatku,

$\bar{y}_{sp}$ - ugięcie szczałkowe części uwarunkowane odkształceniem sprężysto-plastycznym wału w wyniku działania sił skrawania.

W czasie obliczeń momentów zginających uwarunkowanych naruszeniem równowagi sił wewnętrznych przy zdejmowaniu nierównomiernego naddatku i następnie określenia y_σ w odniesieniu do wałów o małej sztywności, uwzględniana jest zmiana wielkości mimośrodów wzdłuż półfabrykatu z powodu odkształceń sprężystych układu technologicznego pod działaniem sił skrawania.

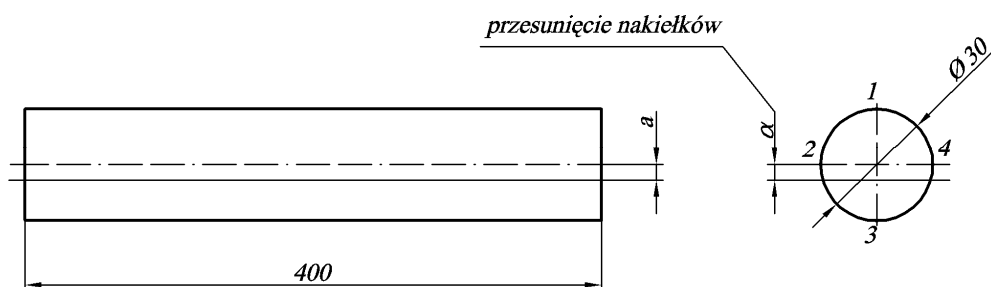
Jak zauważa autor [68], otrzymana zależność (1.16) wymaga uciążliwych obliczeń (proporcjonalnych do liczby wzdłużnych posuwów), a więc w praktyce inżynierskiej jest mało przydatna do wykorzystania, chociaż jest najwłaściwsza w przypadku wałów o małej sztywności.

Ograniczoność zastosowania zależności (1.16) uwarunkowana jest również tym, że w czasie obróbki półfabrykatów o prostej osi, w przypadku których z powodu nieprawidłowego przygotowania baz występuje bicie naddatku w przekroju poprzecznym, momenty zginające są praktycznie stałe na całej długości i równe:

$$\Delta M_{\sigma(i-1)} - \Delta M_{\sigma i} = 0, \quad (5.2)$$

Z zależności (1.16) wynika również to, że odkształcenie wałów z powodu odkształceń sprężystych półfabrykatu wywołanych siłami skrawania jest większe od odkształcenia spowodowanego nierównomiernym naddatkiem.

Wyprowadzając zależność (1.16) założono, że półfabrykat i część są idealnie okrągłe. W rzeczywistości w czasie obróbki wygiętych półfabrykatów o małej sztywności kształt przekroju poprzecznego części obrobionej ma odchylenie od okrągłości odpowiadające mimośrodowości. W rzeczywistości w czasie toczenia skrzywionego półfabrykatu (rys. 5.8) różnica w głębokości skrawania a_{p1} i a_{p3} w środku półfabrykatu jest równa wielkości mimośrodu $\varepsilon_{\max}$ [45].



Rys. 5.8. Schemat półfabrykatu do obliczeń oczekiwanego wypaczenia

Wielkość odkształceń sprężystych wału w czasie toczenia w kłach określona jest jako:

$$y = \frac{F_p L^3}{48 EJ} . \quad (5.3)$$

Zakładając, że jedynym zmiennym czynnikiem wpływającym na siłę F_p jest głębokość skrawania a_p , określono odchylenie przekroju poprzecznego od okrągłości obrobionego półfabrykatu.

Obliczeniowe ugięcie w punktach 2 i 4 :

$$y_{2,4} = \frac{F_p(a_p) \cdot L^3}{48 EJ} ,$$

w punkcie 1:

$$y_1 = \frac{F_p(a_p + \varepsilon_{\max}) \cdot L^3}{48 EJ} , \quad (5.4)$$

w punkcie 3:

$$y_3 = \frac{F_p(a_p - \varepsilon_{\max}) \cdot L^3}{48 EJ} .$$

Wykluczając wielkości stałe otrzymano przyrosty w punktach:

$$y_1 = \varepsilon_{\max} , \quad y_2 = 0 , \quad y_3 = -\varepsilon_{\max} , \quad y_4 = 0 . \quad (5.5)$$

Wyniki pomiarów kształtu przekroju poprzecznego obrobionych próbek przedstawiono w tab. 5.4 (stal C45).

W trakcie obróbki wałów o małej sztywności ma miejsce nie tylko wypaczenie osi, ale również zniekształcenie przekroju poprzecznego, przy czym ostateczna całkowita niedokładność często przewyższa odkształcenie szczytkowe w przekroju wzdłużnym.

Tab. 5.4. Wyniki pomiarów kształtu przekroju poprzecznego próbek

Nr próbki	Średnica półfabrykatu [mm]	Długość półfabrykatu [mm]	Wielkość odkształcenia [mm]	Nominalny naddatek w punktach 2 i 4 [mm]
1.	2.	3.	4.	5.
1.	30	400	0,8	3
2.	30	400	0,9	3
3.	30	400	1,2	3
4.	30	400	0,6	3
5.	30	400	0,8	3
6.	30	400	0,7	3

Przy obróbce wałów sztywnych odkształcenia sprężyste półfabrykatu wywołane siłami skrawania są niewielkie. Możemy przyjąć, że przyrost momentów sił wewnętrznych w czasie usuwania nierównomiernego naddatku jak również mimośrodowość jest stała wzdłuż półfabrykatu, a promień krzywizny równy nieskończoności.

5.2.2. Badania wpływu bicia nierównomiernego naddatku na wypaczenie wałów

W celu oceny wpływu bicia naddatku na odkształcenie wałów przeprowadzono badania eksperymentalne, przy czym próbki zostały tak wykonane, aby wykluczyć wpływ sił skrawania na odkształcenie części. Badania przeprowadzono w warunkach produkcyjnych na próbkach wykonanych ze stali C45.

Przed przeprowadzeniem badań próbki poddane zostały normalizacji wg parametrów: temperatura nagrzania do 1023 K z prędkością 50 stopni/godz; utrzymanie w tej temperaturze przez 2 godziny; ochłodzenie w powietrzu. Próbki zostały podzielone na cztery grupy po 4 sztuki w każdej z różnymi przesunięciami nakiełków w odniesieniu do osi wału: pierwsza podgrupa próbek wyśrodkowana została centralnie, druga - z przesunięciem o 1 mm, trzecia - 2 mm, czwarta - 3 mm. Przesunięcia nakiełków dokonano wg schematu przedstawionego na rys. 5.8. Po nakiełkowaniu próbki były obrabiane na tokarce 16K20 z prędkością skrawania $v_c=40,2$ m/min, posuwem $f=0,15$ mm/obr i z zastosowaniem chłodzenia emulsją. Naddatek usuwano w jednym przejściu, przy czym głębokość skrawania dobierano w zależności od wielkości przesunięcia nakiełków: pierwsza podgrupa - $a_p=3mm$, druga - $a_p=4mm$, trzecia - $a_p=5mm$, czwarta - $a_p=6mm$.

Następnie dokonywano pomiarów kształtu (ugięcia) mikrometrem o dokładności 0,001mm w siedmiu przekrojach (rys. 5.10).



Rys. 5.9. Pomiar kształtu próbek



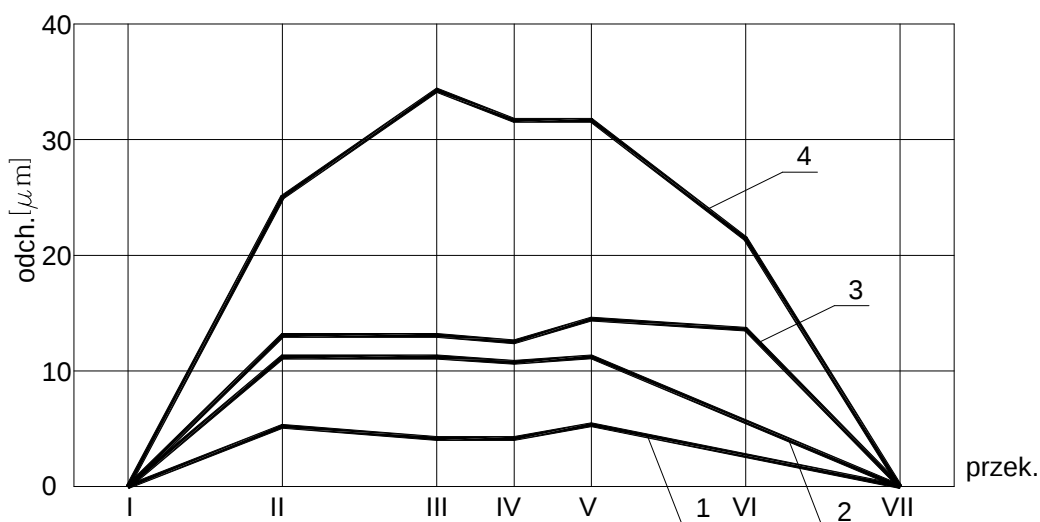
Rys.5.10. Przekroje półfabrykatu, w których dokonano pomiarów

Odkształcenia każdej próbki y rozkładały się tak jak różnica sumarycznej niedokładności kształtu Σn i odchylenia przekroju wzdłużnego:

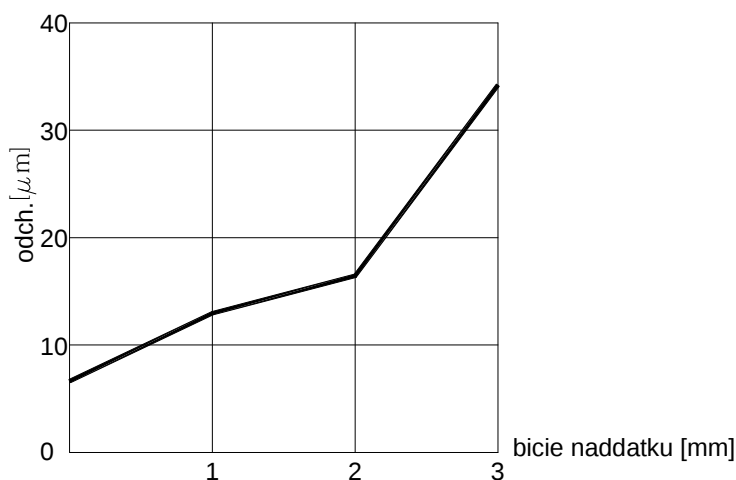
$$y = \Sigma n - \frac{a}{2}. \quad (5.6)$$

Faktyczne odkształcenia osi próbek w siedmiu przekrojach przedstawiono na rys. 5.11, gdzie umownym oznaczeniom: 1, 2, 3, 4 odpowiadają przesunięcia nakiełków odpowiednio 0, 1, 2, 3 mm.

Z rys. 5.12 wynika, że wielkość odkształcenia jest proporcjonalna do przesunięcia nakiełków.



Rys. 5.11. Odształcenie osi próbek w zależności od przesunięcia nakiełków



Rys. 5.12. Zależność odkształcenia próbek od wielkości bicia naddatku na obróbkę

5.2.3. Badania eksperymentalne naprężeń szczątkowych w przekrojach wałów

W celu określenia charakteru rozkładu naprężeń szczątkowych w przekroju wału przeprowadzono badania na próbkach stali C45 (walcowanie) o średnicy 100 mm i długości 600 mm. Przed badaniami eksperymentalnymi wały (5 szt.) były normalizowane z zachowaniem przedstawionego reżimu. Do określenia naprężeń zastosowano metodę Sachsa polegającą na jednostronnym warstwowym roztaczaniu, a następnie pomiary odkształceń osiowych i stycznych.

Przed obróbką otworu przeprowadzano nakiełkowanie próbek nawiertakiem wykonanym z materiału HS6-5-2 (SW7M), z prędkością 49,8 m/min, z posuwem ręcznym. W celu zapobieżenia wyboczeniu wiertła na wstępie nawiercano otwory na głębokość 60 mm wiertłem o średnicy 6,7 mm, a następnie wiertłem specjalnym o średnicy 6,5 mm na całą długość. Obróbkę otworów przeprowadzano w kilku etapach, naddatek zdejmowano warstwowo. Narzędzie skrawające – wiertła specjalne z ostrzem skrawającym wykonanym z materiału HS6-5-2 (SW7M) o średnicy 6,5; 12; 17,5; 24; 30; 36; 42; 48 mm. Następnie obróbkę przeprowadzano na obrabiarce 2620BF na następujące średnice: 54; 58; 64; 70; 76; 83, 88, 90 mm, przy czym grubość ścianki po ostatnim przejściu wynosiła 5 mm. Parametry obróbki były następujące: $v_c = 34,8...49,8$ m/min, $f = 0,08...0,14$ mm/obr.

Użyte przyrządy pomiarowe, schemat podłączenia i naklejenia tensometrów przedstawiono na rys. 5.3 – 5.7. Obliczenia naprężeń osiowych i stycznych przeprowadzano wykorzystując zależności (1.6):

$$\sigma_L = \frac{E}{1-\nu^2} \left[(A_0 - A) \frac{\Delta\lambda}{\Delta A} - \lambda \right], \quad (5.7)$$

$$\sigma_T = \frac{E}{1-\nu^2} \left[(A_0 - A) \frac{\Delta\theta}{\Delta A} - \frac{A_0 - A}{2A} \theta \right],$$

$$\Delta\lambda = \Delta\varepsilon + \nu \cdot \Delta\delta, \quad (5.8)$$

$$\Delta A = dA = 2\pi \cdot r \cdot \Delta r,$$

$$\Delta\theta = \Delta\delta + \nu \cdot \Delta\varepsilon$$

gdzie: $A_0 - A = \pi \cdot (r_0^2 - r^2)$, r_0 - średnica zewnętrzna tulei;

$$\theta = \delta + \nu\varepsilon, \quad \lambda = \varepsilon + \nu\delta;$$

r - średnica wewnętrzna tulei;

$\Delta\delta$ - różnica pomiędzy wyjściowym i bieżącym wskazaniem czujnika tensometrycznego;

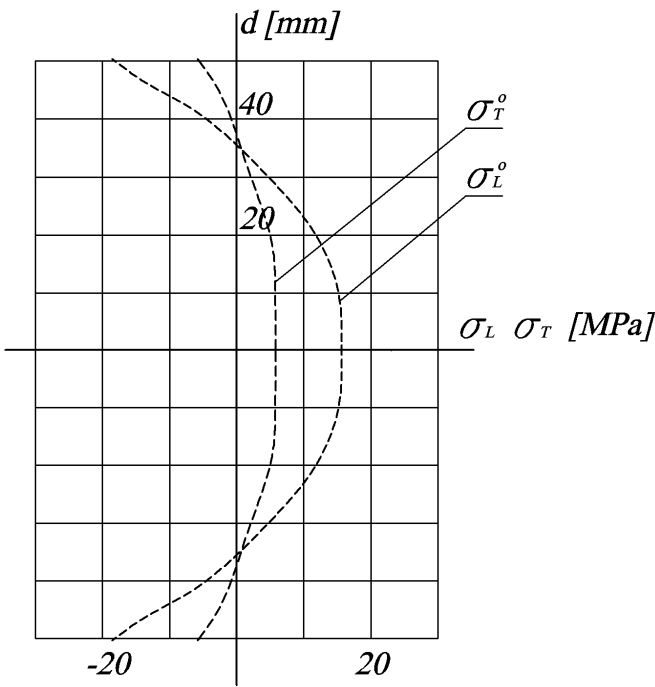
$\Delta\varepsilon$ - różnica pomiędzy bieżącym i poprzednim wskazaniem czujnika tensometrycznego;

Δr - grubość usuwanej warstwy.

Wykonano obróbkę danych eksperymentalnych, wartości naprężeń szczątkowych przedstawiono w tab. 5.5, a na rys. 5.13b ich rozkład w przekroju poprzecznym próbek.

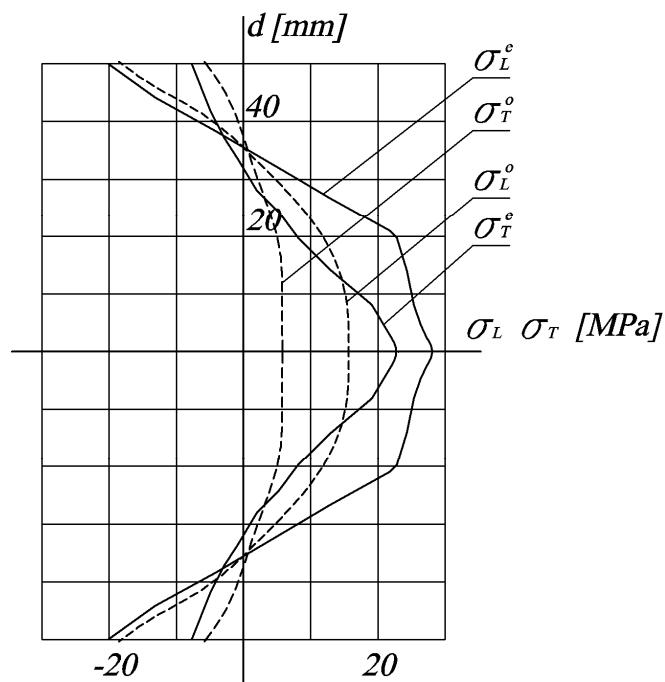
Tab.5.5. Wartości naprężeń szczątkowych w przekrojach próbek

Średnica roztaczania [mm]	Naprężenia osiowe [MPa]	Naprężenia styczne [MPa]
6,5	+25,10	+23,46
12,0	24,14	22,12
17,5	23,00	17,29
30,0	22,10	12,80
42,0	21,30	5,74
48,0	20,90	2,68
58,0	11,0	-3,24
70,0	1,59	-4,47
83,0	-11,76	-6,46
90,0	-18,20	-8,60



Rys. 5.13 a. Rozkład naprężeń szczątkowych w przekroju próbek wynikający z obliczeń analitycznych, gdzie: σ_L^o, σ_T^o - obliczone naprężenia szczątkowe osiowe i styczne [22]

Do przedstawionych na rys. 5.13 a krzywych obliczeniowych dodano krzywe uzyskane drogą eksperymentu, które przedstawione są na rys. 5.13 b. Jak wynika z wykresów, zarówno naprężenia szczątkowe osiowe, jak i styczne, podlegają rozkładowi wg krzywej parabolicznej.



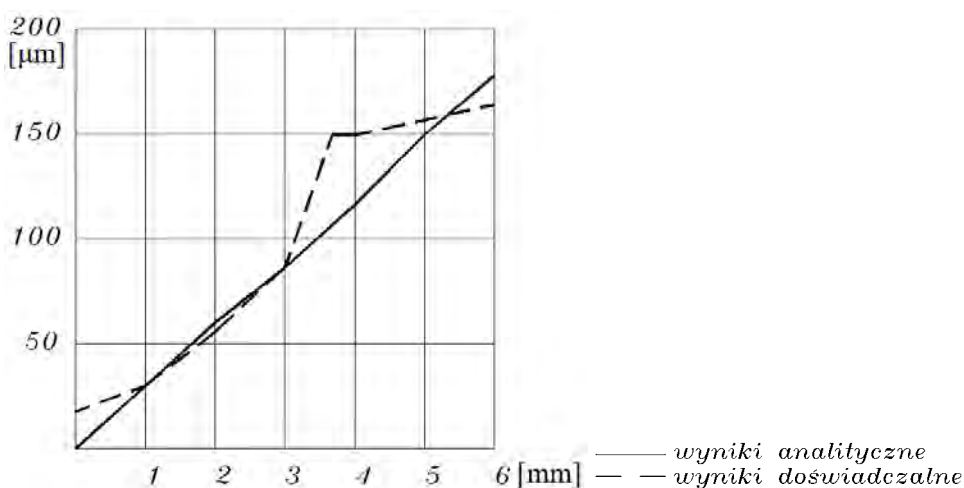
Rys. 5.13 b. Rozkład naprężeń szczątkowych w przekroju próbek, gdzie: σ_L^e, σ_T^e - eksperymentalne naprężenia szczątkowe osiowe i styczne, σ_L^o, σ_T^o - odpowiednio naprężenia szczątkowe osiowe i styczne uzyskane drogą obliczeń analitycznych

5.2.4. Eksperymentalne sprawdzenie otrzymanej zależności

W celu eksperymentalnego sprawdzenia zależności (4.16) wykonano próbki, które w odróżnieniu od przeprowadzonych wcześniej badań miały duże przemieszczenie nakiełków (0, 2, 4, 6 mm). Próbki: wały – średnica półfabrykatu 100 mm, średnica części 94 mm $L=600$ mm. Łącznie wykonano 16 próbek, po 4 sztuki w każdej grupie.

Analityczne wartości odkształceń zostały obliczone według wzoru (4.16). Wielkości odkształceń określonych drogą doświadczeń i obliczeń przy różnych położeniach nakiełków przedstawiono na rys. 5.14. Z analizy przedstawionych wykresów wynika, że obliczone wartości odkształceń odpowiadają doświadczalnym. Błąd obliczeń w porównaniu z wynikami doświadczalnymi wynosi 9%.

Badania eksperymentalne potwierdziły zależność (4.16) określającą oczekiwane wypaczenie stosunkowo sztywnych wałów przy przesunięciu w półfabrykatach nakiełków.



Rys. 5.14. Zależność wypaczenia wałów od wielkości bicia nadatku

W czasie obróbki sztywnych półfabrykatów ze skrzywioną osią powstają błędy kształtu w przekroju poprzecznym, których wielkość jest większa od mimośrod.

5.3. Badania bicia promieniowego w podstawowych operacjach wytwarzania opravek

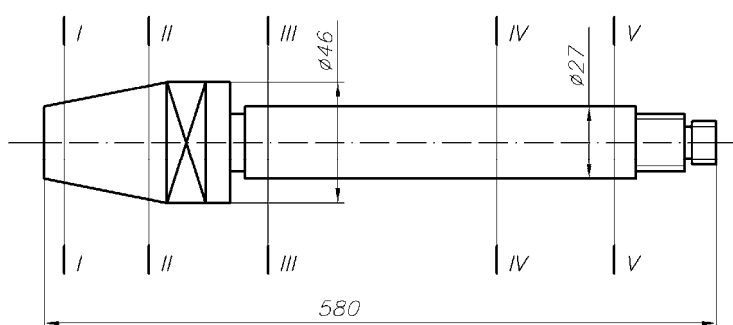
Jako przedmiot badań przyjęto precyzyjny wyrób – oprawkę o podwyższonej niezawodności technologicznej, stosowaną do mocowania narzędzi na obrabiarkach wielooperacyjnych. Wymagania stawiane oprawkom, względem osi kłów: bicie zewnętrznej powierzchni oprawki – 0,015 mm; bicie bazowej powierzchni czołowej – 0,005 mm; bicie stożka – 0,006 mm; odchylenie od prostopadłości – 0,075 mm; odchylenie od okrągłości – 0,006 mm; odchylenie od prostoliniowości – 0,004 mm. Do wykonania opravek zastosowano stal 15NiCr3. Istniejące procesy technologiczne obróbki opravek przewidują [44, 48, 49]:

- izotermiczne wyżarzanie;
- planowanie czoła odkuwek z następnym nakiełkowaniem, przy czym nakiełki wykonywane są po znakowaniu na roztaczarkach poziomych;
- obróbka tokarska zgrubna wykonywana w uchwycie z podparciem kłem;
- obróbka cieplna – wysokie odpuszczanie z późniejszym prostowaniem, wykonanie nakiełków na tokarce z zastosowaniem podtrzymki;
- obróbka tokarska kształtująca i frezerska z nadatkiem na obróbkę cieplną;
- nawęglanie na głębokość 1,2 – 1,5 mm z późniejszym prostowaniem;
- powtórne poprawienie nakiełków i obróbka powierzchni nie wymagających hartowania;
- obróbka cieplna – hartowanie z następnym odpuszczaniem do twardości HRC 59 – 63, prostowanie opravek;

- poprawa nakiełków na tokarce;
- operacje szlifowania powierzchni obrotowych z pośrednimi operacjami starzenia termicznego, po każdym starzeniu są docierane nakiełki.

Pomimo 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.

Ponieważ głównym czynnikiem określającym dokładność położenia jest odchylenie powierzchni względem osi, podstawowe badania polegały na pomiarze odchylenia zewnętrznej powierzchni 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 części w kłach tokarki, za pomocą mikrometrów z dokładnością do 0,001 mm. Pomiary wykonywano również na płycie pomiarowej klasy 2. Przekroje, w których dokonywano pomiary przedstawiono na rys. 5.15.



Rys. 5.15. Przekroje, w których wykonano pomiary odchyłek oprawek

Każdą oprawkę analizowano oddzielnie i do każdej sporządzano tabelę błędów. Odchyłki od prostoliniowości powierzchni zewnętrznych po obróbce rowka wpustowego zapisywano w tabelach. Położenie dna rowka wpustowego określano za pomocą głębokościomierzy. Pomiary 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. Zapisywano specyficzne cechy każdej oprawki (np. skręcone włókna półfabrykatu po kuciu).

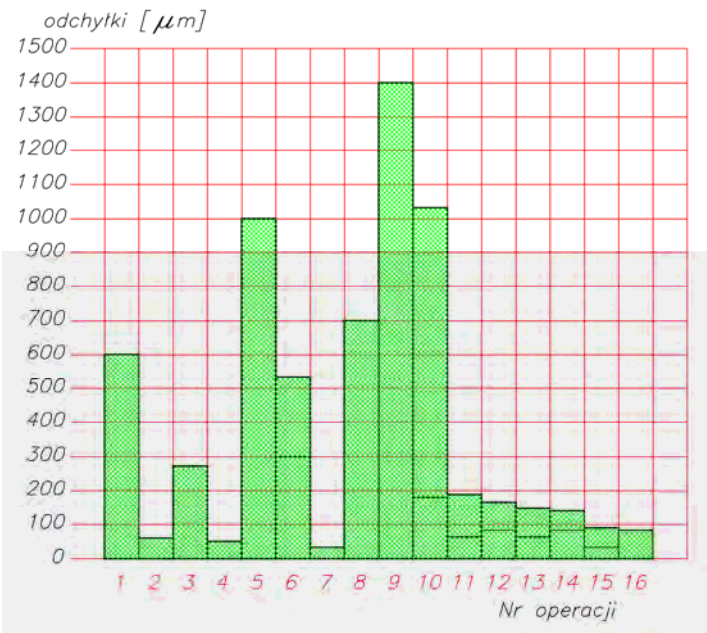
Po każdej operacji określano maksymalne odkształcenie każdej oprawki. Najczęściej występowało ono w przekroju IV-IV. Wyniki pomiarów wykazały, że odchyłki wymiarów serii oprawek w poszczególnych operacjach są niestabilne. Skalę bicia promieniowego w podstawowych operacjach przedstawiono w tab. 5.6.

Tab. 5.6. Bicie promieniowe opravek po operacjach

Nr operacji	Nazwa operacji	Zakres odchytek [mm]
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
11.	Szlifowanie powierzchni obrotowych	0,04 – 0,06
12.	Ciepna i I starzenie	0,1 – 0,15
13.	Szlifowanie powierzchni obrotowych	0,03 – 0,05
14.	Ciepna i II starzenie	0,06 – 0,015
15.	Szlifowanie powierzchni obrotowych	0,001 – 0,005
16.	Po dwóch dobach	0,04 – 0,15

Ogólny charakter rozkładu odchytek bicia promieniowego w podstawowych operacjach (nazwa i numer operacji zgodnie z tab. 5.6) pokazano na rys. 5.16.

Z analizy otrzymanych wyników badań wynika, że największy błąd ostatecznie obrobionych opravek występuje w częściach, które w czasie obróbki zgrubnej miały największe bicie naddatku.



Rys. 5.16. Ogólny charakter rozkładu odchytek bicia promieniowego

Można wyraźnie zauważyć kilka kolejnych etapów składających się z obróbki mechanicznej i cieplnej (3, 5, 9, 12, 14) oraz prostowania (6, 10). Z przedstawionych wyników wpływają

wnioski, że kolejność powstawiania błędów na wszystkich etapach jest jednakowa: zmniejszenie błędów po obróbce mechanicznej, zwiększenie po obróbce cieplnej, zmniejszenie po prostowaniu, zwiększenie po starzeniu.

Po obróbce cieplnej powstają duże odchyłki bicia promieniowego. Prostowanie stwarza możliwość poprawienia błędów, ponieważ następująca po prostowaniu obróbka ubytkowa zwiększa bicie oprawek.

Przeanalizowany zostanie mechanizm powstawania bicia promieniowego na podstawowych etapach wytwarzania oprawek.

5.3.1. Planowanie czół i nakiełkowanie

Proces technologiczny obróbki części typu wał zaczyna się od planowania czół a następnie nakiełkowania półfabrykatu. W zależności od typu produkcji ta operacja jest realizowana na frezarko-nakiełczarkach, poziomych roztaczarkach lub na tokarkach.

Jak wynika z badań eksperymentalnych, niepokrywanie się osi nakiełków z osią półfabrykatu w czasie obróbki na frezarko-nakiełczarkach, mieści się w przedziale 0,2 – 0,8 mm przy półfabrykatach walcowanych i 1,2 – 3 mm przy kutyh. Niedokładności nakiełkowania na roztaczarkach poziomych wynoszą: 1,2 - 2,0 mm w przypadku półfabrykatów walcowanych i 2,8 - 6,0 mm kutyh; na tokarkach odpowiednio 0,3 - 1,4 mm i 2,5 - 4,7 mm. Niedokładność nakiełkowania oprawek wynosi średnio 2,0-2,5 mm.

5.3.2. Odkształcenia w czasie obróbki we wrzecionie z podparciem kła konika

Na przykładzie oprawki obliczono niedokładność obróbki w czasie toczenia zgrubnego. Przyjęto następujące dane: $d = 27$ mm, $D = 46$ mm, $L = 580$ mm (rys. 5.15), $E = 2 \times 10^5$ MPa, sztywność konika $J_{ko} = 1500$ kN/m, sztywność suportu $J_{su} = 1000$ kN/m. Przyjęta głębokość skrawania $a_{pp} = 6$ mm.

W czasie toczenia niedokładność obróbki określana jest zgodnie z zależnością [63]:

$$\Delta = 2(a_{pp} - a_{pf}), \quad (5.9)$$

gdzie: a_{pp} - przyjęta głębokość skrawania w procesie technologicznym,

a_{pf} - faktyczna głębokość skrawania,

$$a_{pf} = \frac{1}{\frac{c \cdot k \cdot x^3}{3EJ} \left[1 - \frac{x(l_1^2 - 6l_1x + x^2)}{\frac{12EJ}{J_{ko}} + 4l_1^2} \right] + \frac{c \cdot k}{J_{su}} + 1}, \quad (5.10)$$

gdzie: k - współczynnik określony w tablicy [63],

x - bieżąca współrzędna wzdłużna obróbki.

Wówczas niedokładność obróbki można przedstawić w postaci:

$$\Delta = 2a_{pp} \left(1 - \frac{1}{\frac{c \cdot k \cdot x^3}{3EJ} \left[1 - \frac{x(9l_1^2 - 6l_1x + x^2)}{\frac{12EJ}{J_{ko}} + 4l_1^3} \right] + \frac{c \cdot k}{J_{su}} + 1} \right). \quad (5.11)$$

Podstawiając do zależności (5.11) wartości liczbowe parametrów i przyjmując $x = L/2$, otrzymano : $\Delta = 0,96 \text{ mm}$.

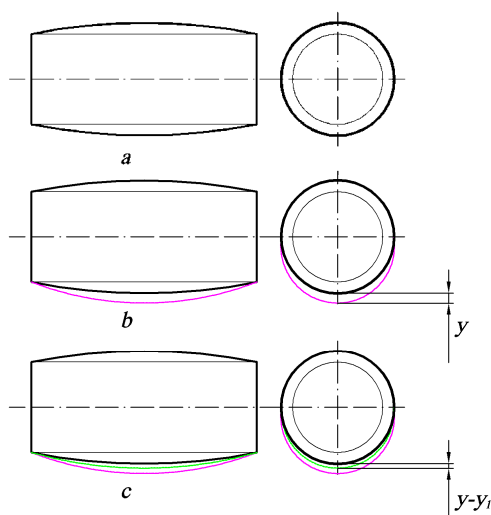
Oprócz tego w wyniku bicia naddatku powstaje dodatkowa niedokładność wału, która uwarunkowana jest dodatkową siłą działającą w miejscu największego bicia naddatku.

Dodatkowa niedokładność określona jest zależnością [63]:

$$y = \frac{F_p \cdot x^3}{3EJ} \left[1 - \frac{x(9l_1^2 - 6l_1x + x^2)}{\frac{12EJ}{J_{ko}} + 4l_1^3} \right], \quad (5.12)$$

Po wyliczeniu $y = 0,88 \text{ mm}$.

W wyniku bicia naddatku powstaje skrzywienie osi części w następstwie wypaczenia. Przyjmując wielkość bicia równą 2 mm określono skrzywienie osi obrabianej części wg zależności (4.16). Obrobiona część przyjmuje kolejno kształty pokazane na rys 5.17.



Rys. 5.17. Kolejne zmiany kształtu części

5.3.3. Badania niedokładności związanej z odkształceniem przy frezowaniu rowków wpustowych

Przeanalizowano niedokładności powstające w czasie frezowania rowków wpustowych. Ogólną niedokładność obróbki zawiera (podrozdział 4.2.3) [41]:

$$\Delta_{Ffr} = \Delta_b + \Delta_{moc} + \Delta_{obr} + \Delta_{odk}, \quad (5.13)$$

gdzie: Δ_b - niedokładność bazowania, Δ_{moc} - niedokładność mocowania,

Δ_{obr} - niedokładność związana z oddziaływaniem sił skrawania w czasie obróbki,

Δ_{odk} - niedokładność wywołana odkształceniami części w wyniku usunięcia naddatku.

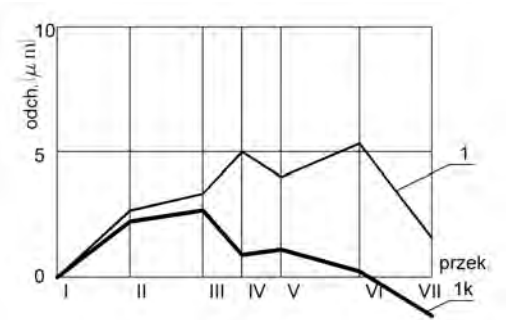
Przeprowadzono badania eksperymentalne w celu określenia udziału niedokładności związanej z wypaczeniem w czasie frezowania rowków wpustowych w ogólnej niedokładności obróbki (podrozdział 4.2.3). Badania prowadzono na frezarce pionowej (model 652FZ), zastosowano próbki ze stali C45 o wymiarach $d = 28mm$, $L = 300mm$ w ilości 16 sztuk. Przed przeprowadzeniem badań doświadczalnych próbki były normalizowane i podzielone na 4 grupy- według wielkości przesunięcia nakiełków w celu wykonania zewnętrznej obróbki tokarskiej, przy czym wielkości przesunięć przyjmowały wartości: 0, 1, 2 i 3 mm. Obróbkę przeprowadzono frezami palcowymi o średnicy 8 mm w jednym przejściu. Po obróbce rowka wpustowego dokonano pomiarów kształtu dna rowka

i odległości dna rowka od zewnętrznej powierzchni w siedmiu przekrojach wału. W tab. 5.7 przedstawiono wyniki pomiarów.

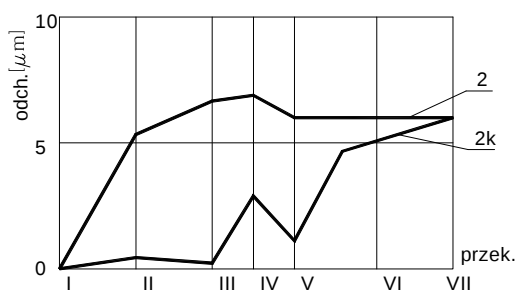
Tab. 5.7. Wyniki pomiarów niedokładności wykonania rowków wpustowych

Nr próbki	Przesunięcie nakiełków [mm]	Odchylenie dna rowka [μm]							Niedokładność położenia dna rowka w stosunku do powierzchni zewnętrznej[μm]							Sumaryczna niedokładność obróbki [μm]						
		0	+5	+2	-2	-7	-9	-6	0	+4	+3	+5	+7	-3	-5	0	+9	+5	+3	0	-12	-11
1.1	0	0	+5	+2	-2	-7	-9	-6	0	+4	+3	+5	+7	-3	-5	0	+9	+5	+3	0	-12	-11
1.2	0	0	+2	+2	+4	+2	-14	-20	0	-5	-6	-6	-21	-17	-21	0	-3	-4	-2	-19	-31	-41
1.3	0	0	+14	+20	+22	+26	+33	+35	0	+6	+12	+15	+19	+26	+30	0	+20	+32	+37	+45	+59	+65
1.4	0	0	+8	+17	+18	+18	+24	+20	0	+8	+15	+18	+20	+26	+25	0	+16	+32	+36	+38	+50	+45
2.1	1	0	+6	+13	+12	+14	+16	+20	0	+8	+9	+4	+2	-1	-17	0	+14	+21	+16	+16	+15	+3
2.2	1	0	+3	+1	+1	0	-1	-5	0	0	0	-1	-3	-2	-6	0	+3	+1	0	-3	-3	-11
2.3	1	0	-1	-3	+5	-5	+5	-8	0	+2	-2	0	0	-4	-11	0	+1	-5	+4	-5	+1	-19
2.4	1	0	+10	+9	+10	+11	+10	+3	0	+6	+6	-1	+6	+7	-5	0	+16	+15	+10	+17	+17	-2
3.1	2	0	+14	+10	+11	+11	-5	0	0	+6	+7	+6	+5	+3	0	0	+20	+17	+17	+16	-2	-16
3.2	2	0	+8	+4	+5	+4	-3	-15	0	+7	+1	-1	-6	-11	-16	0	+15	+5	+4	-2	-14	-31
3.3	2	0	-1	0	0	-4	-6	-2	0	+1	+2	0	-3	-9	-13	0	0	+2	0	-7	-15	-15
3.4	2	0	+8	+6	+4	+1	-5	-20	0	+4	0	-9	-10	-20	-28	0	+12	+6	-5	-9	-29	-48
4.1	3	0	0	-4	-8	-8	-21	-34	0	+6	+1	-5	+8	-18	-30	0	+6	-4	-13	0	-39	-64
4.2	3	0	+20	+45	+48	+48	+42	+22	0	+12	+36	+30	+30	+30	+18	0	+32	+81	+78	+78	+72	+40
4.3	3	0	+14	+8	+8	+4	-3	-8	0	+15	+12	+11	+2	-2	-7	0	+29	+20	+19	+6	-1	-15
4.4	3	0	+5	-6	-12	-14	-19	-20	0	+4	-9	-10	-19	-28	-46	0	+9	-15	-22	-33	-47	-66

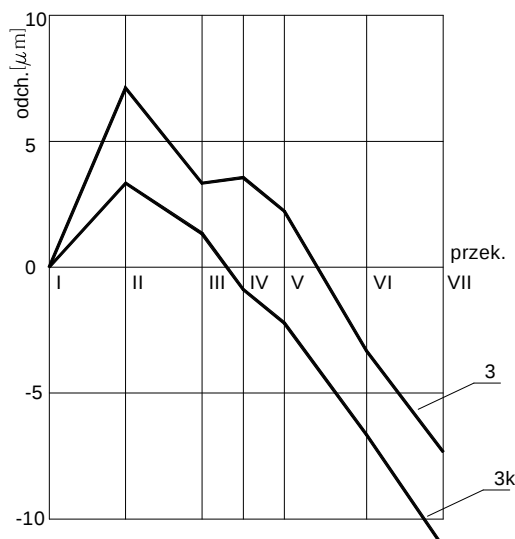
Według uśrednionych wartości wyników badań doświadczalnych odnaleziono zależności odchylenia dna rowka od powierzchni wałów po frezowaniu rowków wpustowych, które przedstawiono na rys. 5.18 - 5.21.



Rys.5.18. Odchylenia dna rowka od powierzchni wału po obróbce ubytkowej z przesunięciem nakiełków równym 0 (gdzie: 1 - niedokładność sumaryczna, 1k – niedokładność związana z wypaczeniem)

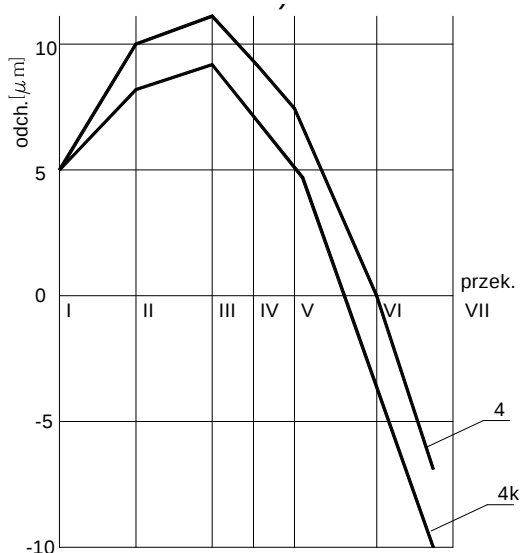


Rys.5.19. Odchylenia dna rowka od powierzchni wału po obróbce ubytkowej z przesunięciem nakiełków równym 1 (gdzie: 2 - niedokładność sumaryczna, 2k – niedokładność związana z wypaczeniem)



Rys.5.20. Odchylenia dna rowka od powierzchni wału po obróbce ubytkowej z przesunięciem nakiełków równym 2 (gdzie: 3 - niedokładność sumaryczna, 3k – niedokładność związana z wypaczeniem)

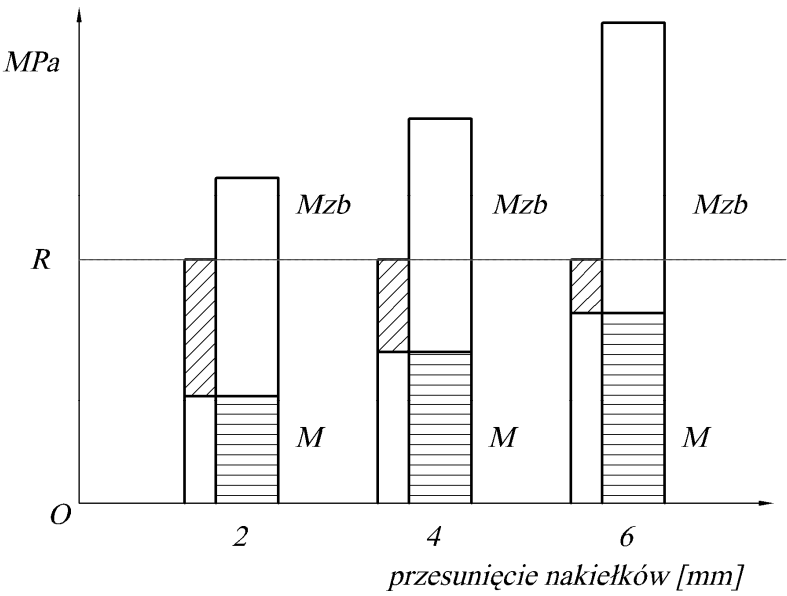
Analiza otrzymanych wyników wykazuje, że ze wzrostem przesunięcia nakiełków przed poprzedzającą operacją toczenia niedokładność rowka wpustowego, związana z odkształceniem spowodowanym naprężeniami szczątkowymi, wzrasta przy frezowaniu rowków na wypukłej powierzchni wału i maleje przy obróbce na przeciwległej stronie. Przy czym udział niedokładności, związanej z odkształceniem, stale rośnie i osiąga 20% przy przesunięciu nakiełków równym 3 mm.



Rys.5.21. Odchylenia dna rowka od powierzchni wału po obróbce ubytkowej z przesunięciem nakiełków równym 3 (gdzie: 4 - niedokładność sumaryczna, 4k – niedokładność związana z wypaczeniem)

Po obróbce tokarskiej z przesunięciem naddatku wielkość odkształceń szczątkowych sprężysto-plastycznych nie jest ekwiwalentna ogólnemu momentowi nie zrównoważonych sił wewnętrznych, powstających przy zdejmowaniu nierównomiernego naddatku, ponieważ

materiał posiada wytrzymałość relaksacyjną. Ogólny niezrównoważony moment M wywołuje odkształcenia sprężyste, zmniejszające pułap wytrzymałości relaksacyjnej R (rys. 5.22).



Rys. 5.22. Wpływ wytrzymałości relaksacyjnej na odkształcenie, gdzie R – wytrzymałość relaksacyjna, M – niezrównoważone momenty w czasie toczenia, M_{zb} – niezrównoważone momenty w czasie frezowania rowków wpustowych

W następnej obróbce, w tym przypadku, w czasie frezowania rowków wpustowych powstają nowe zbyteczne (niezrównoważone) naprężenia M_{zb} . Przy nałożeniu się tych naprężeń na utrzymującą się wytrzymałość relaksacyjną (rys. 5.22 kreskowanie ukośne) powstają odkształcenia: do granicy wytrzymałości relaksacyjnej – sprężyste, za granicą - sprężysto-plastyczne. W ten sposób, jak wynika z rys. 5.22, oczekiwana wielkość ogólnego odkształcenia będzie większa przy większym przesunięciu nakiełków lub zwiększeniu bicia naddatku.

5.3.4. Zalecenia dotyczące kompensacji niezrównoważonych naprężeń przy usuwaniu nierównomiernego naddatku

W czasie usuwania nierównomiernego naddatku powstają momenty niezrównoważonych wewnętrznych sił uwarunkowane zmiennymi wielkościami naprężeń ściskających w usuwanym naddatku. W półfabrykacie sztywno zamocowanym możliwa jest kompensacja zbędnych niezrównoważonych naprężeń, uwalniających się w czasie usuwania nierównomiernego naddatku.

Ta kompensacja może być zrealizowana drogą sztucznego wprowadzenia naprężeń o tej samej wielkości i tym samym znaku na powierzchnię części w miejscu usuwanego naddatku.

Ponieważ, jak podkreślono wcześniej, przy regularnym reżimie temperaturowym na powierzchni skupione są maksymalne naprężenia ściskające, kompensacja jest możliwa przez zastosowanie powierzchniowej obróbki utwardzającej.

Proponowane zalecenia technologiczne: przed obróbką określić powierzchnię z największym naddatkiem; następnie obróbkę przeprowadzić narzędziem składającym się z ostrza skrawającego i części dogniatającej, ustawionym w ten sposób, że jego oddziaływanie siłowe jest przyłożone do powierzchni w miejscu największego naddatku. Uderzenia powodują wytworzenie pola siłowego, siłę uderzeń określa się według zależności otrzymanych drogą eksperymentalną:

$$F = \frac{D \cdot \delta \cdot R_e}{m \cdot E \left(\frac{D}{b} + 1 \right)}, \quad (5.14)$$

gdzie: F - siła uderzenia, D - średnica obrabianej części, δ - maksymalny naddatek na obróbkę, R_e - granica plastyczności obrabianego materiału, m - współczynnik mechanizmu udarowego (w przypadku rolki – 0,25, bijaka płaskiego – 0,15), b - długość kontaktu mechanizmu udarowego z obrabianą częścią.

W przypadku występowania na powierzchni naprężeń rozciągających kompensacja może być realizowana metodami zapewniającymi wprowadzenie naprężeń równoważnych naprężeniom zbytecznym lub oddziaływaniem dogniataka od strony najmniejszego naddatku.

5.3.5. Metoda obróbki z obciążeniem półfabrykatu siłami osiowymi

Przeprowadzone badania wykazały, że dokładnością obróbki części typu wał można sterować na etapie projektowania technologii oraz na etapie obróbki drogą zastosowania pewnych specjalnych technologicznych rozwiązań i metod obróbki.

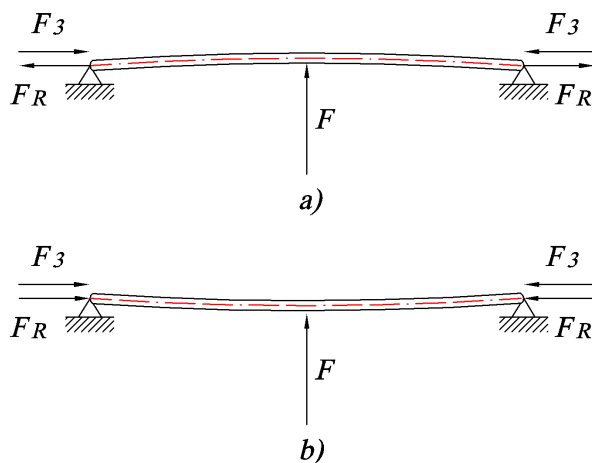
Zgodnie z danymi zawartymi w pracy [63], przy mocowaniu półfabrykatu wału w kłach z podparciem kła wrzeczona z określoną siłą F_3 , wielkość ugięcia można istotnie zmniejszyć:

$$y = \frac{F \cdot L^3}{48EJ} - \frac{F \cdot L^3}{64EJ \cdot \left(\frac{2EJ}{A \cdot L} + 1 \right)}, \quad (5.15)$$

gdzie: A – współczynnik zależny od sposobu obciążenia i określany eksperymentalnie.

W celach praktycznych zachodzi potrzeba określenia siły krytycznej, której przekroczenie spowoduje wzrost niedokładności obróbki. Przeanalizowano schemat obróbki wygiętego

półfabrykatu zamocowanego w kłach. W sytuacji przedstawionej na rys. 5.23 a siły reakcji wywołane siłami skrawania działają wzdłuż osi i są przeciwnego zwrotu w stosunku do sił przyłożonych w kłach. W sytuacji przedstawionej na rys. 5.23 b obie siły mają ten sam zwrot.



Rys. 5.23. Schemat sił działających przy osiowym obciążeniu półfabrykatu wału z wygiętą osią

W czasie ruchu obrotowego półfabrykatu ze skrzywioną osią lub ze zmienną wartością siły skrawania z powodu bicia nadatku zachodzi ciągle, cykliczne oddziaływanie siły wzdłuż osi półfabrykatu. W obu przypadkach przedstawionych na rys. 5.23 osiowe siły mocowania korzystnie wpływają na osiągnięcie wymaganej dokładności. W pierwszym położeniu, czyli kiedy usuwany jest najmniejszy naddatek, siła mocowania zmniejsza się do wielkości siły reakcji, co jest dopuszczalne przy najmniejszym sprężystym odkształceniu półfabrykatu. W drugim przypadku siła ściskająca odkształcenia sprężystego jest największa, więc w tej sytuacji jest również korzystna.

Siła krytyczna, to znaczy najmniejsza siła działająca wzdłuż osi powodująca utratę stateczności, jest określona wzorem Eulera:

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot EJ}{L^2}. \quad (5.16)$$

Siła reakcji zależy od siły skrawania i jest równa:

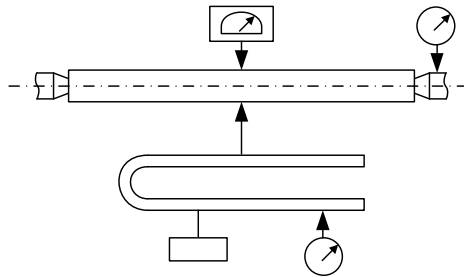
$$F_R = \frac{F \cdot C_{01} \cdot \theta}{2}, \quad (5.17)$$

gdzie: θ - kąt ugięcia skrzywionej osi półfabrykatu.

Rzeczywiste siły osiowe w czasie jednego obrotu zmieniają się w przedziale:

$$\left(\frac{\pi^2 \cdot EJ}{L^2} - \frac{F \cdot C_{01} \cdot \theta}{2} \right) \leq F_{\theta} \leq \left(\frac{\pi^2 \cdot EJ}{L^2} + \frac{F \cdot C_{01} \cdot \theta}{2} \right). \quad (5.18)$$

Badania eksperymentalne w celu sprawdzeniu zależności (5.18) przeprowadzono na obrabiarce model 16K20 Konik obrabiarki zawierał manometr wyskalowany w jednostkach osiowych sił mocowania. W imaku nożowym mocowano dynamometr sprężynowy DOSM-03-02 z zamocowaną kulistą końcówką. Półfabrykat (stal C45 o średnicy 20 mm i długości 350 mm) z przesunięciem nakiełków 1 mm (bicie powierzchni zewnętrznej względem osi – 2 mm) mocowano w kłach i obciążano dynamometrem po stronie, gdzie nie było przesunięć nakiełków. Jednocześnie czujnikiem mierzono wielkość odchylenia osi wału w czasie ruchu obrotowego. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 5.24.



Rys. 5.24. Schemat stanowiska badawczego

Każde badanie przeprowadzono dwa razy: z obciążeniem i bez obciążenia siłą osiową. Wyniki badań przedstawiono w tab. 5.8, gdzie F - obciążenie promieniowe, F_3 - obciążenie osiowe kła tylnego, $F_{\min}, F_{\max}$ - najmniejsza i największa reakcja kła, $y_{\min}, y_{\max}$ - maksymalna i minimalna wielkość odkształcenia przy działaniu obciążenia osiowego, $y'_{\min}, y'_{\max}$ - maksymalna i minimalna wartość ugięcia bez obciążenia osiowego.

Tab. 5.8. Wyniki badań eksperymentalnych przy obciążeniu półfabrykatu ze skrzywioną osią siłą osiową

Nr doświadczenia	F	F_3	$F_{\max}$	$F_{\min}$	$y_{\max}$	$y_{\min}$	$y'_{\max}$	$y'_{\min}$
	[N]				[mm]			
1.	200	1000	1600	650	0,105	0,078	0,125	0,012
2.	200	1000	1720	640	0,10	0,08	0,12	0,09
3.	200	2000	3100	1460	0,095	0,075	0,127	0,1
4.	200	2000	3000	1500	0,095	0,07	0,125	0,09
5.	300	2000	3400	1700	0,124	0,09	0,172	0,127
6.	300	2000	3200	1720	0,130	0,094	0,175	0,130
7.	300	3000	3700	1550	0,132	0,09	0,175	0,125
8.	400	3000	3200	2750	0,23	0,17	0,290	0,21
9	400	4000	4300	3750	0,25	0,19	0,295	0,22

Z analizy wyników badań eksperymentalnych wynika, że przy zwiększeniu obciążenia osiowego dokładność obróbki wzrastała o 15% - 28%. Różnica wskazań czujników w dwóch skrajnych wartościach bicia odpowiada obliczeniom.

W celu otrzymania wymaganej dokładności obróbki wałów celowe jest zwiększenie dokładności nakiełkowania, co prowadzi do zmniejszenia bicia naddatku i odpowiednio odkształcenia w procesie obróbki.

Obliczenia przeprowadzone zgodnie z zależnością (5.18) wykazały, że przy dopuszczalnych odchyleniach położenia powierzchni wałów do 0,2 mm niedokładność nakiełkowania powinna być nie większa od 0,25 mm, przy odchyleniach 0,2 – 0,8 mm nie większa od 0,25 – 0,8mm. Obliczenia były przeprowadzone w przypadku wałów o długości 1000 mm. Z dokładnością 15% - 20% możemy przyjąć, że błąd nakiełkowania może być o jeden rząd większy od dopuszczalnych odchyłek położenia powierzchni.

5.4. Badania wpływu parametrów szlifowania na naprężenia szczątkowe

Szlifowanie charakteryzuje się wydzielaniem dużej ilości ciepła w procesie obróbki. W wielu przypadkach temperatura chwilowa osiąga 1500K. Podczas obowiązkowego chłodzenia szlifowanej części nieuniknione są znaczne naprężenia szczątkowe [73, 108, 118].

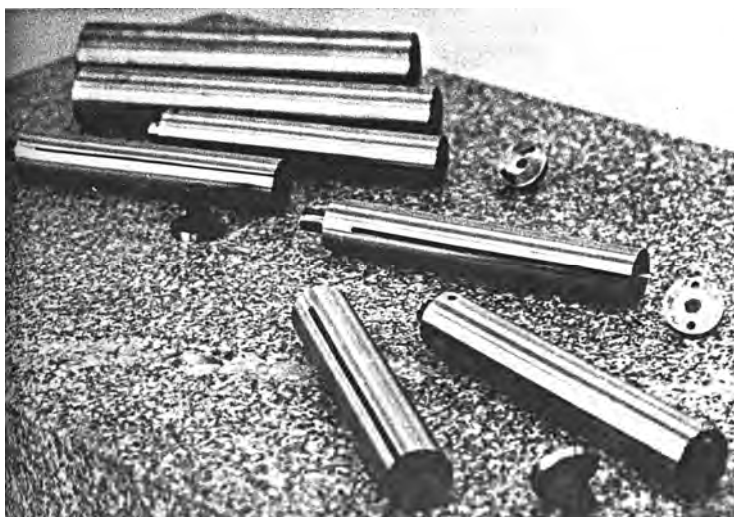
Podstawowe czynniki wpływające na wielkość naprężeń to parametry obróbki: posuw, prędkość, głębokość skrawania [42], a także materiał ściernicy. Uwzględniając, że w przypadku różnych rodzajów materiałów zalecane są określone rodzaje ściernic, można przyjąć, że ten czynnik jest stały.

5.4.1. Metodyka i oprzyrządowanie do badań eksperymentalnych

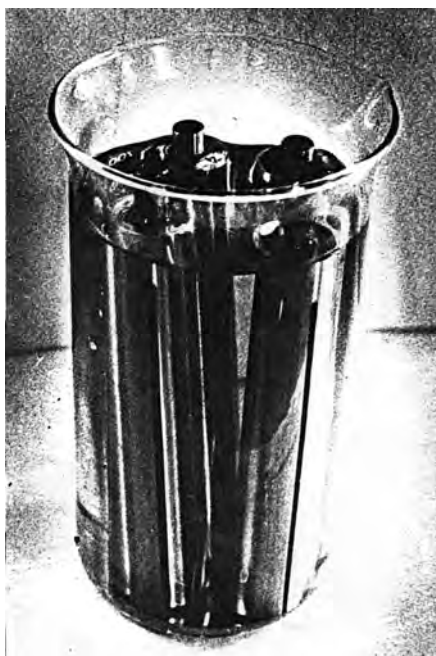
Badania eksperymentalne naprężeń szczątkowych przeprowadzono w przypadku operacji szlifowania próbek ze stali 15NiCr3 o średnicy 24 mm, długości 150 mm w ilości 24 szt. Obróbka była wykonywana na obrabiarce model 3M151B. Nakiełkowanie próbek przeprowadzono na obrabiarce współrzędnościowej model 2A450. Jako przyrządy obróbkowe podczas szlifowania walcowego zastosowano zabieraki specjalne. Próbki poddano nawęglaniu na głębokość 1,2...1,5 mm, a następnie hartowaniu do HRC 59 – 63 i wstępnemu szlifowaniu obwodowemu. Następnie próbki zostały rozcięte wzdłuż osi wałka na obrabiarce elektroiskrowej model LK-18 zgodnie z metodyką [83]. Szerokość rowka po rozcięciu wynosiła 2 mm, długość 125 mm. Proces skrawania był realizowany w oleju napędowym przy oszczędnych parametrach.

Po wykonaniu rowków wstawiano zabieraki specjalne (rys.5.25) i szlifowano powierzchnie przy parametrach przedstawionych w tab. 5.9.

Płaszczyzna rowka przed wytrawianiem została zabezpieczona za pomocą lakieru kwasoodpornego. Szlifowane próbki po zdjęciu zabieraków specjalnych były warstwowo wytrawiane w mieszaninie kwasów azotowego i solnego, dokładnie przemywane w roztworze zasadowym, następnie w wodzie. Czas wytrawiania każdej warstwy wynosił 10 min (rys. 5.26).



Rys. 5.25. Ogólny wygląd próbek z zabierakami specjalnymi

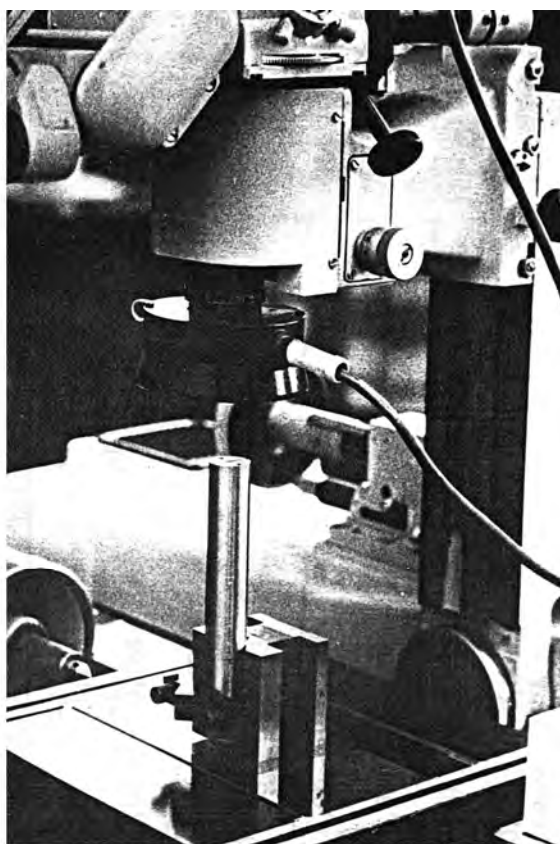


Rys. 5.26. Wytrawianie próbek

Tab. 5.9. Poziomy czynników i zakresy zmienności

Poziomy czynników	Oznaczenie	a_p [mm]	v_c [m/s]	f [mm/obr.]
		$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	$\tilde{x}_3$
Podstawowy	0	0,03	0,5	250
Zakres zmienności		0,02	0,333	100
Górny	+1	0,05	0,833	350
Dolny	-1	0,01	0,166	150

Po nacięciu rowków, a także po szlifowaniu i każdym cyklu wytrawiania, wykonywano pomiary odkształceń zginających na końcach próbki. Pomiary wykonywano w przyrządzie dwuosowym w świetle odbitym (rys.5.27).



Rys. 5.27. Pomiary w przyrządzie w świetle odbitym

5.4.2. Model matematyczny powstawania naprężeń szczątkowych w części

Do oceny wpływu parametrów szlifowania i opisu matematycznego procesu powstawania naprężeń szczątkowych w oprawkach zastosowano model pierwszego rzędu postaci:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (5.19)$$

Do oceny współczynników równania (5.19) zastosowano pełny eksperyment czynnikowy typu 2^3 . Podstawowe poziomy czynników wybrano bliskie do stosowanych w praktyce

parametrów obróbki danego materiału, a zakresy zmienności - wychodząc z rzeczywistych zakresów wahania wartości czynników (tab. 5.9).

Macierz planowania eksperymentu z obliczeniowymi kolumnami oddziaływania czynników przedstawiona jest w tab. 5.10.

Każdy eksperyment powtarzany był trzy razy. W tab. 5.11 przytoczono wyniki eksperymentów. Naprężenia szczątkowe obliczono według zależności:

$$\sigma(a)=0,33\frac{E}{L^2}\left[\frac{dy(a)}{da}(R-a)^2-6y(a)\cdot(R-a)\right]+1,55(1-3\frac{a}{R}\sigma_0). \tag{5.20}$$

Wykresy rozkładu naprężeń w przekroju przedstawiono na rys. 5.24. Porządek badań randomizowano za pomocą tablic liczb losowych. Wyniki randomizacji przedstawiono w tab. 5.12.

Średnią wartość parametru optymalizacji określono według zależności:

$$S_u^2=\frac{1}{r-1}\sum_{u=1}^r(y_{u_n}-\bar{y}_u)^2. \tag{5.21}$$

Na przykład, dla pierwszego eksperymentu jest równy:

$$y_1=\frac{-50,5+(-52,6)+(-47,83)}{3}=-50,31. \tag{5.22}$$

Dyspersję eksperymentów równoległych określono według zależności:

$$S_u^2=\frac{1}{r-1}\sum_{u=1}^r(y_{u_n}-\bar{y}_u)^2. \tag{5.23}$$

Tab. 5.10 Macierz planowania eksperymentu

Nr eksperymentu	x ₀	x ₁ a _p [mm]	x ₂ v _c [m/s]	x ₃ f [mm/obr.]	x ₁ x ₂ a _p v _c	x ₁ x ₃ a _p f	x ₂ x ₃ v _c f	x ₁ x ₂ x ₃ a _p v _c f
1.	+1	-1 0,01	-1 0,166	-1 150	+1	+1	+1	-1
2.	+1	+1 0,05	-1 0,166	-1 150	-1	-1	+1	+1
3.	+1	-1 0,01	+1 0,833	-1 150	-1	+1	-1	+1
4.	+1	+1 0,05	+1 0,833	-1 150	+1	-1	-1	-1
5.	+1	-1 0,01	-1 0,166	+1 350	+1	-1	-1	+1
6.	+1	+1 0,05	-1 0,166	+1 350	-1	+1	-1	-1
7.	+1	-1 0,01	+1 0,833	+1 350	-1	-1	+1	-1
8.	+1	+1 0,05	+1 0,833	+1 350	+1	+1	+1	+1

Na przykład, dla pierwszego eksperymentu:

$$S_1^2 = \frac{0,036 + 5,24 + 6,15}{2} = 5,713.$$

(5.24)

Tab. 5.11. Wyniki badań eksperymentalnych naprężeń szczątkowych po szlifowaniu

Nr próbki		df(a)/da				f(a)			
		warstwy				warstwy			
		1	2	3	4	1	2	3	4
1.	0,025	+0,015	-0,05	+0,01	+0,015	+0,015	+0,01	+0,02	+0,035
2.	0,04	-0,017	-0,072	+0,015	+0,022	-0,017	-0,089	-0,047	-0,052
3.	0,017	-0,02	-0,042	+0,007	-0,003	-0,02	-0,062	-0,055	-0,058
4.	0,072	-0,03	+0,04	+0,017	-0,007	-0,03	+0,01	+0,027	+0,02
5.	0,047	-0,029	+0,16	+0,015	+0,003	-0,029	+0,131	+0,146	+0,149
6.	0,025	-0,005	+0,067	-0,01	+0,022	-0,005	+0,062	+0,052	+0,074
7.	0,025	+0,015	+0,005	+0,003	+0,02	+0,015	+0,02	+0,023	+0,043
8.	0,02	-0,01	+0,015	+0,003	+0,01	-0,01	+0,005	+0,008	+0,018

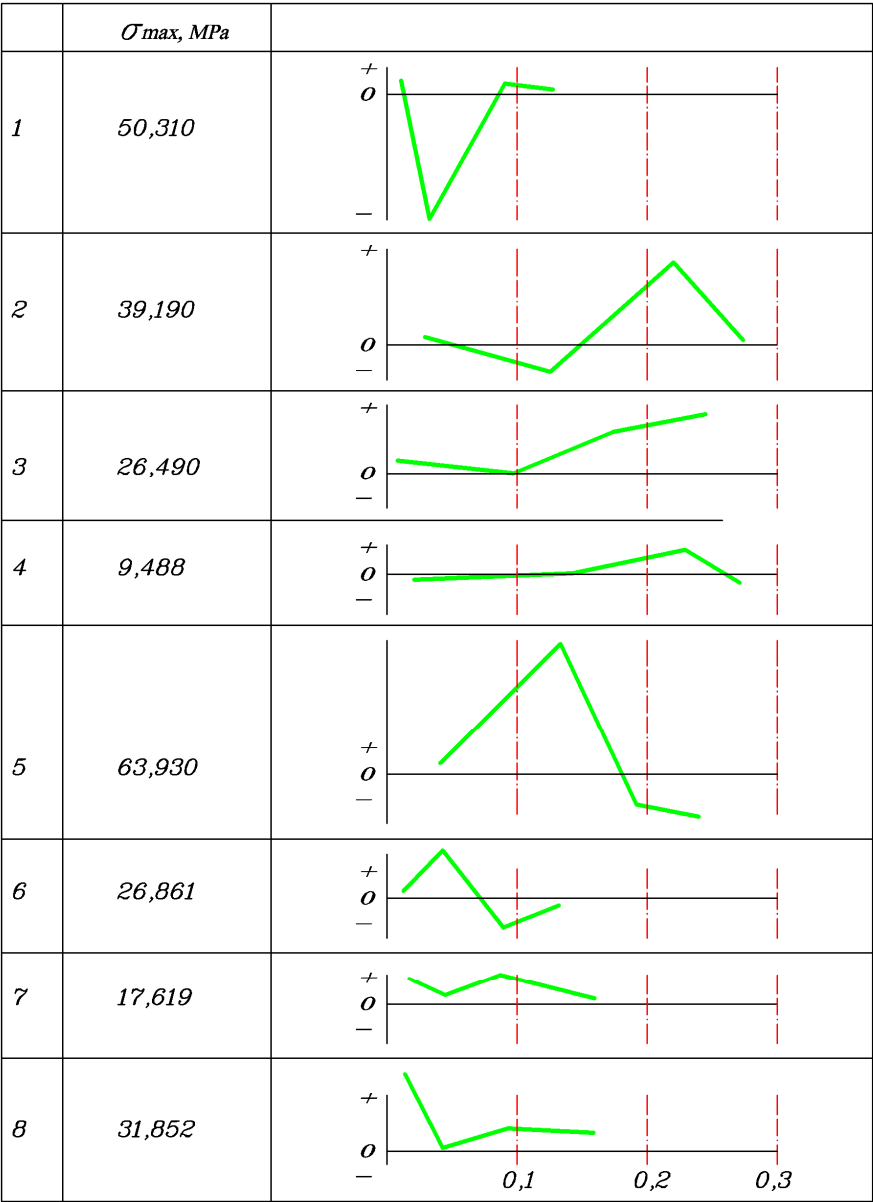
R-a				a				σ_z ,MPa			
warstwy				warstwy				warstwy			
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
11,4	11,375	11,352	11,32	0,025	0,048	0,08	0,115	+11,724	-50,31	+7,26	+5,52
11,82	11,78	11,69	11,62	0,04	0,132	0,202	0,255	+2,547	-8,71	+39,19	+4,37
11,82	11,803	11,72	11,64	0,017	0,1	0,178	0,235	+1,63	+1,19	+20,09	+26,49
11,86	11,79	11,7	11,63	0,072	0,165	0,227	0,268	-1,37	-0,841	+9,488	-2,992
11,83	11,78	11,7	11,64	0,047	0,122	0,195	0,252	+1,07	+63,96	-28,38	-36,31
11,38	11,35	11,32	11,3	0,025	0,055	0,082	0,12	+8,898	+26,861	-13,405	-2,124
11,4	11,375	11,355	11,32	0,025	0,045	0,08	0,12	+11,722	+4,528	+17,619	+5,945
11,39	11,37	11,33	11,30	0,02	0,055	0,085	0,123	+31,852	+1,221	+3,53	+7,747

Tab. 5.12. Randomizacja wyników eksperymentu

Nr doświadczenia	σ_z [MPa]				$y_{i1} - \bar{y}_u$	$y_{i2} - \bar{y}_u$	$y_{i3} - \bar{y}_u$	$(y_{i1} - \bar{y}_u)^2$	$(y_{i2} - \bar{y}_u)^2$	$(y_{i3} - \bar{y}_u)^2$	S_u^2
	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}	$\bar{y}_u$							
1.	-50,5	-52,6	-47,83	-50,31	-0,19	-2,29	+2,48	0,036	5,24	6,15	5,713
2.	+43,4	+40,2	33,97	+39,13	+4,21	+1,01	-5,22	17,72	1,02	27,25	22,99
3.	26,3	24,97	28,2	+26,49	-0,19	-1,52	+1,71	0,036	2,31	2,31	2,92
4.	9,064	10,3	9,1	+9,488	-0,424	+0,812	-0,388	0,179	0,66	0,15	0,494
5.	64,25	64,48	63,06	+63,96	+0,32	+0,55	-0,87	0,102	0,3	0,756	0,579
6.	26,32	29,453	24,81	+26,861	-0,541	+2,592	-2,051	0,293	6,71	4,2	5,60
7.	17,867	18,52	16,47	17,619	+0,248	+0,901	-1,149	0,06	0,812	1,32	1,096
8.	34,95	30,194	30,412	+31,852	+3,098	-1,658	-1,44	9,59	2,749	2,07	7,205
				165,12							46,31

W celu określenia możliwości przeprowadzenia analizy regresywnej określono jednorodności dyspersji eksperymentów równoległych według kryterium Cochra:

$$G = \frac{S_{u\max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2} = \frac{22,99}{46,31} = 0,496. \tag{5.25}$$



Rys. 5.24. Naprężenia szczątkowe po szlifowaniu oprawek

Obliczeniowe wartości porównano z tablicowymi przy stopniach swobody: licznika $f_1 = r - 1$, mianownika $f_2 = N$ i odpowiednio przy wybranym poziomie istotności:

$$G_{Tabl.} = 0,5157 > G_p = 0,496 \tag{5.26}$$

A więc hipoteza o jednorodności dyspersji eksperymentów równoległych może być przyjęta. Stąd dyspersja powtarzalności jest równa:

$$S^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2 = \frac{46,31}{8} = 5,789. \quad (5.27)$$

Błąd eksperymentu:

$$S(y) = \sqrt{S^2(y)} = \sqrt{5,789} = 2,406. \quad (5.28)$$

Następnie obliczono współczynniki równania (5.19). Na przykład współczynnik b_1 :

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{1u} y_u = 6,2. \quad (5.29)$$

Analogicznie obliczono pozostałe współczynniki. Po określeniu wszystkich współczynników równanie (5.19) przyjmuje postać:

$$\bar{y} = 20,64 + 6,2 x_1 + 0,722 x_2 + 14,425 x_3 - 6,9 x_1 x_2 - 11,916 x_1 x_3 - \\ + 11,052 x_2 x_3 + 19,725 x_1 x_2 x_3 \quad (5.30)$$

5.4.3. Sprawdzanie istotności współczynników modelu

Sprawdzanie statystycznej istotności współczynników wykonano za pomocą kryterium Studenta. Przede wszystkim znaleziono dyspersję współczynników regresji $S^2\{b_i\}$ [64]:

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{y\}}{nr} = \frac{5,789}{8 \cdot 3} = 0,2412, \quad (5.31)$$

z $y_{\Sigma} = n(r-1)$ stopniami swobody:

$$S\{b_i\} = \sqrt{0,2412} = 0,491. \quad (5.32)$$

Wartość t_i - kryterium określano według zależności [64]:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}}. \quad (5.33)$$

W przypadku naszego zadania uzyskano:

t_0	t_1	t_2	T_3	t_{12}	t_{13}	t_{23}	t_{123}
42,036	12,627	1,47	29,378	14,052	24,26	22,509	40,173

Krytyczną wartość t_{kp} określono według [17], przy $n(r-1)=16$ stopniach swobody i zadany poziom istotności 5%. W tym przypadku $t_{kp}=1,74$. Jeżeli $T_{oblicz.} > t_{kp}$, to hipoteza jest odrzucana i b_i uważa się za znaczące.

Po sprawdzeniu istotności współczynników i adekwatności modelu według kryterium Studenta i Fishera ustalono, że po szlifowaniu wielkość naprężeń szczątkowych zależy głównie od posuwu. Prędkość obrotowa części ma najmniejszy wpływ na naprężenia szczątkowe. Najodpowiedniejszymi parametrami szlifowania są parametry w przypadku czwartego eksperymentu:

$$a_p = 0,05 \text{ mm}, \quad v_c = 0,833 \text{ m/s}, \quad f = 150 \text{ mm/obr.}$$

W przeciwnym przypadku uważane są za statystycznie nieznaczące, to znaczy $b_i = 0$. W danym przypadku takim nieznaczącym współczynnikiem jest b_2 . Po wykluczeniu statystycznie nieznaczącego współczynnika równanie regresji przyjmuje postać [41]:

$$\bar{y} = 20,64 + 6,2x_1 + 14,425x_3 - 6,9x_1x_2 - 11,916x_1x_3 - 11,052x_2x_3 + 19,725x_1x_2x_3. \tag{5.34}$$

5.4.4. Sprawdzenie adekwatności modelu

Otrzymane równanie sprawdzono na adekwatność. W tab. 5.13 przedstawiono wyniki obliczeń dyspersji adekwatności.

Tab. 5.13. Wyniki obliczeń dyspersji adekwatności

Nr eksperymentu	$\bar{Y}_u$	$\hat{Y}_u$	$\bar{Y}_u - \hat{Y}_u$	$(\bar{Y}_u - \hat{Y}_u)^2$
1.	-50,31	-49,578	-0,732	0,536
2.	+39,19	+39,904	-0,714	0,509
3.	+26,49	25,776	+0,714	0,509
4.	+9,488	8,758	+0,73	0,533
5.	+63,93	64,658	-0,728	0,529
6.	+26,861	27,576	-0,715	0,511
7.	+17,619	16,9	+0,719	0,517
8.	+31,852	31,122	+0,73	0,533
				4,18

Hipotezę o adekwatności równania (5.34) sprawdzono według zależności:

$$S_{ad}^2 = \frac{r}{N - \lambda} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \tag{5.35}$$

gdzie λ - liczba znaczących współczynników równania, N - liczba eksperymentów niezależnych, r - liczba eksperymentów równoległych,

$$S_{ad}^2 = \frac{3}{8 - 7} \cdot 4,18 = 12,54. \tag{5.36}$$

Adekwatność równania oceniano za pomocą F - kryterium Fishera:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S^2(y)} = \frac{12,54}{5,789} = 2,166. \quad (5.37)$$

$F_{tab.}=3$ odpowiednio przy stopniach swobody $f_{ad} = 2, f_{0E} = 16$, i poziomie istotności 0,05. W związku z tym, że $F_{obl.} < F_{tab.}$, to jest $2,1666 < 3,0$, równanie (5.34) można uważać jako adekwatne.

Przyjmując:
$$x_1 = \frac{a_p - 0,003}{0,02} [\text{mm}], \quad x_2 = \frac{v_c - 500}{333} [\text{m/s}], \quad x_3 = \frac{f - 5,83}{1,67} [\text{mm/obr}] \quad (5.38)$$

i podstawiając do zależności (5.34) zamiast parametrów optymalizacji ich wartości z (5.38), otrzymano równanie naturalnych wartości czynników:

$$\sigma = -329,8 + 8060a_p + 55,82f - 11,33a_p v_c + 0,45v_c - 1241a_p f - 0,07v_c f + 1,77a_p v_c f \quad (5.39)$$

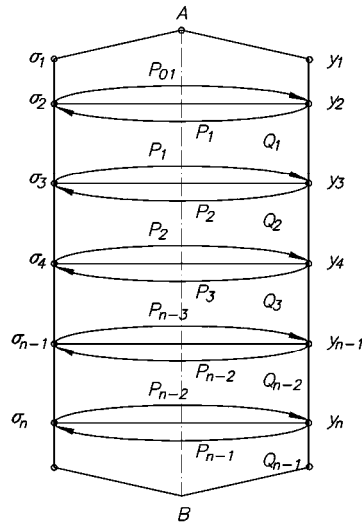
Na podstawie otrzymanych wyników i analizy równań regresji można wyciągnąć następujący wniosek: wielkość naprężeń szczątkowych powstających w trakcie szlifowania zależy głównie od posuwu. Prędkość obrotowa części okazuje najmniejszy wpływ na naprężenia szczątkowe.

5.5. Dziedziczność technologiczna przy obróbce wałów

Liczne badania wykazały istnienie dziedziczności technologicznej błędów w czasie wytwarzania części maszyn. Dziedziczność technologiczna szczególnie jest widoczna w czasie wytwarzania części precyzyjnych, jakimi są oprawki o podwyższonej niezawodności technologicznej [44].

Badania technologii obróbki części typu „wał” na przykładzie oprawek wskazują na złożony charakter ich wypaczania na wszystkich etapach procesu technologicznego. Dlatego charakter ponownego rozkładu naprężeń (przekształconego) oraz powstających z tego powodu odkształceń należy rozpatrywać z uwzględnieniem historii ich powstawania (kształtowania się) to znaczy dziedziczności technologicznej. Mechanizm wypaczania się części typu wał najbardziej poglądowo ilustruje się drogą modelowania prawa dziedziczenia z zastosowaniem teorii grafów [75, 79].

Zastosowanie ukierunkowanego grafu pozwala przedstawić kolejność obróbki wałów i charakter wzajemnego związku badanych parametrów na kluczowych etapach obróbki. Schemat stanu naprężeniowo - odkształceniowego wału na kluczowych etapach obróbki przedstawiono na rys. 5.29.



Rys. 5.29. Graf - schemat obróbki wału

Przekazanie właściwości w kierunku od σ_i do y_i oznaczono przez P , odwrotny związek przez Q . Właściwości początkowe półfabrykatu oznaczono przez A . Naprężenia i odkształcenia szczątkowe początkowe odpowiednio σ_0 i y_0 . Właściwości końcowe gotowej części przez B i odpowiednio naprężenia σ_n a odkształcenia y_n . Naprężenia szczątkowe na i -tym etapie określone są zależnością [118]:

$$\sigma_i = \sigma_0 - K\rho^2, \quad (5.40)$$

a odkształcenia zgodnie z wyrażeniem (4.16).

Po wykonaniu każdej operacji, w wyniku usunięcia nierównomiernego naddatku i rozkładu początkowych naprężeń szczątkowych, pojawiają się odkształcenia szczątkowe, odzwierciedlone na rysunku związkami $P_1, P_2, \dots, P_n$. W konsekwencji odkształcenia części prowadzą do zmiany naprężeń wypadkowych: pozostających po poprzednich operacjach i naprężeń pozostających w częściach po usunięciu naddatku w bieżącej operacji:

$$\sigma_{wyp} = \sigma_{i-1} \pm \sigma_i. \quad (5.41)$$

W przypadku odkształceń:

$$y_{wyp} = Ky_{i-1} \pm y_i, \quad (5.42)$$

gdzie: K - współczynnik zmniejszenia błędu. Ogólna funkcja grafu przedstawia

przekształcenie właściwości A w B , które opisane jest odwzorowaniem: $F : A \rightarrow B$.

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

$$\begin{aligned} y_2 &= C_1 y_1 \\ y_3 &= C_2 y_2 = C_1 C_2 y_1 \\ y_4 &= C_1 C_2 C_3 y_1 \end{aligned} \quad (5.43)$$

.....

$$y_i = C_1 C_2 C_3 \dots C_{i-1} y_1 ,$$

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

Przy operacji obróbki mechanicznej współczynniki dziedziczenia określone są drogą obliczeń.

Na przykład z uwzględnieniem wyrażenia (4.16) otrzymuje się [118]:

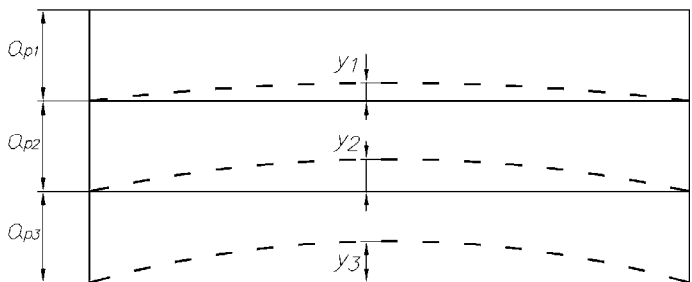
$$C_1 = \frac{y_2}{y_1} = \frac{\sigma_2 R_1^2}{\sigma_1 R_2^2}, \quad (5.44)$$

odpowiednio:

$$C_i = \frac{y_{i+1}}{y_i} = \frac{\sigma_{i+1} R_i^2}{\sigma_i R_{i+1}^2}. \quad (5.45)$$

Współczynniki dziedziczenia w wyrażeniach (5.48) precyzują błąd, powstały w poprzednich operacjach.

Należy zaznaczyć, że współczynniki te na różnych etapach procesu technologicznego mogą być większe lub mniejsze od jedności. Na przykład, przy wieloprzejściowej obróbce (operacje tokarskie lub szlifierskie) wałów o małej sztywności współczynnik dziedziczenia z reguły jest mniejszy od jedności. Schemat powstawania niedokładności w czasie obróbki wieloprzejściowej pokazano na rys. 5.30.



Rys. 5.30. Schemat narastania niedokładności obróbki w kolejnych przejściach

Po pierwszym przejściu z powodu odkształceń sprężystych półfabrykatu rzeczywisty naddatek jest mniejszy od zadanego o wielkość y_1 . W drugim przejściu wielkość odkształcenia sprężystego wzrasta. W wyniku usunięcia naddatku w drugim przejściu błąd kształtu y_2 przewyższa y_1 . W następnych przejściach następuje dalsze zwiększenie błędu początkowego.

W czasie obróbki względnie sztywnych części współczynnik zmniejszenia błędu początkowego po i-tym przejściu określany jest z zależności [118]:

$$K_i = \frac{(C_{Py} f^{n_p} HB^n)}{J_{UT}}, \tag{5.46}$$

gdzie: C_{Py} - stały współczynnik przy określonych warunkach obróbki, f - posuw w i-tym przejściu, n_p - wskaźnik potęgi przy posuwie, HB - twardość materiału półfabrykatu, J_{UT} - sztywność układu technologicznego.

W operacjach obróbki cieplnej współczynniki dziedziczenia wyznaczone są eksperymentalnie.

Rozwiązanie zadania opisanego wyrażeniem (5.43), 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 [118].

Jako przykład wpływu dziedziczności technologicznej przeanalizowano technologię wytwarzania oprawek. Z analizy otrzymanych wyników badań wynika, że największy błąd ostatecznie obrobionych oprawek występuje w częściach, które w czasie obróbki zgrubnej miały największy zakres zmian naddatku. Można to zademonstrować na dwóch przykładach:

Oprawka I miała bicie:

- po operacji tokarskiej zgrubnej 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

Oprawka II miała bicie:

- po operacji tokarskiej zgrubnej 0,400 mm

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

Przy próbie późniejszego prostowania jedna oprawka pękła w przekroju IV-IV. Jest to wynikiem różnicy wytrzymałości relaksacyjnej materiału oprawki. Wytrzymałość relaksacyjna charakteryzuje się możliwie maksymalnymi naprężeniami, niezdolnymi do wywołania w materiale odkształceń plastycznych. Przy obróbce półfabrykatów z minimalnym zakresem zmian naddatku, dodatkowe momenty zginające nie mogą wywołać znaczących 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 całkowitej równowagi naprężeń.

Wyniki badań eksperymentalnych wykazują, że połączenie operacji obróbki części o dużej dokładności z kilkoma pośrednimi obróbkami cieplnymi nie daje oczekiwanych efektów. Po pierwsze - ma miejsce dziedziczenie błędów, otrzymanych w poprzednich operacjach; po drugie - występuje wyraźna cykliczność w powstawaniu błędów, ograniczona operacjami: obróbki cieplnej, prostowania, poprawiania nakiełków i obróbki powierzchni zewnętrznych. Po obróbce cieplnej powstają duże odchyłki bicia promieniowego. Wybiórcza kontrola bicia oprawek dobie 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 drogą polepszenia jakości odkuwek, stosowanie nowoczesnych metod otrzymywania półfabrykatów: walcowanie poprzeczno-ukośne, matrycowanie.

Przy obróbce ubytkowej zaleca się optymalną kolejność operacji, która zawiera operacje na frezarko-nakiełczarkach, toczenie zgrubne wszystkich powierzchni, obróbkę cieplną (hartowanie z następnym odpuszczaniem), szlifowanie i obróbkę rowków wpustowych i ścięć (rys. 5.31). Przed obróbką rowków wpustowych należy przeprowadzić kontrolę dokładności kształtu powierzchni cylindrycznych i przy występowaniu odkształceń osi, obróbkę rowków należy przeprowadzić na wypukłej stronie powierzchni. Ma to związek z tym, iż w czasie usuwania naddatku kierunek odkształcenia jest taki, że obrobiona powierzchnia staje się wklęsłą.

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

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

Szlifowanie charakteryzuje się dużym wydzielaniem ciepła, które odprowadzane jest z płynem chłodzącym, co sprzyja powstawaniu dużych naprężeń szczątkowych. Celowe jest wstępne usunięcie naddatku z zahartowanej powierzchni za pomocą ostrego narzędzia wykonanego z najtwardszych materiałów. W czasie 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.

Tab. 5.14. Podstawowe operacje 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

W celu sprawdzenia podanych zaleceń opracowano nową technologię, listę operacji podstawowych, które przedstawiono w tab. 5.14 i wg której wyprodukowano doświadczalną partię oprawek.

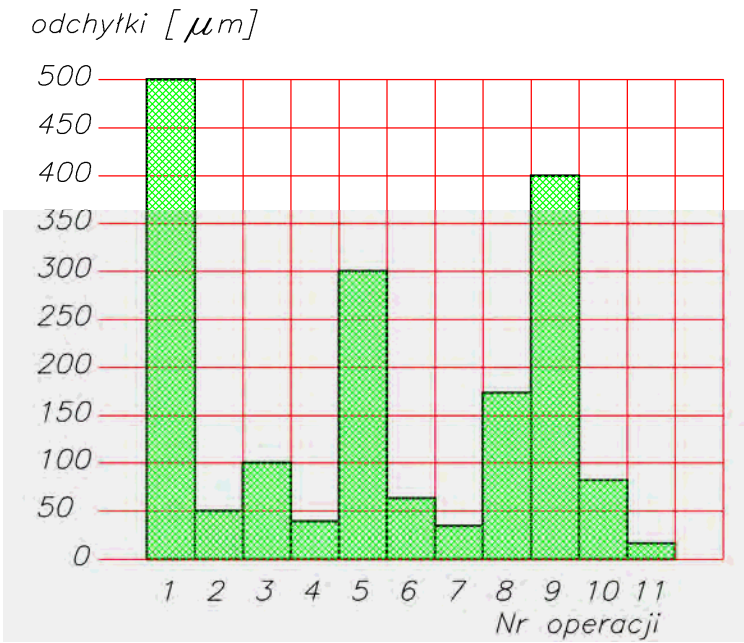
Badania dokładności wytwarzania oprawek wykonano analogicznie do wyżej opisanego. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 5.27. Wynika z nich, że po pierwsze: nie występują cyklicznie powtarzające się strefy błędów, po drugie: ogólna niedokładność jest znacznie mniejsza nie tylko w końcowej, ale i w operacjach pośrednich.

W czasie obróbki rowków wpustowych uwzględniono wcześniej przedstawione zalecenia i wypróbowane warianty rozmieszczenia rowków w zależności od skrzywienia osi,

powstającego w trakcie poprzednich operacji. Rowek wpustowy rozmieszczono w dwóch przekrojach: na stronach wypukłej i wklęsłej.

Tab. 5.15. Wyniki pomiarów niedokładności 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



Rys. 5.31. Wyniki pomiarów próbnej partii oprawek wykonanych według przedstawionej technologii (tab. 5.14)

Wyniki pomiarów błędów rowków wpustowych przedstawiono w tab. 5.15. Wynika z nich, że rozmieszczenie rowka wpustowego jest najbardziej pożądane na stronie wypukłej, w tym przypadku błąd powstający w poprzednich operacjach ulega zmniejszeniu.

Badania technologii obróbki części o dużej dokładności wykazały, że błędy obróbki w czasie tradycyjnej kolejności operacji kształtują się z określoną cyklicznością. Każdy cykl zawiera operacje: skrawania, obróbki cieplnej, prostowania i sezonowania. Po każdym cyklu zachodzi nowe kształtowanie się błędów związane z biciem promieniowym.

Zachodzi prosty związek wielkości końcowej niedokładności półfabrykatu z kolejnymi odkształceniami, który możemy wyjaśnić wytrzymałością relaksacyjną materiału. Jeśli po obróbce niezrównoważone zbyt duże naprężenia są mniejsze od wytrzymałości relaksacyjnej, wówczas występują odkształcenia sprężyste, jeśli większe - to odkształcenia sprężysto-plastyczne.

Rozpatrzono kształtowanie się dziedziczenia technologicznego błędów położenia powierzchni określanego współczynnikami dziedziczenia. Otrzymano zależności określające błędy w końcowej obróbce związane z odkształceniem.

6. OPRACOWANIE ZALECEŃ PRAKTYCZNYCH W CELU ZWIĘKSZENIA DOKŁADNOŚCI KSZTAŁTU I WYMIARÓW WAŁÓW

Przy obróbce części o dużej dokładności (wały, siłowniki, oprawki, wały i śruby pociągowe) stosuje się dodatkowe, często kilkakrotnie powtarzające się operacje.

Dzięki przeprowadzonym badaniom [10, 68, 82, 89, 90, 118] dowiedziono o dziedziczeniu technologicznym niedokładności przy obróbce wałów. Wyniki licznych eksperymentów, przedstawionych w wymienionych pracach, świadczą o przenoszeniu niedokładności powstających we wstępnych (zgrubnych) operacjach na operacje końcowe. Jednak w tych pracach nie przedstawiono metodyki określania współczynników dziedziczenia.

W celu praktycznego wykorzystania technicznych rozwiązań niezbędne jest określenie kolejności wykonywanych etapów, to znaczy opracowanie algorytmizacji postawionego zagadnienia. Algorytmizacja zawiera w sobie nie tylko kolejność etapów, ale również wybór metod rozwiązania zagadnienia.

6.1. Kształtowanie struktury procesu technologicznego

Przy rozwiązaniu zagadnienia sterowania dokładnością obróbki szczegółowo rozpatrzono poszczególne operacje, w przypadku których opracowano odpowiednie zalecenia i środki sterowania automatycznego. Kompleksowe rozwiązanie zagadnienia sterowania dokładnością kształtowania części o małej sztywności jest utrudnione, ponieważ w następnych operacjach część dziedziczy i stopniowo gromadzi błędy z operacji poprzednich, które trudno jest określić. Jedną z dróg kompleksowego rozwiązania problemu sterowania dokładnością obróbki jest rozpatrzenie technologicznego procesu wytwarzania części jako systemu jednolitego, łączącego zbiór podsystemów – operacji

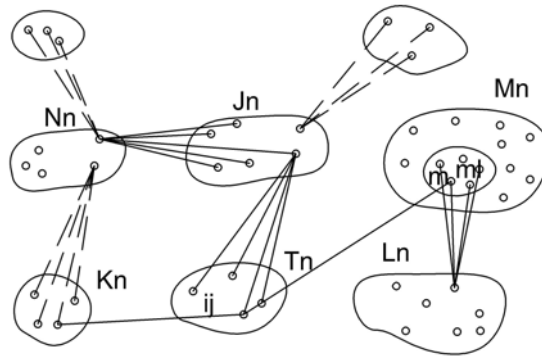
W istniejących dokumentach normatywnych dokładnie zostały określone podstawowe pojęcia technologiczne: proces technologiczny, operacja, ustawienie, zabieg, przejście, uzbrojenie.

6.1.1. Opracowanie zbioru odwzorowań określających strukturę procesu technologicznego

W oparciu o metody matematyczne należy skonkretyzować podstawowe pojęcia w przypadku produkcji małoseryjnej, kiedy w charakterystycznej sytuacji mamy ustalone zestawy wyposażenia i narzędzi oraz założony asortyment części, które koniecznie trzeba obrobić w określonym czasie. Przy tym analizowana jest obróbka N części na L obrabiarkach M narzędziami. Część uczestnicząca w procesie technologicznym może być przedstawiana jako

zestaw J kompleksów technologicznych I powierzchni, to znaczy zbiór, na którym określono relacje (związki wymiarowe między powierzchniami rys. 6.1).

W przypadku wcześniej określonego zbioru powierzchni części określa się niezbędną ilość naddatków, wychodząc z założonej na rysunku jakości i dokładności ich rozmieszczenia. Tak powstałemu zbiorowi powierzchni przypisano wierzchołki, a zbiorowi wiążących ich wymiarów żebra. Otrzymano graf obróbki mechanicznej.



Rys. 6.1. Zbiór odwzorowań określających uzbrojenie

Powierzchnie, utworzone naddatkami odnoszącymi się do jakiegokolwiek powierzchni części i półfabrykatu, nazywają się technologicznym kompleksem powierzchni lub po prostu kompleksem technologicznym [19, 32].

Każda powierzchnia i -tego kompleksu technologicznego j -ej części jest obrabiana od odpowiedniego kompleksu baz technologicznych $K \in K_n \subset K$ na l -ej obrabiarence m -narzędziem, gdzie K_n - zbiór kompleksów baz technologicznych n -tej części, K - zbiór kompleksów baz N części. Zatem konkretne przejście można przedstawić następującym uporządkowanym zbiorem danych:

$$P = \langle n, i, j, k, l, m, A, T, Z, v_c, f \rangle, \quad (6.1)$$

gdzie: A - wymiar międzyoperacyjny, T - tolerancja wymiaru A , Z - naddatek, v_c - prędkość skrawania, f - posuw.

W określonym w taki sposób przejściu można wyróżnić część strukturalną:

$$\langle n, i, j, k, l, m \rangle, \quad (6.2)$$

i parametryczną:

$$\langle A, T, Z, v_c, f \rangle. \quad (6.3)$$

Strukturalna część przejścia określona jest 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:

$$ZT = \langle P_1 < P_2 < \dots \rangle. \quad (6.4)$$

Ustawienie jest uporządkowanym zbiorem zabiegów technologicznych:

$$U = \langle ZT_1 < ZT_2 < \dots \rangle. \quad (6.5)$$

Operacja technologiczna jest uporządkowanym zbiorem ustawień:

$$OT = \langle U_1 < U_2 < \dots \rangle. \quad (6.6)$$

Proces technologiczny jest uporządkowanym zbiorem operacji technologicznych:

$$PT = \langle OT_1 < OT_2 < \dots \rangle. \quad (6.7)$$

Proces technologiczny składa się nie tylko z operacji technologicznych, zawiera również operacje kontrolne, transportowe, itp. Do naszych celów w zupełności wystarczą przytoczone wyżej określenia, które można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} PT &= \langle O_{PT}, R_1 \rangle, \\ OT &= \langle U_{OT}, R_2 \rangle, \\ U &= \langle ZT_U, R_3 \rangle, \\ ZT &= \langle P_Z, R_4 \rangle, \end{aligned} \quad (6.8)$$

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 odpowiednio w procesie technologicznym, operacji, ustawieniu, zabiegu; $ZT \in ZT_U, U \in U_{OT}, OT \in O_{PT}$.

W oparciu o przedstawione wyżej oznaczenia wprowadzono pojęcie struktury procesu technologicznego, określanej jako:

$$SPT = \langle (((P_Z, R_4) R_3) R_2) R_1 \rangle. \quad (6.9)$$

Kolejność przejść w całym procesie technologicznym, określana strukturą (6.9), będzie nazywana trasą technologiczną, w odróżnieniu od procesu technologicznego określonego strukturą (6.8), który zawiera zarówno część strukturalną, jak i parametryczną.

6.1.2. Metodyka kształtowania składu i kolejności operacji procesu technologicznego

Powszechnie przyjęta metodyka projektowania procesów technologicznych przewiduje: wybór i uzasadnienie metod otrzymywania półfabrykatu; obliczenie naddatków na obróbkę; wybór baz technologicznych (zgrubnych i wykańczających); określenie metod i kolejności obróbki; obliczenia dokładności z uwzględnieniem błędów bazowania, błędów obróbki (zużycie, stępienie, odkształcenie narzędzi, nierównomierna twardość, odkształcenia układu technologicznego itp.).

W oparciu o przeprowadzone badania opracowano metody sterowania kształtowaniem stanu naprężeniowo - odkształceniowego, umożliwiające sformułowanie podstawowych zasad budowy procesów technologicznych obróbki wałów oraz gwarantujące minimalne odkształcenie powierzchni. Zasady te w uzupełnieniu do ogólnie przyjętych powinny uwzględniać [39, 46, 48]:

- wielkość następnego odkształcenia części przy usunięciu nierównomiernego naddatku. Zależność obliczeniowa (4.16) 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. Współczynniki dziedziczenia technologicznego określa się wychodząc z wykonanych obliczeń;
- zalecenia odnośnie obniżenia odkształceń części przy ich obróbce: kompensacja nie zrównoważonych 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 obliczoną według zależności, określenie dopuszczalnego błędu rozmieszczenia nakiełków;
- wpływ parametrów szlifowania na wielkość naprężeń szczątkowych w warstwie wierzchniej.

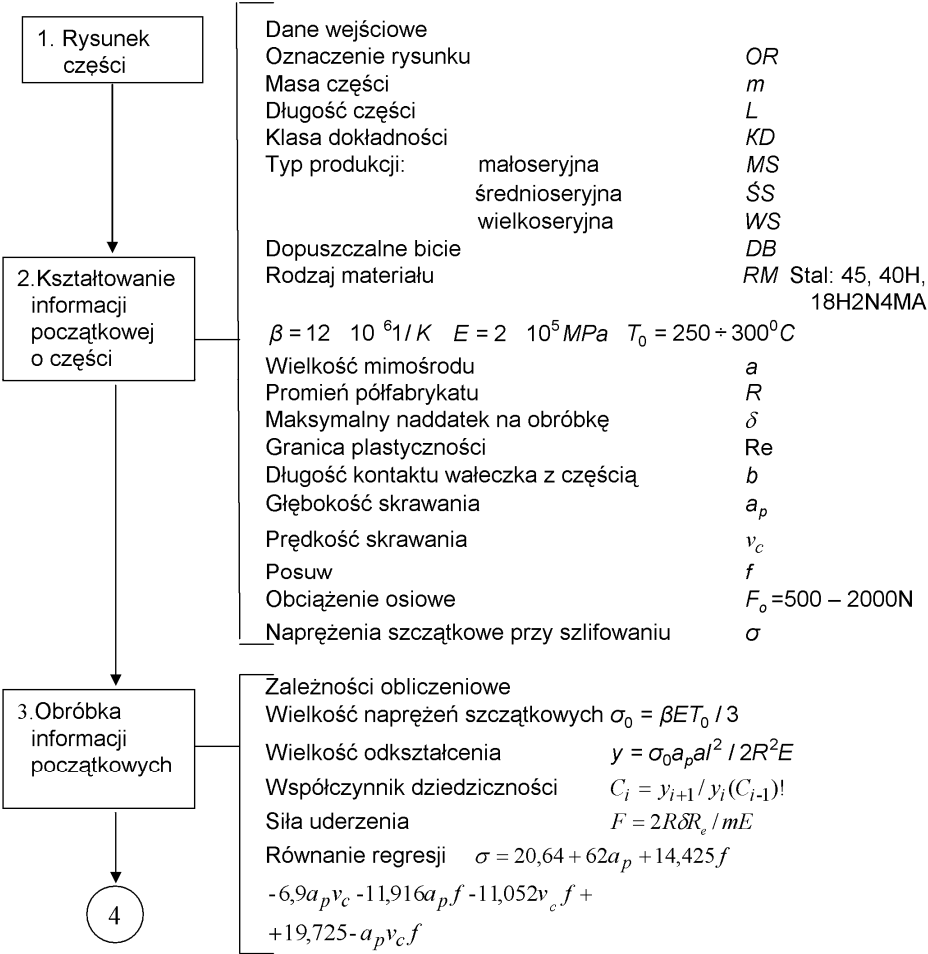
Badania eksperymentalne stanu naprężeń części po szlifowaniu pozwoliły otrzymać równanie regresji określające wpływ podstawowych parametrów szlifowania na naprężenia szczątkowe.

Liczne rozwiązania technologiczne, sprowadzają się do analizy zgodności między ostatecznym zbiorem warunków wpływających na wybór rozwiązań.

Tab.6.1. Tablica odpowiedniości

Zbiór możliwych rozwiązań		Zbiór warunków zaistnienia rozwiązań											
Kod operacji	Nazwa operacji	Wielkość błędu			Rodzaj produkcji			BD		KD		L	
		<0.25	=0.45	>0.45	MS	ŚS	WS	<0.05	>0.05	<6	>6	<1500	>1500
1.	Kucie	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2.	Toczenie		+		+							+	
3.	Frezowanie	+				+	+					+	
4.	Roztaczanie			+									+

Do opracowania Systemu Zautomatyzowanego Projektowania Procesów Technologicznych jako środka formalizacji procesu budowy algorytmów rozwiązań technologicznych i programowania zastosowano tablicę odpowiedniości –tab. 6.1.



Rys. 6.2. Ogólny schemat blokowy algorytmu kształtowania marszruty obróbki

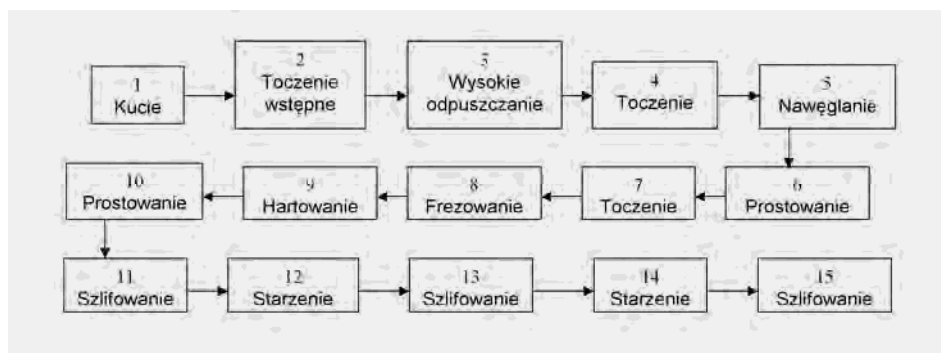


Rys. 6.2. Ogólny schemat blokowy algorytmu kształtowania marszruty obróbki

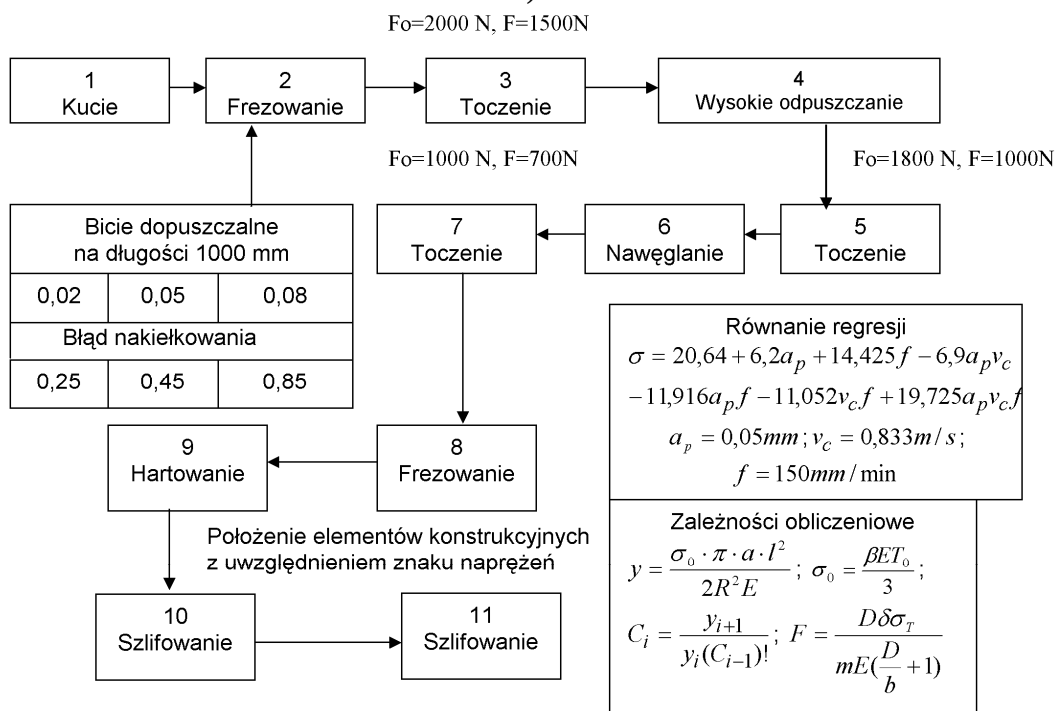
Na podstawie tablicy odpowiedniości zbudowano algorytm kształtowania marszruty technologii obróbki. Uogólniony schemat blokowy kształtowania marszruty obróbki części typu „ciało obrotowe” przedstawiono na rys. 6.2.

Po ukształtowaniu informacji wejściowej jest ona przetwarzana z uwzględnieniem zależności obliczeniowych i opracowanych zaleceń, w wyniku czego kształtowany jest szereg marszrutowy, gwarantujący optymalny skład operacji.

Jako przykład wykorzystania metodyki na rys. 6.3 przedstawiono dwa warianty technologii obróbki wałów: bazowy i zalecany zgodnie ze schematem blokowym (rys. 6.2).



a)



b)

Rys. 6.3. Realizacja metodyki projektowania procesu technologicznego z uwzględnieniem prognozowania wypaczenia w czasie obróbki: a - wariant bazowy, b - wariant zalecany.

Wariant bazowy zawiera 15 podstawowych operacji, 5 obróbki cieplnej, 3 odpuszczania i 2 operacje prostowania. Technologia bazowa nie przewiduje żadnych przedsięwzięć odnośnie obniżenia odkształceń, ponieważ każdy cykl obróbki kształtuje nowe wielkości odkształceń.

Proponowany wariant procesu technologicznego zawiera tylko 11 operacji, przy czym zmniejszenie liczby operacji procesu technologicznego nastąpiło w wyniku wyeliminowania dwóch operacji starzenia i dwóch operacji prostowania.

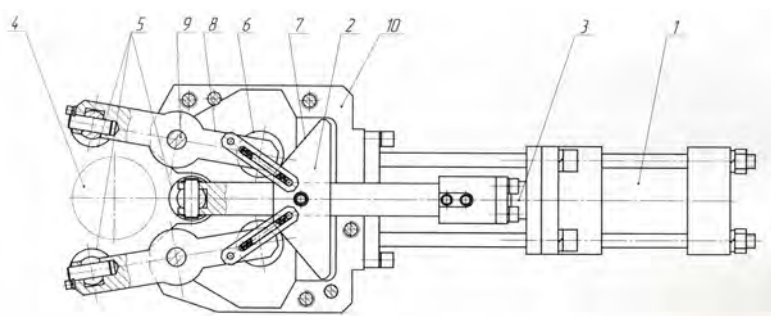
Metodyka projektowania procesu technologicznego z uwzględnieniem wypaczenia wałów przewiduje zmniejszenie liczby cykli w wyniku zastosowania nowych rozwiązań technicznych. Zastosowanie zależności analitycznych umożliwia zwiększenie dokładności

obróbki z jednoczesnym obniżeniem pracochłonności i polepszeniem jakości warstwy wierzchniej.

Opracowana metodyka zautomatyzowanego projektowania technologii obróbki części typu wał z uwzględnieniem rekomendacji, w celu obniżenia poziomu naprężeń szczątkowych i wypaczenia gotowych wyrobów, zwiększa niezawodność eksploatacyjną.

6.2. Konstrukcja hydraulicznej podtrzymki samocentrującej

W procesie obróbki części o małej sztywności może być w czasie toczenia stosowana samocentrująca podtrzymka hydrauliczna (PSH), która pozwala na stabilizację osi części w procesie obróbki [30]. Konstrukcję PSH przedstawiono na rys. 6.4.



Rys. 6.4. Samocentrująca podtrzymka hydrauliczna

Podtrzymki rozmieszczone są wzdłuż półfabrykatu tak, aby uzyskać jego równomierną sztywność w funkcji ilorazu długości i średnicy części ($l/d < 5$) lub też w strefach przeciwwzłów rozkładu wyższych składowych harmonicznych drgań części. Samocentrujące podtrzymki hydrauliczne ustawione są w węzłach drgań zginających i pracują jako podpory o jednakowej sztywności. W trakcie wzdłużnego przemieszczania się narzędzia skrawającego następuje przełączenie PSH, pracujących w trybie tłumika, na tryb podpór o jednakowej sztywności, w funkcji drogi rejestrowanej przez czujnik przebytej przez ostrze skrawające.

W stanie wejściowym, przed procesem skrawania wszystkie podtrzymki pracują w trybie tłumików, oprócz pracujących w warunkach jednakowej sztywności, ustawionych we wrzecienniku i koniku. Ten warunek jest spełniany w celu centrowania osi części względem osi technologicznych obrabiarki. Powierzchnie oporowe części w miejscach usytuowania skrajnych podtrzymek są wstępnie przetaczane.

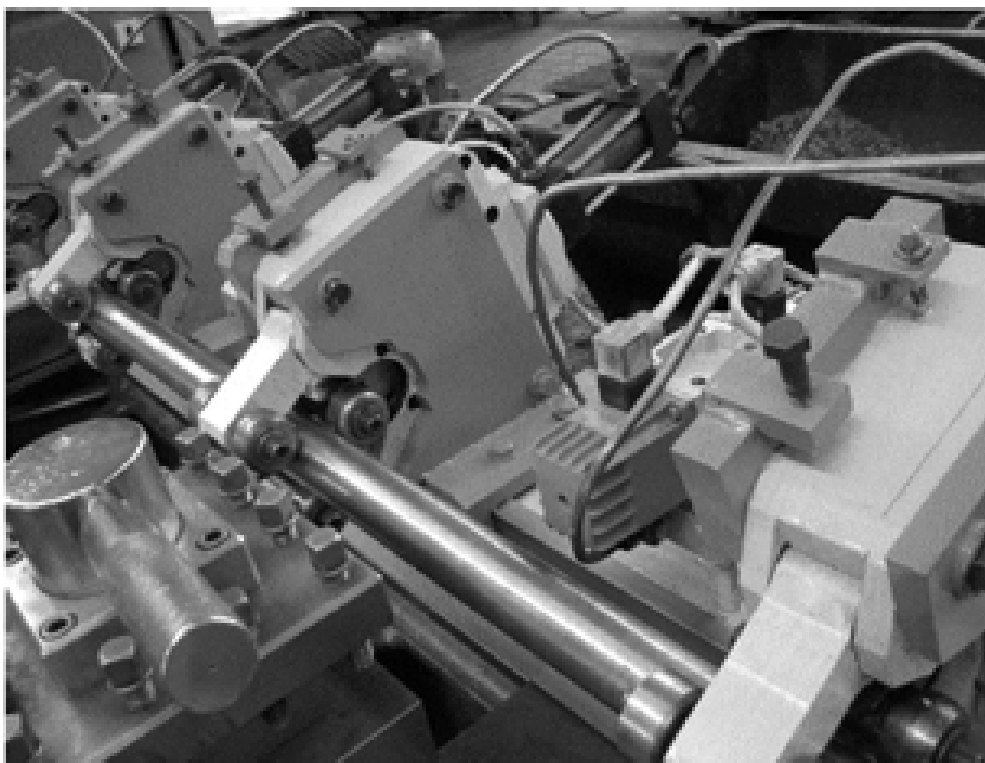
Tradycyjny sposób mocowania części prowadzi do skrzywienia osi i powstawania naprężeń szczątkowych w materiale. Zjawisko to wzmacnia się pod wpływem działania odkształcenia plastycznego w trakcie obróbki materiału. Umożliwia to bazowanie części na powierzchni

tworzącej, która pokrywa się z bazową powierzchnią pomiarową, co wpływa na zwiększenie dokładności obróbki i wykluczenie technologicznej dziedziczności od warunków mocowania. Mechanizm wykonawczy w czasie skrawania działa w następujący sposób: przy podaniu czynnika roboczego (olej) do cylindra napędu hydraulicznego 1, kopiał płaski 2, połączony z tłoczyskiem napędu 3, przemieszcza się w kierunku części obrabianej 4, a wałeczki robocze 5 (mogą być wykonane jako podwójne o dwóch obrotowych stopniach swobody: względem osi własnej i osi obrotu) zaciskają lub zwalniają część w wyniku docisku wałeczków 6, do powierzchni roboczej kopiału płaskiego 7.

Powierzchnia robocza kopiału wykonana jest wg linii krzywej, zbliżonej do łuku koła o promieniu zależnym od zakresu średnic obrabianej części. Jedna para wałeczków roboczych umieszczona jest na trzpieniu kopiału płaskiego, natomiast pozostałe pary wałeczków przymocowane są do dźwigni 8. Obrót dźwigni, na końcach której rozmieszczone są wałeczki robocze 5, odbywa się względem osi obrotu 9. Dźwignia 8 zamocowana jest w korpusie 10 podtrzymki. Część 4 zaciskana jest wałeczkami wg krzywej kopiału. Zacisk wałeczków zachodzi z siłą proporcjonalną do siły pochodzącej od napędu. W celu odciążenia wałeczków i dźwigni, a także podwyższenia charakterystyk dynamicznych układu technologicznego (OUPN), oś wzdłużna korpusu podtrzymki, razem z napędem obracana jest względem płaszczyzny poziomej o kąt α , który określa się w funkcji kierunku składowej promieniowej siły skrawania, zależnej od parametrów geometrycznych stosowanych narzędzi skrawających: noży roztaczaków, noży do obróbki powierzchni zewnętrznych, wiertła.

Ustawienie podtrzymek samocentrujących na obrabiarce do obróbki wałów o małej sztywności oraz w procesie obróbki przedstawiono na rys. 6.6 i 6.7.

Eksperymentalne określenie zachowania się 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, a następnie przetwarzano go przy zastosowaniu programu Sound Forge. Odkształcenie osi wału w trakcie eksperymentu mierzono w trzech przekrojach: na biegu jałowym, następnie w procesie skrawania. Wykresy drgań osi wału o małej sztywności, powstające w czasie toczenia, bez układu oraz z układem stabilizacji, przedstawiono na rys. 6.8.



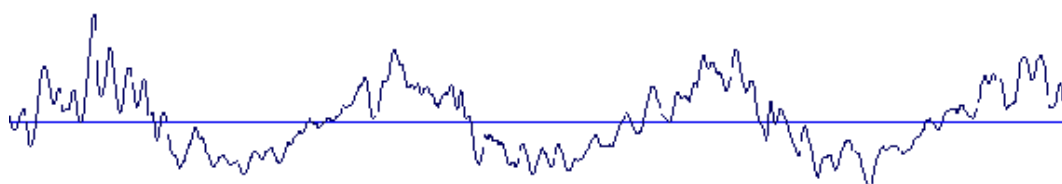
Rys. 6.6. Ustawienie podtrzymek samocentryujących na obrabiarce w czasie obróbki wału o małej sztywności



Rys. 6.7. PSH w procesie obróbki wału o małej sztywności

Analiza zależności eksperymentalnych wykazała, że w czasie skrawania kształt osi wału zmienia się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej: przy małej prędkości obrotowej – kształt osi jest zbliżony do statycznego; ze wzrostem prędkości obrotowej oś ulega odkształceniu. W trakcie skrawania kształt osi wału o małej sztywności zbliżony jest do kształtu osi

półfabrykatu na biegu jałowym, a wielkość odkształcenia osi zależy od charakteru procesu skrawania i wzrasta od 2 do 3 razy wraz z pojawieniem się drgań własnych. Przy zmniejszeniu wytrzymałości na zginanie półfabrykatu wzrasta nie tylko odkształcenie osi, ale zmienia się również jej kształt; zwiększa się jej odchylenie od krzywej odkształceń statycznych. W układzie stabilizacji osi wału o małej sztywności w opisywanych eksperymentach zastosowano dwie samocentrujące podtrzymki hydrauliczne (PSH). Toczenie z zastosowaniem układu stabilizacji, jak i bez układu, przeprowadzano przy tych samych warunkach skrawania i przy zastosowaniu tych samych półfabrykatów. Wyniki badań 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 roztaczaka 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 z zastosowaniem układu zmniejszyło się od 3 do 5 razy.



a)



b)

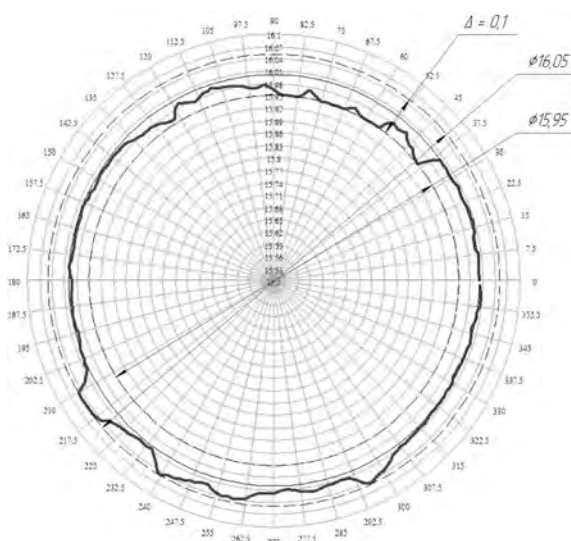
Rys. 6.8. Wykres drgań osi półfabrykatu: a) bez zastosowania PSH, b) z zastosowaniem układu PSH

Z analizy drgań wynika, że brak wyważenia półfabrykatu powoduje powstawanie składowej o niskiej częstotliwości (czas jednego obrotu $T=0,06 - 1,15$ s), na którą nakładają się drgania o wysokiej częstotliwości, przy czym w przypadku zastosowania PSH ich częstotliwość się zwiększa, a amplituda zmniejsza. Wyższe składowe harmoniczne w spektrum częstotliwości wrzeciennika spowodowane są niedokładnością wykonania podpór (w tym przypadku łożysk kulkowych wrzeciennika i PSH). W przypadku sztywno zamocowanego półfabrykatu drgania mają niską częstotliwość. Spektrum częstotliwości przesuwają się w strefę wysokich

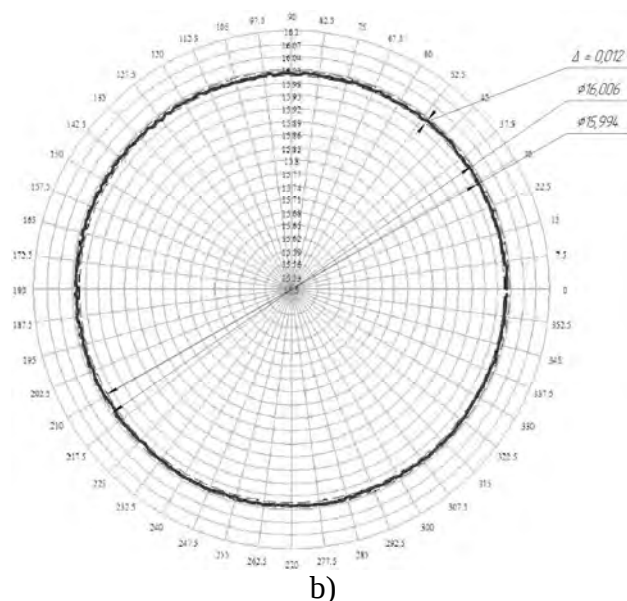
częstotliwości proporcjonalnie do wzrostu prędkości obrotowej. Częstotliwość drgań własnych elementów oporowych PSH jest większa (zależy od wymiarów konstrukcyjnych łożysk kulkowych wrzeciennika i PSH, które różnią się o jeden rząd wielkości), a amplituda zakłóceń mniejsza. W czasie obrotu półfabrykatu PSH tłumi zakłócenia pochodzące od elementów oporowych wrzeciennika w zakresie częstotliwości 100-500 Hz (działa jak tłumik drgań o wysokiej częstotliwości półfabrykatu). Przedstawiony półfabrykat również charakteryzuje się minimalnymi wartościami rozbicia otworu, małą amplitudą drgań poprzecznych, występowaniem intensywnych drgań skrętno-wzdłużnych.

Bez zastosowania PSH częstotliwości te zbliżone są do wyższych składowych harmonicznym drgań wału i ulegają zwiększeniu. Jeżeli do przekazania momentu obrotowego zostanie zastosowany uchwyt z zabierakiem z samonastawnymi szczękami, wówczas zakłócenia pochodzące od wrzeciennika w układzie stabilizacji osi wału są tłumione. Stosując w PSH łożyska nie kulkowe lecz igiełkowe praktycznie można uzyskać kształt przesunięcia części o małej sztywności w postaci sinusoidy, co zwiększa stabilność procesu skrawania. Opracowana konstrukcja układu stabilizacji, przy zastosowaniu samocentrujących podtrzymek hydraulicznych, zapewnia zwiększenie sztywności poprzecznej półfabrykatu w procesie obróbki od 3,5 do 4 razy.

Za pomocą przyrządu TAYLOR- HOBSON otrzymano wykresy przekrojów poprzecznych wału o małej sztywności. Analiza wykresów kołowych (rys. 6.9) pokazała, że odchyłka od okrągłości powierzchni obrobionej z wykorzystaniem układu stabilizacji, zmniejszyła się od 1,3 do 2 razy. Analiza drgań pozwoliła ustalić, że przy zwiększeniu obrotów wrzeciona zwiększa się amplituda odkształceń (od 0,29 do 0,52 mm). Przy zastosowaniu PSH amplituda odkształceń zmniejsza się od 0,03 do 0,06 mm.



a)



Rys. 6.9. Wykresy przekrojów poprzecznych wału: a) bez zastosowania PSH, b) z zastosowaniem układu PSH

6.3. Układ stabilizacji przekroju warstwy skrawanej

Jedną z możliwości podwyższenia jakości obróbki części o małej sztywności jest metoda automatycznego sterowania przebiegiem procesu technologicznego. Proces skrawania charakteryzuje się złożonym stanem naprężeń, który warunkuje powstawanie sił skrawania. W pracy [65] przedstawiono zależność do analitycznego wyznaczania siły skrawania.

$$F = 2\sigma \cdot a \cdot b \cdot \cos^2 \beta_1, \quad (6.10)$$

gdzie:

σ - naprężenie poślizgu plastycznego materiału obrabianego,

a - grubość wióra,

b - szerokość wióra,

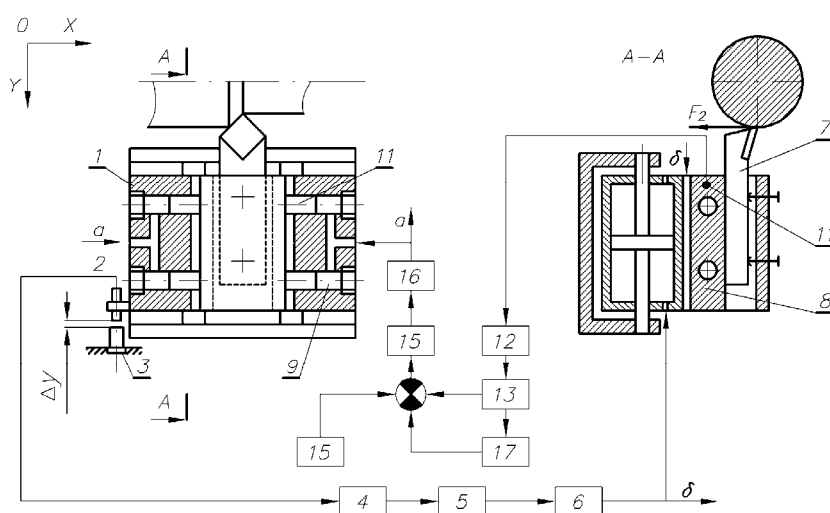
β_1 - kąt pochylenia umownej płaszczyzny poślizgu.

Jak widać z zależności (6.10) siła skrawania jest wprost proporcjonalna do płaszczyzny przekroju poprzecznego (grubość i szerokość) warstwy skrawanej. Wraz ze wzrostem prędkości posuwu lub głębokości skrawania siła skrawania wzrasta, co jest przyczyną wzrostu głębokości umocnienia i wartości naprężeń szczątkowych. Jeżeli przy obróbce skrawaniem metali głębokość i szerokość warstwy skrawanej pozostałyby niezmiennie w trakcie całego procesu obróbki, to i siła skrawania pozostałaby stała. Rzeczywista powierzchnia półfabrykatu różni się od teoretycznej swoją geometrią: owalnością, stożkowatością, nieokrągłością, niewalcowością, falistością. Rzeczywista oś powierzchni półfabrykatu ma odchylenie od prostopadłości, a także nie pokrywa się z osią obrotu półfabrykatu. Wskutek tych błędów zdejmowany naddatek zmienia się w ciągu jednego obrotu półfabrykatu

przy obróbce tokarskiej. Odpowiednio zmienia się przekrój warstwy skrawanej i siła skrawania. Zmiana siły skrawania powoduje, że naprężenia szczątkowe na powierzchni obrobionej nie są jednakowe. Ich wartość i głębokość zalegania zmieniają się zarówno w przekroju kołowym, jak i wzdłuż powierzchni cylindrycznej.

W trakcie przechowywania jak i eksploatacji takich części, w związku z mechanizmami relaksacji, powstają momenty zginające sił, które są różne w różnych kierunkach, powodując zginanie części w kierunku większych momentów.

Układ sterowania automatycznego (UAS) przeznaczony jest do stabilizacji pola przekroju warstwy skrawanej i odpowiednio siły skrawania oraz stabilizacji naroża ostrza w kierunku promieniowym. Schemat funkcjonalny UAS przedstawiono na rys. 6.10 [29].



Rys. 6.10. Schemat funkcjonalny układu automatycznego sterowania

UAS instalowany jest na suporcie obrabiarki i pracuje wg następującego schematu. Włącza się pierwszy obwód sterowania stabilizacji położenia naroża ostrza w kierunku promieniowym. W takim przypadku niższy suport 1 małych przemieszczeń narzędzia ustawia się w zadane położenie względem obrabianej części. Nastawienie głębokości skrawania realizowane jest przy pomocy czujnika 2 położenia naroża ostrza, umieszczonego na suporcie dolnym i nastawnika 3 głębokości skrawania. Nastawnik 3 zamontowany jest na suporcie poprzecznym obrabiarki z luzem wstępnym Δy względem czujnika 2. Pod wpływem siły skrawania suport dolny 1 i czujnik 2 przemieszczają się, a więc także luz Δy zmienia się. To przemieszczenie mechaniczne zamieniane jest na sygnał elektryczny, który podawany jest na wejście wzmacniacza różnicowego 4, wzmocniony sygnał z uwzględnieniem znaku podawany jest na przetwornik elektromechaniczny 5. W fazie końcowej sygnał ten steruje serwonapędem 6, który porusza dolny suport 1 małych przemieszczeń w kierunku uzyskania

wstępnie ustalonego luzu Δy . W taki sposób pierwszy obwód sterowania zapewnia wymagane położenie naroża ostrza w kierunku promieniowym kompensując odkształcenia sprężyste, pochodzące od siły skrawania.

Drugi obwód sterowania umożliwia stabilizację średniej wartości wypadkowej siły skrawania F_c , jego działanie przebiega wg następującego schematu. Wszystkie urządzenia przemieszczają się z prędkością posuwu roboczego. Narzędzie 7 sztywno jest zamocowane w imaku 8, który może się przemieszczać w kierunku osi X. W korpusie suportu dolnego 1 zainstalowano napędy hydrauliczne 9, które przemieszczają tłoczyska 10 razem z zamocowanym na nich imakiem 8 wzdłuż osi X. Siła skrawania przez narzędzie 7 oddziałuje na imak 8. Czujnik siły 11 zainstalowany w imaku 8 w specjalnym rowku, rejestruje główną siłę skrawania F_c i przekształca ją na sygnał elektryczny. Czujnik działa na zasadzie efektu piezorezonansu [86], charakteryzuje się on małymi wymiarami i wysoką czułością wg poziomu sygnału i częstotliwości. Sygnał wzmacniany jest przez wzmacniacz 12 i podawany na filtr pasmowy 13, który wyodrębnia składową niskoczęstotliwościową sygnałów wejściowych, odpowiadających drganiom siły skrawania w ciągu jednego obrotu części (2-40 Hz). Wyróżniony sygnał kierowany jest do bloku 17 kształtowania sygnału sterującego o średniej wartości siły skrawania w czasie jednego obrotu części i do członu porównującego 14, gdzie zachodzi porównanie rzeczywistej i średniej wartości siły skrawania. Pomiar średniej wartości siły skrawania realizowany jest w bloku 17 w czasie pierwszych dziesięciu obrotów części, następnie wartość ta podawana jest do członu porównującego 14 i zapamiętywana. Otrzymany w członie porównującym 14 wynik porównania kierowany jest na przetwornik elektromechaniczny 15, który steruje pracą serwonapędu 16. Serwonapęd 16 podaje olej pod ciśnieniem do jednej z przestrzeni roboczych cylindra hydraulicznego 9. Przy tym imak 8 z zamocowanym narzędziem 7 przemieszcza się. Zmiana wartości posuwu roboczego powoduje zmianę sił skrawania, co rejestrowane jest przez czujnik 11. Kiedy sygnał porównania w członie porównującym 14 osiągnie wartość zerową, serwonapęd odłącza podawanie oleju. W celu ogólnego obniżenia siły skrawania na wejście członu porównującego 14, gdzie zachodzi porównanie wszystkich sygnałów elektrycznych, dodatkowo podawany jest sygnał kalibrujący [4], który kształtowany jest przez generator sygnałów 18 z wbudowanym nastawnikiem. Sygnał ten nastawia drgania imaka 8 z narzędziem 7 wzdłuż osi X. Częstotliwość i amplituda tych drgań są stałe w ciągu całego czasu obróbki i nie zależą od przemieszczeń regulacyjnych narzędzia. Narzędzie 7, mające roboczy posuw wzdłużny, otrzymuje dodatkowe małe przemieszczenia sterujące, które nakładają się na podstawowe przemieszczenia robocze, powodując

równomierne zdejmowanie warstwy skrawanej, a także realizują drgania wzdłuż osi X, co powoduje obniżenie średniej siły skrawania.

UAS umożliwia sterowanie naprężeniami szczątkowymi na powierzchni części obrabianej, podtrzymując wymagania dokładnościowe oraz funkcjonalne powiązanie naprężeń szczątkowych z warunkami skrawania i geometrią części. Badania eksperymentalne przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym pokazały, że przy toczeniu zgrubnym wału ze stali 30H13 o średnicy 30 mm i długości 1200 mm odkształcenie osi w przestrzeni po siedmiodniowym sezonowaniu nie przekracza 10 μm . Dokładność eksploatacyjna wzrosła do 10 razy w zależności od stanu półfabrykatu wejściowego.

6.4. Układ regulacji odkształceń cieplnych przy obróbce wałów

Opracowanie nowoczesnej technologii wytwarzania wałów-wirników, wchodzących w skład kompresorów turbinowych, ujawniło złożoność problemów związanych z wytwarzaniem wałów o wysokiej dokładności o średnicach 38-50 mm i długości 3000-6000 mm [31].

Wcześniej opracowana technologia obróbki ubytkowej – toczenie na tokarce RW-106 z zastosowaniem podtrzymek samocentrujących [1, 2] dała dobre wyniki – bicie w przekroju poprzecznym na całej długości po jednym przejściu zgrubnym nie przewyższało 0,012 mm.

Dokładność wzdłużna wynosiła 0,010 mm/m, to znaczy otrzymana dokładność odpowiadała wymaganiom określonym w dokumentacji konstrukcyjnej. Świadczy to o tym, że sztywność podtrzymek samocentrujących (rys. 6.6 – 6.8) jest kształtowana ciśnieniem roboczym w cylindrach hydraulicznych podtrzymek, a jeśli uwzględnić, że dokładność nakiełkowania półfabrykatu i stabilizacja jego osi dokonywana jest za pomocą układu sterowania automatycznego, ze sprzężeniem zwrotnym wg położenia rolek roboczych względem powierzchni obrobionej, to sztywność zredukowana półfabrykatu w procesie jego obróbki może być uważana za nieskończoną. Oprócz tego bazowanie półfabrykatu wału na średnicy zewnętrznej pozwala połączyć bazy technologiczne, konstrukcyjne i pomiarowe. Jednak nie udało się zachować dokładności uzyskanej po obróbce na obrabiarce. Po upływie 72 – 100 godzin odkształcenie wału (ugięcie w środku długości) wynosiło 0,1 – 0,4 mm/m. Również parametry geometryczne nie odpowiadały charakterystykom eksploatacyjnym wałów – wirników. Dlatego podjęto decyzję opracowania technologii obróbki z zastosowaniem układu stabilizacji długości półfabrykatu w procesie obróbki ubytkowej.

W tym celu przeprowadzono obliczenia inżynierskie wałów o średnicy 40 mm i długości 3000 mm, wytwarzanych ze stali 30CrNiMo8 (30H2N2M) o współczynniku rozszerzalności liniowej $\alpha = 18.5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$.

Wydłużenie półfabrykatu w wyniku nagrzania w procesie skrawania do $T = 70^{\circ}\text{C}$ obliczano wg wzoru:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T = 2,775\text{mm}. \quad (6.11)$$

Wydłużenie względne $\varepsilon = \Delta l / l = 0,925 \cdot 10^{-3}$

Siła osiowa powstająca przy wydłużeniu półfabrykatu w wyniku nagrzania, przy podparciu kłębem obrotowym wynosi:

$$F_o = A \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T = 907425 \text{ N}. \quad (6.12)$$

Mogące przy tym powstawać naprężenia szczątkowe określano wg równania:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T = 182 \text{ MPa}, \quad (6.13)$$

gdzie: A – pole przekroju poprzecznego półfabrykatu, $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$,

ΔT - różnica temperatur (nagrzanego półfabrykatu i otoczenia).

Energię potencjalną jako wynik odkształceń sprężystych powstających w czasie nagrzania określano zależnością:

$$P = 0,5F_o \cdot \Delta l = 1255 \text{ N}. \quad (6.14)$$

Przy uwzględnieniu, że na powierzchni półfabrykatu obrabianego w procesie toczenia powstają osiowe naprężenia szczątkowe, które sumują się z naprężeniami termicznymi, to odkształcenie wyrobów gotowych jest nieuniknione.

Celem opracowanej technologii jest podwyższenie dokładności wałów-wirników w czasie wytwarzania i zachowanie jej w trakcie eksploatacji przez minimalizację osiowych naprężeń szczątkowych, powstających podczas obróbki ubytkowej i pozostających w procesie eksploatacji.

Osiągane jest to dzięki temu, że jako parametr wejściowy przyjmowane jest wydłużenie termiczne części obrabianej powstające bezpośrednio w czasie obróbki ubytkowej, rejestrowane i przetwarzane w sygnał elektryczny, który jest następnie przekształcany w sygnał sterowania siłowym układem stabilizacji osiowych naprężeń szczątkowych w półfabrykacie. Przy braku oddziaływań sterujących, osiowe naprężenia szczątkowe powodują odkształcenia półfabrykatu po obróbce mechanicznej, a w procesie eksploatacji zakłócenie dynamiki pracy części. Jednocześnie uwzględniany jest wpływ zmiany

dynamicznej podatności układu technologicznego, w tym celu dodatkowo rejestrowana jest w koniku podatność półfabrykatu wzdłuż trzech współrzędnych poprzez kontrolę odkształceń kła konika. Przy tym kształtowany jest sygnał elektryczny funkcjonalnie związany z odkształceniem termicznym półfabrykatu. Sterowana jest osiowa siła podparcia konikiem, stabilizując osiową siłę wypadkową działającą na półfabrykat, niezbędną i wystarczającą dla utrzymania półfabrykatu w stanie równowagi przy działaniu składowych sił skrawania. Przy czym w funkcji termicznej zmiany objętościowej, przyrosty obrabianej średnicy automatycznie korygowane są na całej długości, z uwzględnieniem objętościowych zmian termicznych przez zmianę głębokości skrawania, w zakresie pola tolerancji gotowej części.

Układ sterowania automatycznego dokładnością obróbki mechanicznej wałów długowymiarowych, zawiera konik, wykonany w postaci bezkontaktowego kła dynamometrycznego zawierającego trzy wstępne przetworniki rejestrujące przemieszczenia sprężyste kła statyczne i dynamiczne wzdłuż trzech współrzędnych X, Y, Z. Pierwszy wstępny przetwornik rejestrujący osiowe przemieszczenia w kierunku osi X rejestruje dodatkowe termiczne odkształcenia półfabrykatu przez element sprężysty korpusu konika. Odkształcenie dynamometrycznego kła w płaszczyźnie YOZ rejestrują dwa inne (drugi i trzeci) wstępne przetworniki zainstalowane na osiach OY i OZ względem korpusu konika. Pierwszy wstępny przetwornik rejestrujący odkształcenia termiczne i wywołane siłą osiową w kierunku osi X wykonany jest w postaci rejestratora położenia węzła dynamometrycznego kła. Trzy (pierwszy, drugi i trzeci) wstępne przetworniki równocześnie włączone są do dwóch obwodów sterowania. Pierwszy obwód stabilizujący naprężenia szczątkowe zawiera drugi i trzeci wstępny przetwornik przemieszczenia dynamometrycznego kła wzdłuż osi Y i Z - odpowiednio, oba wyjścia tych czujników podłączone są do wejść wzmacniacza różnicowego, którego wyjście podłączone jest do wejścia pierwszego wyskalowanego wzmacniacza. Do drugiego wejścia tego wzmacniacza podłączono wyjście pierwszego wstępnego przetwornika osiowych przemieszczeń półfabrykatu, a jego wyjście podłączone jest do pierwszego obwodu-automatycznej stabilizacji osiowych naprężeń szczątkowych. Obwód ten zawiera kolejno połączone: element porównania, do którego na drugie wejście podłączono wyjście nastawnika siły osiowej, a sygnał wyjściowy skierowany jest do kolejno połączonych: wzmacniacza mocy, napędu elektrohydraulicznego i węzła dynamometrycznego. Do drugiego obwodu automatycznej korekcji głębokości skrawania w czasie obróbki włączone są bloki pierwszego obwodu, trzy wstępne przetworniki, wzmacniacz różnicowy i pierwszy wzmacniacz wyskalowany, którego wyjście podłączone jest do drugiego obwodu sterowania zawierającego: blok typu „strefa nieczułości”, którego

wyjście razem z wyjściem nastawnika głębokości skrawania podłączono do wejścia drugiego elementu porównania, a jego wyjście podłączono do wejścia trzeciego elementu porównania, przy czym do drugiego jego wejścia podłączono wyjście czwartego wstępnego przetwornika-kontrola w sprzężeniu zwrotnym sygnału korekcji przemieszczenia wierzchołka noża w funkcji wydłużenia termicznego półfabrykatu (zwiększenia jego średnicy), a wyjście trzeciego elementu porównania podłączone jest do wejścia kolejno włączonych bloków: drugiego wzmacniacza mocy i napędu elektrohydraulicznego małych przemieszczeń wierzchołka noża wzdłuż osi Y do korekcji jego położenia w procesie toczenia.

Istota opracowanej technologii polega na zmianie kolejności kontroli i sterowania procesem obróbki mechanicznej wałów długowymiarowych, przy czym osiowa siła sterująca nie oddziałuje na półfabrykat, jak we wcześniejszych znanych sposobach obróbki [111] – półfabrykat ściskano lub rozciągano osiową siłą, stabilizując ją tak, aby powstające wydłużenia półfabrykatu nie wywoływały osiowych naprężeń szczątkowych, a więc nie doprowadzały do odkształceń gotowych wyrobów.

Znane rozwiązania techniczne bazują na dziedziczności technologicznej części o małej sztywności oraz na teorii zjawisk sprężysto - plastycznych zachodzących w metalu w czasie obróbki mechanicznej [118]. Kontrola aktywna rozszerzalności objętościowej półfabrykatu w czasie skrawania oraz sterowanie osiową siłą ściskającą uniemożliwia tworzenie się osiowych naprężeń szczątkowych, niezależnie od właściwości fizykomechanicznych i cech geometrycznych półfabrykatów.

Schemat funkcjonalny układu sterowania automatycznego dokładnością obróbki wałów długowymiarowych przedstawiono na rys. 6.11 [31]. Układ sterowania zawiera konik 1, w który jest wbudowany węzeł dynamometryczny 2. Zawiera on: kiel dynamometryczny 3; element sprężysty 4 przyjmujący obciążenie osiowe; przetworniki wstępne 5, 6, 7 zainstalowane odpowiednio wzdłuż osi współrzędnych X, Y; wzmacniacz różnicowy 8, na którego wejście kierowany jest sygnał z przetworników wstępnych 5, 6, 7 a wyjście tego wzmacniacza podłączone jest do obwodów kolejno połączonych bloków; pierwszy wzmacniacz wyskalowany 9; nastawnik siły osiowej 10; element porównania 11; wzmacniacz mocy 12; napęd elektryczny 13. Jednocześnie sygnał wyjściowy z pierwszego wzmacniacza wyskalowanego 9 kierowany jest do drugiego kanału korekcji głębokości skrawania, który zawiera drugi wzmacniacz wyskalowany 14, blok typu „strefa nieczułości” 15, drugi element porównania 16, nastawnik głębokości skrawania 17, trzeci element porównania 18, czujnik 19 sprzężenia zwrotnego położenia wierzchołka noża, drugi wzmacniacz mocy 20, napęd elektrohydrauliczny 21 promieniowych przemieszczeń noża.



Kształtowanie sygnału użytecznego w celu stłumienia oddziaływań zakłócających wywołanych odkształceniami termiczno-siłowymi kła obrotowego w płaszczyźnie YOZ realizowane jest drogą rejestracji odkształceń składowych statycznych i dynamicznych przez przetworniki wstępne 6 i 7 oraz wzmacniacz różnicowy 8, którego sygnał wyjściowy zmienia współczynnik wzmocnienia wzmacniacza wyskalowanego 9 w funkcji zmiany podatności statycznej i dynamicznej kła dynamometrycznego 3 we wskazanym układzie współrzędnych. Odkształcenia termiczne w kierunku osi X, rejestrowane przetwornikiem wstępnym 5 i przekształcone w sygnały elektryczne, kierowane są na wzmacniacz wyskalowany 9,

w którym zachodzi normowanie sygnału wyjściowego przetwornika wstępnego 5, poprzez zmianę jego współczynnika wzmocnienia. Sygnał na wyjściu wzmacniacza wyskalowanego 9, funkcjonalnie związany z osiowymi odkształceniami termicznymi półfabrykatu, steruje wielkością siły osiowej podpierającej półfabrykat w przyjętym zakresie nastawnika 10 odkształceń osiowych. Zadana osiowa siła podparcia kłem zachowuje swoją wartość w czasie całego procesu obróbki, niezależnie od geometrycznych i fizyko-mechanicznych parametrów półfabrykatu oraz warunków temperaturowych obróbki.

Półfabrykat, wydłużając się, nie jest dodatkowo obciążony osiową siłą zewnętrzną wynikającą z rozszerzalności termicznej. Sygnały nastawnika 10 i bloku 9 kierowane są na element porównania 11, z którego sygnał różnicowy proporcjonalny do sygnału sterowania kierowany jest na wzmacniacz mocy 12, a następnie na napęd elektrohydrauliczny 13, który z kolei przemieszcza kiel dynamometryczny 2 względem konika 1 o wielkość proporcjonalną do odkształcenia półfabrykatu wywołanego odkształceniem termicznym, podtrzymując tym samym, siłę podparcia półfabrykatu zadaną nastawnikiem 10.

Jednocześnie w funkcji ukształtowanego sygnału sterowania zdejmowanego z wyjścia wzmacniacza wyskalowanego 9, korygowana jest wielkość głębokości skrawania z uwzględnieniem odkształceń termicznych półfabrykatu poprzez oddziaływanie na nóż. Ta zmiana zadana jest napięciem na wyjściu nastawnika 17 napędu korekcji głębokości skrawania, przez kolejno połączone: wzmacniacz wyskalowany 14, blok typu „strefa nieczułości” 15, element porównania 16. Wielkość korygującego sygnału sterowania w procesie nastawienia układu osiągnięta jest w wyniku zmiany współczynnika wzmocnienia wzmacniacza wyskalowanego 14, a wielkość strefy nieczułości 8 obierana jest tak, aby sygnał sterowania na jego wyjściu pojawił się tylko wówczas, gdy temperatura półfabrykatu bezpośrednio w czasie obróbki wzrośnie o $15^0\text{-}20^0$ C względem temperatury otoczenia. Sygnał sterowania – korekcji wierzchołka noża z uwzględnieniem rozszerzalności termicznej półfabrykatu, z wyjścia elementu porównania 16 kierowany jest na wejście elementu porównania 18, gdzie porównywany jest z sygnałem sprzężenia zwrotnego położenia wierzchołka noża od wstępnego przetwornika 19, zainstalowanego na suporcie obrabiarki. Sygnał różnicowy na wyjściu elementu porównania 18, kierowany jest na wejście drugiego wzmacniacza mocy 20, a następnie na napęd elektrohydrauliczny 21.

Zapewnienie powyższych warunków i kolejności działań, z uwzględnieniem stabilizacji odkształceń osiowych obwodu siłowego konika i korekcji głębokości skrawania, umożliwia stabilizację głębokości stanu naprężeniowo-odkształceniowego warstwy wierzchniej. Pozwala

otrzymać części o zadanej dokładności w kierunku wzdłużnym i poprzecznym i jednocześnie zachować otrzymaną dokładność w procesie eksploatacji.

6.5. Obróbka wibracyjna wałów o małej sztywności

Zagwarantowanie odpowiedniej tolerancji wymiarów wałów o małej sztywności, o stosunku długości do średnicy powyżej 10 jest niemożliwe bez zmniejszenia naprężeń wewnętrznych - naprężeń technologicznych początkowych i szczątkowych w odpowiednich przekrojach części. Szczególnie istotne jest to w przypadku stali nierdzewnych, gdzie oprócz naprężeń szczątkowych, spowodowanych czynnikami siłowymi i temperaturowymi, występują naprężenia szczątkowe spowodowane zmianami strukturalnymi.

Znane metody cieplne obniżania naprężeń szczątkowych (wyżarzanie, odpuszczanie, starzenie sztuczne) są kosztowne i energochłonne, natomiast obróbka wibracyjna charakteryzuje się małą energochłonnością, jest prosta i ekonomiczna.

Proces obróbki wibracyjnej polega na zastosowaniu zmiennych według znaku obciążeń o określonej amplitudzie, częstotliwości i kształcie drgań. Efektywność obróbki wibracyjnej można zwiększyć w oparciu o diagnostykę procesów relaksacyjnych w procesie drgań oraz sterowanie przy uwzględnieniu parametrów technologicznych, zawierających nie tylko częstotliwość i amplitudę obciążenia harmonicznego, lecz również rozmieszczenie podpór i wibratora wzdłuż wału, wykorzystanie mas dodatkowych ze sterowalnymi współczynnikami sztywności i ich powiązań z półfabrykatem.

Przejście struktury metalu w stan równowagi następuje przy wzroście jego energii ogólnej w wyniku przekazanej mu energii w postaci cieplnej lub mechanicznej.

Należy przy tym analizować zmianę naprężeń szczątkowych pierwszego rodzaju, określających geometrię części, na którą właśnie one wpływają.

W przypadku, kiedy suma naprężeń szczątkowych i naprężeń pochodzących od obciążenia cyklicznego przewyższy granicę proporcjonalności odkształceń mikroplastycznych, naprężenia szczątkowe ulegają zmniejszeniu. Przy tym, w wyniku efektu Bauschingera, granica proporcjonalności przy obciążeniach cyklicznych jest niższa o 20% niż przy statycznych.

Proces relaksacji naprężeń powiązany jest z mikroskopijnymi przemieszczeniami wskutek energii dostarczanej przez drgania. Największe naprężenia mechaniczne powstają w strefach maksymalnych odkształceń sprężystych, to znaczy w strefach przeciwwęzłów. Relaksacja

naprężeń przebiega w nich bardziej intensywnie niż w węzłach drgań. Odształcenia nierównomiernie rozkładają się wzdłuż półfabrykatu.

Energia drgań w materiale półfabrykatu ulega rozproszeniu, przekształcając się w energię cieplną. Część energii sprężystej odkształceń przechodzi w energię odkształceń plastycznych i prowadzi do relaksacji naprężeń szczytkowych. Im większa jej ilość jest pochłaniana przez materiał półfabrykatu, tym intensywniej 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 ciepłą określany jest tarciem wewnętrznym, które charakteryzuje się współczynnikiem pochłaniania ψ [26]:

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (6.15)$$

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 można określić według zależności:

$$Q^{-1} = c \frac{I}{\varphi_0 \cdot \nu_0^2}, \quad (6.16)$$

gdzie: c – stała, I – natężenie prądu napędu wibratora, φ_0 – amplituda rezonansowa odkształceń, ν_0 – częstotliwość rezonansowa.

Przy diagnostyce procesu obróbki wibracyjnej, w oparciu o zmianę natężenia prądu, kontrolowana jest relaksacja naprężeń, związana ze zmianą tarcia wewnętrznego. Diagnostyka temperaturowa procesu daje możliwość sterowania parametrami technologicznymi stanowiska, umożliwia 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 maksymalnej amplitudy odkształceń na odcinkach rezonansowych.

Obróbka wibracyjna półfabrykatu może być prowadzona przy wykorzystaniu różnorodnych drgań: zginających, wzdłużnych i skręcających. Wykonano stanowisko do obróbki wibracyjnej wałów o małej sztywności, umożliwiające wykorzystanie wszystkich form drgań.

Zastosowano wibrator elektromechaniczny jako najprostszy w sterowaniu i nie stawiający wysokich wymagań eksploatacyjnych.

Oddziaływanie na półfabrykat realizowane jest 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 - skrętne przy pomocy przemiennika falowego, wykonanego w postaci pręta z rowkiem śrubowym [85], który na sztywno zamocowany jest na półfabrykacie. Działanie wibratora elektromechanicznego i rowka śrubowego przemiennika falowego powoduje, że przemieszczenie wzdłużne czoła, na które działa wibrator, przekształcane jest w kompleksowe drgania wzdłużno - skrętne półfabrykatu.

Wibrator kompleksowych drgań skręcająco - zginających mocowany jest 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. 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 umieszczany 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 na wysokich częstotliwościach roboczych umożliwia zastosowanie dodatkowych mas, zamocowanych sprężystość 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 więc, aby w każdym przekroju poprzecznym wału przy danej częstotliwości rozmieszczony był przeciwwęzeł drgań o przykładowo równej amplitudzie.

Przy obróbce partii półfabrykatów jako dodatkową masę można zastosować element, podwieszony do półfabrykatu, do którego przymocowany jest wibrator (do drgań zginających). W wyniku 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). Po pierwsze, wibrator nie powinien tworzyć przegubów plastycznych, 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 plastyczności. Przy tym rozkład stanu naprężonego, powstałego w przekroju poprzecznym półfabrykatu, nie jest równomierny z powodu oddziaływania ciężaru półfabrykatu i wibratora. Po drugie, miejsce umieszczenia wibratora uzależnione jest od częstotliwości roboczej obróbki. Częstotliwość oddziaływania wibracyjnego wybierana jest z uwzględnieniem częstotliwości drgań własnych półfabrykatu. Najbardziej efektywna jest obróbka materiału przy drugiej lub trzeciej harmonice drgań własnych półfabrykatu. Jeżeli specyfika konstrukcyjna półfabrykatu powoduje, że ma on niskie częstotliwości własne, to obróbka wibracyjna może być realizowana na trzech harmonikach, ale większość półfabrykatów można obrabiać na dwóch harmonikach. Ustawienie wibratora w miejscach przeciwwęzłów gwarantuje maksymalną amplitudę 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 zmieniana jest przy pomocy bloku sterowania (przekształtnika częstotliwościowego), w sposób płynny od zera do maksymalnie możliwej wartości. Określane są częstotliwości rezonansowe, przy których częstotliwość oddziaływania nie wzrasta. Obróbka wykonywana jest do momentu zmniejszenia przy każdej z częstotliwości rezonansowej siły prądu o 15-20%. Obróbką wibracyjną można sterować według prędkości przemieszczania się szczytu rezonansowego [88], rejestrując ekstremum mocy napędu i prędkość jego zmiany. Jeżeli siła prądu nie zmniejsza się lub prędkość przemieszczenia ekstremum zmniejsza się poniżej ustalonej granicy, obróbka na danej

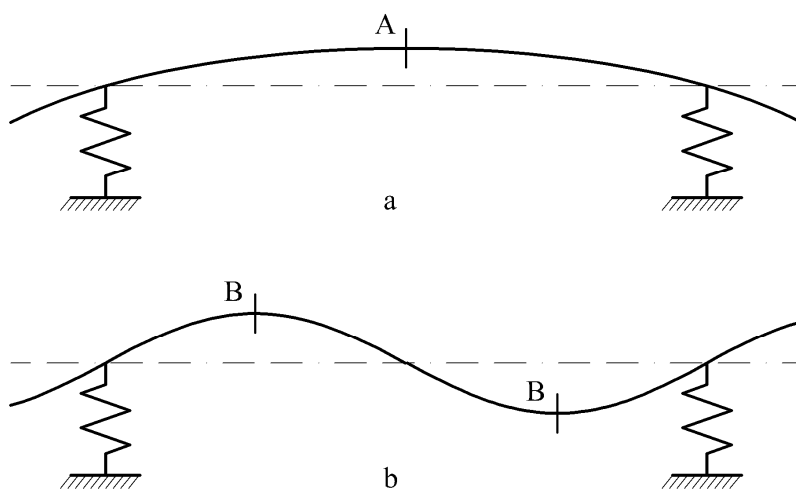
częstotliwości jest kończona. Zmniejsza się płynnie częstotliwość oddziaływania do zera, rejestrując zmianę częstotliwości własnych, po czym wibrator ustawiany jest w innym przekroju.

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 kształtowana jest podobnie jak umocniona warstwa wierzchnia półfabrykatu.

Główny efekt obróbki wibracyjnej zostaje osiągnięty drogą doboru częstotliwości rezonansu drgań. Obróbka na wyższych składowych harmonicznym jest bardziej efektywna ponieważ współczynnik pochłaniania wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości drgań własnych, z którymi wchodzi w rezonans obciążenie wymuszające [26].

$$\psi = \frac{2\pi \cdot \eta}{E} v_n, \quad (6.17)$$

gdzie: η - współczynnik ciągliwości materiału; v_n - częstotliwość drgań własnych, n - ta składowa harmoniczna.



Rys. 6.12. Miejsca lokalnego nagrzania w czasie obróbki wibracyjnej w ciągu 1 min:
a – z częstotliwością 39 Hz, b – z częstotliwością 98 Hz

Chociaż amplituda rezonansu posiada mniejszą wartość na wyższych składowych harmonicznym, przygotowanie półfabrykatu w kierunku wzdłużnym przebiega bardziej równomiernie.

Energia wnoszona określona jest parametrami napędu wibratora. Dzięki znanej mocy napędu elektromechanicznego i sprawności multiplikatora określona jest ilość energii drgań wnoszonej do półfabrykatu. Wg wysokości temperatury 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 harmonicznej z amplitudą $F = 400N$ i częstotliwością $f = 1...120$ Hz w czasie jednej minuty nastąpiło lokalne nagrzanie półfabrykatu w miejscach przesunięcia węzłów fali, powodujące wzrost temperatury w stosunku do otoczenia (około 20^0C) do 90^0C (temperatura maksymalna).

W węzłach przesunięć temperatura wzrosła nieznacznie. W czasie obróbki z częstotliwością 39 Hz rozgrzanie nastąpiło w przekroju A (rys. 6.12a). Przy obróbce z częstotliwością 98 Hz rozgrzanie nastąpiło w przekroju B (rys. 6.12b). Po 10 minutach obróbki wibracyjnej temperatura wału wzdłuż jego osi stopniowo wyrównywała się dzięki przewodności cieplnej. Kontrola położenia stref nagrzania pozwala określić miejsca relaksacji naprężeń.

Z punktu widzenia częstotliwości oddziaływania obróbka na wyższych częstotliwościach harmonicznych jest bardziej efektywna, ponieważ współczynnik absorpcji ulega zwiększeniu ze wzrostem częstotliwości harmonicznej własnej, z którą rezonuje obciążenie zakłócające:

$$\psi = \frac{2\pi \cdot \eta}{E} \nu_n, \quad (6.18)$$

gdzie η - współczynnik lepkości materiału, ν_n - częstotliwość własna n-tej składowej harmonicznej.

Przy obróbce wibracyjnej na wyższych harmonikach rozkład węzłów i przeciwwęzłów wraz z długością półfabrykatu jest częstszy. Amplituda rezonansowa 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. Z drugiej strony, aby uzyskać rezonans przy wyższych harmonikach, należy zastosować wibrator wysokoobrotowy. Zwiększenie niewyważenia, niezbędne do zwiększenia amplitudy drgań, ograniczone jest przyczynami konstrukcyjnymi (obciążenie łożysk, ograniczona moc napędu), co oznacza, że aby uzyskać maksymalną relaksację naprężeń szczątkowych T, 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, mas dodatkowych zamocowanych sprężystości na półfabrykacie oraz ich rozmieszczenia,

a także częstości oddziaływania na położenie stref przeciwwęzłów i węzłów drgań zginających, jako maksymalnie wpływających na relaksację naprężeń.

Przy sterowaniu macierzowym wiążącym przekroje graniczne, przyjęto podpory sprężyste [53]:

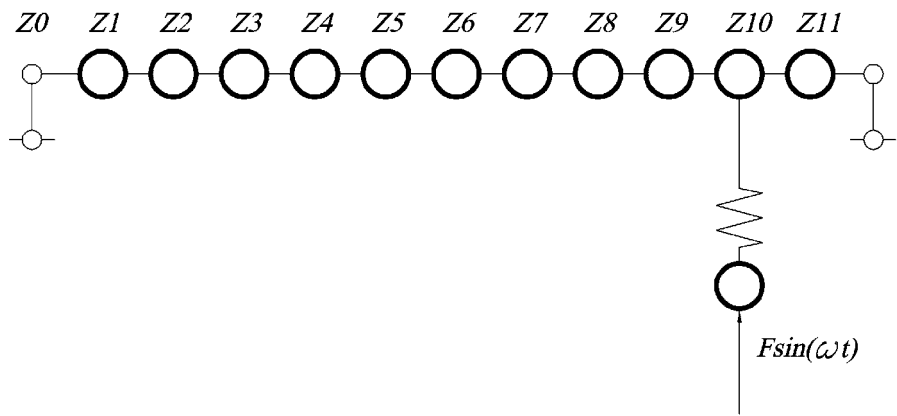
$$\begin{pmatrix} y_n \\ \varphi_n \cdot l \\ \frac{M_n \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{F_n \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ \varphi_0 \cdot l \\ \frac{M_0 \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{F_0 \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}, \tag{6.19}$$

gdzie: EJ - sztywność na zginanie odcinka wału;

l - długość wału;

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

a_{jk} – współczynniki macierzy przekoszenia.



Rys. 6.13. Schemat obliczeniowy obróbki wibracyjnej

Wibrator oddziałujący siłą zmienną na półfabrykat przyjmowany jest jako masa sprężystie podwieszona do wału (rys.6.13). Współczynnik sztywności powiązania masy i wału określany jest wielkością zaciśnięcia mechanizmu mocującego i jego specyfiką konstrukcyjną. Amplituda siły określana jest wielkością niewyważenia masy mimośrodowej.

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

$$Y_i = J_i Y_{i-1} + \Lambda_i, \quad (6.20)$$

gdzie:

$$\Lambda_i = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{A_i \cdot c_i \cdot l^3}{EJ(-m_i \cdot \omega^2 + c_i)} \end{pmatrix}, \quad (6.21)$$

gdzie: A_i - amplituda siły harmoniczej zmieniająca się z częstotliwością ω ;

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

c_i - współczynnik sztywności zamocowania sprężystego.

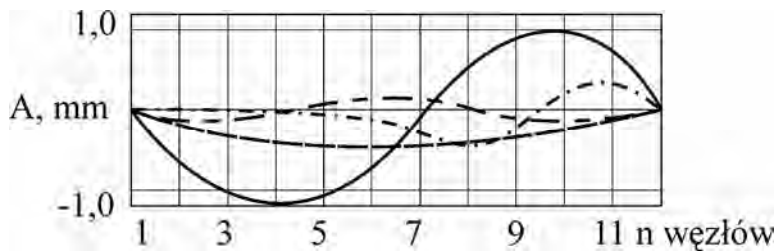
$$J_i = \begin{pmatrix} 1 & h_i & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} & \frac{h_i^3}{6 \cdot u_i} \\ 0 & 1 & \frac{h_i}{u_i} & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ \tau_i & \tau_i \cdot h_i & \frac{\tau_i \cdot h_i^2}{2 \cdot u_i} & 1 + \frac{\tau_i \cdot u_i^3}{6 \cdot u_i} \end{pmatrix}, \quad (6.22)$$

gdzie: $h_i = l_i/l$, gdzie l_i - długość i -go odcinka, l - długość całej części; $u_i = EJ_i/EJ$, gdzie EJ_i -

sztywność 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.

Przy zastosowaniu danego algorytmu stosującego metodę parametrów początkowych w postaci macierzowej, przeanalizowano przy zastosowaniu programu Mathcad obróbkę wibracyjną w przypadku różnych schematów ustawienia półfabrykatu i parametrów obciążenia.

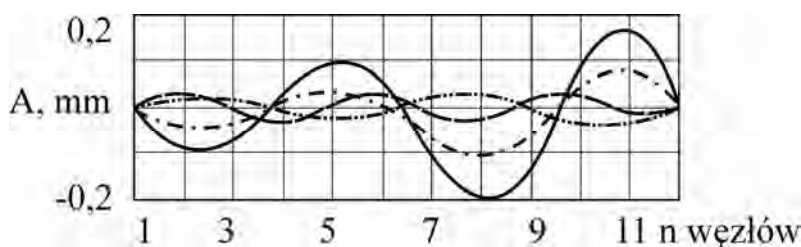


Rys. 6.14. Ugięcia osi półfabrykatu w różnych warunkach obróbki (częstotliwości):

- a) drgania o częstotliwości $\omega=2$ rad/s, siła zakłócająca $F=10$ N, $m=5$ kg, sztywność powiązania $k=100000$ N/m, węzeł rozmieszczenia wibratora;

- b) $\omega=5 \text{ rad/s}$, $F=10\text{N}$, $m=5\text{kg}$, $k=100000 \text{ N/m}$;
 c) $\omega=5 \text{ rad/s}$, $F=100\text{N}$, $m=5\text{kg}$, $k=1000 \text{ N/m}$;
 d) $\omega=15 \text{ rad/s}$, $F=100\text{N}$, $m=5\text{kg}$, $k=100000 \text{ N/m}$.

Metodą parametrów początkowych uzyskano ugięcia osi półfabrykatu przy różnych parametrach technologicznych obróbki wibracyjnej [86], przedstawione na rys. 6.14 i 6.15.



Rys. 6.15. Ugięcia osi półfabrykatu dla różnych warunków obróbki (położenia wibratora

i zastosowania mas dodatkowych): e) $\omega=25 \text{ rad/s}$, $F=100\text{N}$, $m=5\text{kg}$, $k=100000 \text{ N/m}$, Z10, węzeł zamocowania dodatkowej masy Z5 (-----); f) $\omega=25 \text{ rad/s}$, $F=100\text{N}$, $m=5\text{kg}$, $k=100000 \text{ N/m}$, Z10 (— — —); g) $\omega=25 \text{ rad/s}$, $F=100\text{N}$, $m=8\text{kg}$, $k=100\text{N/m}$, Z6, węzły zamocowania mas dodatkowych Z3, Z10 (— · — · —); h) $\omega=25 \text{ rad/s}$, $F=100\text{N}$, $m=25\text{kg}$, $k=1000\text{N/m}$, Z6; węzeł zamocowania masy dodatkowej Z4 (—)

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

W procesie badania urządzenia w OAO „Azotremmasz” ustalono, że przy oddziaływaniu na wał harmonicznego siły zakłócającej o amplitudzie $F=400 \text{ N}$ o różnych częstotliwościach rezonansowych w czasie około jednej minuty półfabrykat nagrzewa się lokalnie w miejscach przeciwwęzłów przemieszczania harmoniki od temperatury pokojowej (około 20C^0) do 90 C^0 (temperatura maksymalna). W węzłach przemieszczeń temperatura zwiększa się nieznacznie. Po 10 minutach obróbki wibracyjnej temperatura na długości wału stopniowo wyrównuje się dzięki przewodności cieplnej, przy zachowaniu różnicy w przeciwwęzłach i węzłach od 2 do 4C^0 .

Kontrola położenia stref rezonansu umożliwia określenie miejsc najbardziej intensywnej relaksacji naprężeń i sterowanie ich przemieszczeniami w wyniku zastosowania mas dodatkowych. Zmieniając parametry technologiczne obróbki wibracyjnej (częstość oddziaływania, sztywność i inercyjność półfabrykatu) można sterować stopniem obróbki każdego jego odcinka, kontrolując położenie i przemieszczenia stref nagrzewania wstępnego, to znaczy stref przeciwwęzłów.

Obróbka wibracyjna przy zastosowaniu wibratora elektromechanicznego w OAO „Azotremmasz” okazała się bardziej efektywna niż operacje obróbki cieplnej, umożliwiając zmniejszenie poziomu naprężeń w częściach o małej sztywności typu wały - wirników. Paczenie wału zmniejsza się od 1,5 do 2 razy w porównaniu z obrobionym zgodnie z technologią tradycyjną.

WNIOSKI

1. Na podstawie opracowanych modeli matematycznych operacji składowych można zaprojektować proces technologiczny, umożliwiający zmniejszenie naprężeń szczątkowych oraz zwiększenie dokładności wytwarzanych wałów.
2. Badania stanu naprężeniowo-odkształceniowego wałów w czasie obróbki wykazały, że podstawowym czynnikiem powodującym wypaczenie wałów jest usuwanie nierównomiernie rozłożonych, względem osi półfabrykatu, naddatków. Wypaczenie jest wprost proporcjonalne do wielkości przemieszczenia naddatku. Kierunek wypaczenia jest taki, że strona, po której usunięto większy naddatek staje się wklęsłą.
3. Opracowano zależność analityczną, określającą wielkość oczekiwanego odkształcenia półfabrykatów, o parabolicznym rozkładzie osiowych naprężeń szczątkowych, w czasie usuwania naddatku o zmiennej grubości. Wykazano, że wielkość odkształcenia nie zależy od średnicy obrabianej części. Głównym parametrem określającym odkształcenie jest przemieszczenie nakiełków względem osi półfabrykatu. Uzyskana zależność jest zgodna z wynikami badań eksperymentalnych.
4. Opracowano metodykę określania dziedziczności technologicznej niedokładności obróbki wałów, uwzględniającą ich wytrzymałość relaksacyjną. Ustalono, że istnieje zależność między wytrzymałością relaksacyjną, wyjściową niedokładnością półfabrykatu i powstającymi odkształceniami. Jeżeli po obróbce niezrównoważone, zbędne naprężenia są mniejsze od wytrzymałości relaksacyjnej to powstają odkształcenia sprężyste, jeżeli większe –sprężysto plastyczne.
5. Na podstawie badań statystycznych dokładności obróbki wałów w zakładach budowy maszyn stwierdzono, że faktyczna dokładność obróbki nie odpowiada wymaganiom określonym w dokumentacji konstrukcyjnej (najmniej dokładne jest bicie promieniowe). Spowodowane jest to głównie naruszeniem równowagi naprężeń szczątkowych, kształtujących się w całym cyklu obróbki, prowadzącym do wypaczenia części.
6. Niedokładność obróbki wałów przy standardowej kolejności operacji (skrawania, obróbki cieplnej, prostowania i sezonowania) charakteryzuje się określoną cyklicznością, dotyczy więc nie pojedynczych operacji, lecz każdego powtarzającego się cyklu obróbki.
7. Opracowano metodykę projektowania procesów technologicznych obróbki wałów z uwzględnieniem prognozowania wypaczenia umożliwiającą: zredukowanie liczby

cykli w wyniku zastosowania nowych rozwiązań technicznych; określenie oczekiwanego odkształcenia w oparciu o uzyskane zależności analityczne.

8. W wyniku badań eksperymentalnych stwierdzono, że zwiększenie przesunięcia nakiełków przed operacją toczenia, powoduje, że przy frezowaniu niedokładność rowków, spowodowana naprężeniami szczątkowym, na wypukłej powierzchni wału wzrasta oraz maleje, przy ich obróbce po przeciwległej stronie.
9. Badania eksperymentalne stanu naprężeniowego powierzchni próbek, wykonanych ze stali 15NiCr3, po szlifowaniu zrealizowano przy zastosowaniu eksperymentu czynnikowego typu 2^3 . Z opracowanego równania regresji wynika, że największy wpływ na wielkość naprężeń szczątkowych ma posuw wzdłużny, a najmniejszy prędkość obrotowa części.
10. Wpływ naprężeń szczątkowych na dokładność wytwarzania wałów można zmniejszyć w wyniku zastosowania: hydraulicznej podtrzymki samocentrującej, układu stabilizacji przekroju warstwy skrawanej, układu regulacji odkształceń cieplnych oraz obróbki wibracyjnej.

LITERATURA

- [1]. Abramov V.V.: *Ostatocnyye napryazheniya i deformacii v metallakh*. M.: Maszgiz, 1963. - 355 s.
- [2]. Абакумов А. М., Тараненко В.А., Тараненко Г. В.: Патент РФ на изобретение RU № 2162770 C2 *Задняя бабка токарного станка*. В23В 23/00 Бюл. № 4, 2001.
- [3]. Adler S.P., Jurkova E.V., Granovskij J.V.: *Planirovanie ehksperimenta pri optimalnykh uslovijakh*. M.: Nauka, 1976. - 276s.
- [4]. Andreev A.V.: *Inzhenernye metody opredeleniya koncentracii naprâženij v detaljakh mashin*. Mashinostroenie, 1976 . 67 s,
- [5]. Arhipov A.N.: *Opredelenie ostatocnyh naprâženij v steržnâh maloj krivizny*. - *Problemy pročnosti* 1977. KZ, s.49-53.
- [6]. Arhipov A.N.: *Opredelenie ostatocnyh naprâženij v steržnâh bolšej krivizny*. *Problemy pročnosti* 1978, М«- s. 69-73.
- [7]. Banasiak H., Gołąbczak A.: *Obróbka skrawaniem, ścierna i erozyjna*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej 1996.
- [8]. Barbacki A.: *Metaloznawstwo dla mechaników*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1993.
- [9]. Bartosiewicz J.: *Obróbka skrawaniem oraz elementy obrabiarek*. Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 1997.
- [10]. Birger I.A.: *Ostatocnyye naprâženiâ*. M.: Mašgiz, 1963. s. 230.
- [11]. Birger I.A., Kozlov M.L.: *Ostatocnyye naprâženiâ: problemy i perspektivy*. *Materialy Š Vsesoûznogo simpoziuma "Tehnologičeskie ostatocnyye naprâženiâ"* M.: 1988., s. 388.
- [12]. Błaziński B.: *Metrologia warsztatowa*. Wrocław, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej 1986.
- [13]. Borozdyka A.M., Gecov L.B.: *Relaksaciâ naprâženij v metallah i splavah*. M.: Metallurgii, 1978, s. 256.
- [14]. Bubnicki Z.: *Identyfikacja obiektów sterowania*. Warszawa, PWN 1974.
- [15]. Burakowski T., Wierzchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*. Warszawa, WNT 1998.
- [16]. 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.
- [17]. 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.

- [18]. Bukatj SA.: *Issledovanie deformacij detalej, vozniakaûših posle obrabotki poverhnosti*. Avtoref. Dis.kand.tehn.nauk-Kujbyšev, 1979, s.18.
- [19]. Choroszy B.: *Technologia maszyn*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2000.
- [20]. Cichosz P.: *Narzędzia skrawające*. Warszawa, WNT 2006.
- [21]. Davidenkov N.N.: *Dinamičeskaâ pročnost i hrupkost metallov*. Izbrannye trudy tom. I Kiev: "Naukova dumka", 1981, s. 699.
- [22]. Davidenkov N.N.: *Mehaničeskie svojstva materialov i metody izmereniâ deformacij*. Izbrannye trudy. Tom 2. Kiev: "Naukova dumka" 1981, s. 651.
- [23]. D'âčenko P.E. Smuškova T.V.: *Ostatočnye naprâženiâ v poverhnostnyh sloâh metalla i ego iznosostojkost'*. "Vestnik mašinstroeniâ", 1955, s. 8.
- [24]. Dmochowski J.: Uzarowicz A.: *Obróbka skrawaniem i obrabiarki*. Warszawa, PWN 1984.
- [25]. Dobrzański L.: *Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach*. Warszawa, WNT 1996.
- [26]. Draczow O., Taranenko W., Hałas W., Taranenko G.: *Sterowanie obróbką wibracyjną wałów o małej sztywności*. Pomiary. Automatyka. Robotyka. Miesięcznik naukowo – techniczny, nr 2/2008, Warszawa 2008, s. 224 – 227.
- [27]. Draczow O., Taranienko G., Taranienko W., Świć A., Hałas W.: *Sterowanie obróbką wibracyjną wałów długowymiarowych*. Pomiary. Automatyka. Robotyka. Miesięcznik naukowo – techniczny, nr 2/2009, Warszawa 2009, s. 224 – 227.
- [28]. Draczow O., Taranenko G., Taranenko W., Świć A., Hałas W.: *Sterowanie układem dynamicznym obróbki części osiowosymetrycznych o małej sztywności*. Pomiary. Automatyka. Robotyka. Miesięcznik naukowo – techniczny, nr 2/2009, Warszawa 2009, s. 224 – 227.
- [29]. Draczow O., Taranenko W., Zubrzycki J., Hałas W.: *Stanowisko badawcze i układ sterowania automatycznego procesu obróbki wałów*. Przegląd Mechaniczny No.5/2007, Supplement. s. 53-55.
- [30]. Drachov.O., Taranenko V., Halas W., Taranenko G.: *Designing systems for controlling the accuracy of shafts machining*. MACHIN DESIGN 2008. / The editor of the monograph Sinisa Kuzmanovic. – Novi Sad: Faculty of Technical Sciences, Graphic Center - GRID. Novi Sad, 2008. – pp. 207 – 210
- [31]. Draczov O., Taranenko V., Świć A., Halas W.: *Controlling thermal deformations during mechanical shafts processing*. PROGRESSIVNYE TEKhnOLOGII I SISTEMY MASHINOSTROENIJa: Mezhdunarodnyjj sbornik nauchnykh trudov. – Doneck: DonNTU, 2007. Vypusk 34. – c. 278 – 283 .

- [32]. Feld M.: *Technologia budowy maszyn*. Warszawa, PWN 2000.
- [33]. Feld M.: *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*. Warszawa, WNT 2007.
- [34]. Filipowski R., Marciniak M.: *Techniki obróbki mechanicznej i erozyjnej*. Warszawa, Oficyna Wydawnicza PW 2000.
- [35]. Fung Y.: *Podstawy mechaniki ciała stałego*. Warszawa PWN 1969.
- [36]. Fujiwara H., Tanaka K.: *Residual Stresses III: Science and Technology*, Tom 1, Taylor & Francis 1990.
- [37]. Grzesik W.: *Podstawy skrawania materiałów metalowych*. Warszawa, WNT 1998.
- [38]. Hałas W., Taranenko W., Świć: *Analiza dokładności wytwarzania części typu „wał”*. Przegląd Mechaniczny No.12/2006, Suplement, s. 75 – 76.
- [39]. Hałas W., Taranenko W., Świć A.: *Kształtowanie struktury operacji procesu technologicznego obróbki wałów w CIM*. Przegląd Mechaniczny No.5/2007, Suplement, s. 62-65.
- [40]. Hałas W., Taranenko G., Taranenko W., Świć A.: *Systemowe podejście do modelowania operacji procesu technologicznego wytwarzania wałów*. Modelowanie inżynierskie, Tom 6, nr 37, 2009. Gliwice: Zakład Poligraficzny Politechniki Śląskiej 2009, s. 121 – 130.
- [41]. Hałas W., Taranenko G., Taranenko W., Świć A.: *Modelowanie poszczególnych operacji procesu technologicznego wytwarzania wałów*. Modelowanie inżynierskie, Tom 6, nr 37, 2009. Gliwice: Zakład Poligraficzny Politechniki Śląskiej 2009, s. 115 – 130.
- [42]. Hałas 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.
- [43]. Hałas W., Taranenko V., Świć A.: *Modelling the accuracy of axialsymetric shaft manufacturing..* PROCEEDINGS 31th CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING OF SERBIA AND MONTENEGRO 2006 . 19 – 21 September 2006, Kragujevac, Serbia and Montenegro, Kragujevac.2006, s. 305 – 310.
- [44]. 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
- [45]. Hałas W., Taranenko V., Swic A., Glinko H.: *Experimental resrarch on the extra surplus to the shafts processing accuracy* AVTOMATIZACIÂ: PROBLEMY, IDEI, REŠENIÂ: Materialy meždunar. naučn.-tehn. konf., g. Sevastopol, 12-17 sentâbrâ 2006 g. - Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2006, s. 143 -144.

- [46]. Hałas 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), October 9 – 10, 2008 – Szczecin, Poland. Szczecin, 2008. – pp. 245 – 250
- [47]. Hałas W., Taranenko W.: *Badania doświadczalne dokładności obróbki wałów w przemyśle maszynowym*. W: Zagadnienia pęknięcia i skrawania materiałów plastycznych. Monografia, red. Józef Jonak, Wyd. LTN, Lublin 2008. –Ss. 75 – 86
- [48]. Hałas W., Taranenko V.: *Rational choice of shafts technological process*. «PROGRESSIVNYE NAPRAVLENIÂ RAZVITIÂ MAŠINO-PRIBOROSTROITEL'NYH OTRASLEJ I TRANSPORTA Materialy meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh učenyh 14-18 maâ 2007, Sevastopol 2007, s. 141 – 143.
- [49]. Hałas W., Taranenko V., Świć A.: The technological inheritance impact in the holder manufacturing AVTOMATIZACIÂ: PROBLEMY, IDEI, REŠENIÂ: Materialy meždunar. naučn.- tehn. konf., 10-15 sentâbrâ 2007, Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2007, s. 5 – 7.
- [50]. Heyn E., Bauer O.: *International Zeitschrift für Metallographie*. 1911, Bd. 1 s. 16.
- [51]. Ivanov SI., Bukatyj S.A.: *Obšij metod opredeleniâ deformacij detali, vyzvannyh obrabotkoj poverhnosti "Izvestiâ vuzov. Mašinostroenie"*, 1981.
- [52]. Ignat'kov D.A.: *Opredelenie ostatočnyh naprâženij v kusočno-neodnorodnyh cilindrah*. - Problemy pročnosti, 1984,) №6 s. 54-58.
- [53]. Ivovich V. A.: *Perekhodnye matricy v dinamike uprugikh sistem*. M.: Mashinostroenie 1969 s. 199.
- [54]. Isaev A.I., Ovseenko A.N.: *Vybor optimal'noj tolšiny obrazca pri opredelenii ostatočnyh naprâženij v poverhnostnom sloe*. Vestnik mašinostroeniâ, D8, 1967.
- [53]. Jakubowicz A., Orłóś Z.: *Wytrzymałość materiałów*. Warszawa, WNT 1978.
- [56]. Jiann-Haw Liou: *Residual stress calculation in a machined stainless steel component using F.E.M*. University of Missouri-Columbia 1993.
- [57]. Jezierski J.: *Analiza tolerancji i niedokładności pomiarów w budowie maszyn*. Warszawa, WNT, 1994.
- [58]. Korn G. A., Korn T. M.: *Matematyka dla pracowników naukowych i inżynierów*. Warszawa, PWN 1983.
- [59]. Kobrin M.M., Dehtâr L.I.: *Opredeleniâ vnutrennih naprâženij v cilindričeskih detalâh*, M.: Mašinostroenie, 1965, s. 175.
- [60]. Kolot L.P.: *Razrabotka i issledovanie kompleksa tehnologičeskih metodov povyšeniâ točnosti formy nežestkih detalej*. Avtoref. dis. kand. tehn. nauk.-Minsk 1986, s. 19.

- [61]. Konstantinov L.S, Truhov A.P.: *Naprâženiâ, deformacii i trešiny v otlivkah.* - M.: Mašinostroenie, 1981, s. 197.
- [62]. Korzyński M.: *Metodyka eksperymentu.* Warszawa, WNT 2006.
- [63]. Korsakov V.S.: *Točnost' mehaničeskoj obrabotki.* MAŠGIZ, M. 1961, s. 378.
- [64]. Kocûbinskij O.Û.: *Stabilizaciâ razmerov čugunnyh otlivok.* M.: Mašinostroenie, 1974, s. 296.
- [65]. Kosmol J.: *Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem.* Warszawa, WNT 1995.
- [66]. Kacev P.G.: *Statističeskie metody issledovaniâ režušego instrumenta.* M.: Mašinostroenie, 1974, s. 238.
- [67]. Kukiełka L.: *Podstawy badań inżynierskich.* Warszawa, PWN 2002.
- [68]. Kuvaldin Û.I.: *Tehnologičeskie metody umen'sheniâ ostatočnyh deformacij izgiba na ètape predvaritel'noj obrabotki nežestkih valov.* Avtoref. Dis. kand.tehn.nauk, Moskva 1988, s. 16.
- [69]. Kuzûšip V.K.: *Rasčetnoe i èksperimentalnoe issledovanie točnosti mehaničeskoj obrabotki profilnyh častej rabočił lopatok poslednih stupenej parovyh turbin.* Avtoref. Dne. kand.tehn.nauk Čelâbinsk, 1978, s. 21.
- [70]. Kyo Â.P. *Opredelenie ostatočnyh naprâženij v pokrytiâh žestko zazemlennyh steržnej i plastinok metodom zamera deformacii.* Problemy pročnosti, 1975, №5 s. 53-56.
- [71]. Leonov V.A.: *Issledovanie ostatočnyh naprâženij i deformacij pri frezerovanii maložestkih detalej.* Avtoref. dis. kand. tehn.nauk. Irkutsk 1972, s. 21.
- [72]. Makarov A.D., Muhin V.S., Kišurov V.M.: *Ostatočnye poverhnostnye naprâženiâ pri obrabotke žaropročnyh splavov.* Tr. Ufinskogo aviacionnogo instituta. "Voprosy optimalnogo rezaniâ metallov", Ufa, 1972, vyp. 34.
- [73]. Matalin A.A.: *Točnost mehaničeskoj obrabotki i proektirovaniâ tehnologičeskih processov.* L., 1970.
- [74]. Niezgodziński M., Niezgodziński T: *Wytrzymałość materiałów.* Warszawa, PWN 2004.
- [75]. Niezgodziński T.: *Mechanika ogólna.* Warszawa, PWN 2006.
- [76]. Nowicki B.: *Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni.* Warszawa, WNT 1991.
- [77]. Nowak A.: *Grafy teoria i zadania.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2006.
- [78]. Oczóś K., Porzycki P.: *Szlifowanie: podstawy i technika.* Warszawa, WNT 1986.

- [79]. Ore O. Teorija grafov. Pod redakciej N. N. Vorob'eva. Moskva: Nauka 1968.
- [80]. Orłóś Z.: *Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń*. Warszawa, PWN 1977.
- [81]. Osiński Z.: *Teoria drgań*. Warszawa, PWN 1978.
- [82]. Ovseenko A.N.: *Opredelenie osevyh ostatočnyh naprâženij v cilindričeskih steržnâh metodom prodolnogo razreza*. "Problemy pročnosti, 1981, № 7.
- [83]. Ovseenko A.N.: *Tehnologičeskaâ nasledstvennost i ostatočnye deformacii maložestkih detalej. Povyšenno èkspluatacionnyh SEOJSTZ detalej mašin tehnologičeskimi metodami*. Irkutsk2 IZD-VO 1ŠN, 1980, s 15-22.
- [84]. Paczyński P.: *Metrologia techniczna*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2003.
- [85]. Patent Nr 2169058 RF, MKI V23V29/03. *Ustrojjstvo dlja obrabotki glubokikh otverstij*.
- [86]. Patent Nr 113583 *Sposob vibroobrabotkileтали* V. G. Gorenko i dr 1985 BI Nr 3.
- [87]. Podporkpn Z.G.: *Obrabotka nežestkih detalej*. M.:L: Mašgiz, 1959, s. 208.
- [88]. Postinkov V. S.: *Vnutrennee trenie v metallah*. M.: Metallurgija 1974 s. 23.
- [89]. *Progresspžšo tehnologičeskie processy mehanosboročnogo proizvodstva z turbostroenii* (naučnye redaktory A.N.Ovseenko, A,E.Borisoglebskij. M.: 1986, s. 69.
- [90]. *Praca zbiorowa: Poradnik metrologa warsztatowego*. Warszawa, WNT 1973.
- [91]. Puff T.: *Technologia budowy maszyn*. Warszawa, PWN 1982.
- [92]. Przybylski L.: *Strategia doboru warunków obróbki współczesnymi narzędziami*. Kraków, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2000.
- [93]. Rappen A.: *Minderung des Spannungsverzugs durch Vibration*. Ind. – Anz., 1971.
- [94]. Razrabotka i vnedrenie rekomendacii po snizhenii koroblenija detalejj: otchet NIIRTmash. Rukovoditel' V.A. Kolot. Inv № 0281.2.004482. Kramatorsk 1981, 78 s.
- [95]. Roliński Z.: *Tensometria oporowa*. Warszawa, WNT 1981.
- [96]. Promptov A.P.: *Ostatočnye išgrâženîa i deformacii pri obrabotke maložestkih detalej rezaniem*. /:ps.dokt. tehn. nauk -Kujbyšev, 1975, s. 543.
- [97]. Sachs G., Espey G.: *The iron age*. 1941, n 18, p.63.
- [98]. Sachs G., Espey G.: *Transaction of the American Institute of Mining and Metallurgical Engines*. 1942, vol. 147, p.348-360 .

- [99]. Sakwa W., Parkitny R.: *Übersicht über die Fundamentaluntersuchungen und Betrachtungen über die quantitative Analyse von Spannungen in Gußstücken*. Gießereitechnik, 1973, 19 Nr 4 122 – 129
- [100] Sautter W. Gruhl W.: *Grundlagen Metall* 1964, Bd (Band – tom)18, N3 S. 30 – 35.
- [101]. Schreiber W., Bühler H.: *Metall*. 1954, N 17/18.
- [102]. Sanboh L.: *Some internal stress problems in solids*. University of Rochester. College of Engineering and Applied Science, 1980.
- [103] Senczyk D.: *Naprężenia własne. Wstęp do generowania, sterowania i wykorzystania*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1996.
- [104] Senczyk D.: *Makronaprężenia*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1997.
- [105] Senczyk D.: *Rentgenowskie pomiary tensora naprężenia*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1998.
- [106] Senczyk D.: *Podstawy tensometrii rentgenowskiej*. Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2005.
- [107]. Sokolov I.A., Uralskij V.I.: *Ostatocnye naprâženiâ i kačestvo metalloprodukcii*. M.: Metallurgija, 1981, s. 96.
- [108]. Starkov V.K.: *Obrabotka rezaniem. Upravlenie stabilnostû i kačestvom v avtomatizirovannom proizvodstvie*. M.: Mašinostroenie. 1989, s. 294.
- [109]. Stäblein F.: *Monatszeitschrift*. 1931 Nr 12 s.10 -13.
- [110]. Styburski W.: *Przetworniki tensometryczne*. Warszawa, WNT 1971.
- [111]. Taranenko W., Świć A.: *Technologia kształtowania części o małej sztywności*. Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2005.
- [112]. Taranenko V., Świć A., Halas W.: *Modelling of axis-symetric shafts turning processing. AVTOMATIZACIJa: PROBLEMY, IDEI, RESHENIJa: Materialy mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf., g. Sevastopol', 12-17 sentjabrja 2006 g. - Sevastopol': Izd-vo SevNTU, 2006. – S. 15 – 16.*
- [113]. Tymowski J.: *Technologia budowy maszyn*. Warszawa, WNT 1989.
- [114]. Timofeev V.N.: *Ostatocnye naprâženiâ pervogo roda, voznikaûšie v poverhnostnom sloe stali pri točenii "Vestnik mašinostroeniâ"*, 1951, s. 12.
- [115]. Tehnologičeskie ostatocnye naprâženiâ. Pod red.A.V. Podzeâ M.: Mašinostroenie 1973.
- [116]. Wesołowski K.: *Metaloznawstwo i obróbka cieplna*. Warszawa, WNT 1981.

- [117]. Wiśniewski Stefan.: *Termodynamika Techniczna*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo Techniczne 1999.
- [118]. Âșeripyn P.I.: Ryžov È.Z.,Averčėnkov V.I. *Tehnologičeskaâ nasledstvennost v mašinostroenii*. Minsk, izd."Nauka i tehnika", 1977, s. 246.
- [119]. Šur D.M.: *Zavodskaâ laboratoria*. 1959, s.588-591.
- [120]. Èksperimental'nye metody issledovaniâ deformacii i Nadrenii. Spravočnoe posobie, Kiev, Naukova dumka 1981, s. 582.
- [121]. A.S. 13137 /NRB/ *Metod za uskorevane.na procesa relaksacie na napreženiâta na metalite čerez isdolzuvane na èlektro-hidravlična obrabotka*. /Balevsknj Angel Tončev, Kolez Lûbomir Canev, Cinkov Canko Iliev, Rafailov Lûbomir Petrov, Zasev Vaselin-Slavčev, opubl. 20.10.70
- [122]. Wysiecki M.: *Nowoczesne materiały narzędziowe*. Warszawa, WNT 1997.
- [123]. Wilson R.: *Wprowadzenie do teorii grafów*. Warszawa, PWN 2007.
- [124]. Vagner G.: *Osnovy issledovaniâ operacii*. T.1 M.: "Mir" 1972.
- [125]. Vasil'evyh L.A.: *Issledovanie sposoba točeniâ nežestkph valov s prednamerennym smešeniem sistemy stanok-instrument-detal*. Avtoref. Dis.kand. tehn.nauk - Gor'kij, 1969, s. 26.
- [126]. *Vibration zur Eigenspannungsreduzierung*. Maschinenbautechnik. 1972, 21,
- [127]. Young K. A.: *Machining-induced residual stress and distortion of thin parts*. Washington University 2005.
- [128]. Zamašikov Ŭ.I.: *Issledovanie processa formirovaniâ ostatočnyh naprâženij i deformacij pri nesvobodnom rezanii*. Avtoref. diskand.tehn.nauk, Novosibirsk, 1975, s. 26.

BADANIA WPŁYWU NAPRĘŻEŃ SZCZĄTKOWYCH NA DOKŁADNOŚĆ WYTWARZANIA WAŁÓW STRESZCZENIE

Uzyskanie wysokiej dokładności wytwarzania wałów jest zadaniem trudnym do osiągnięcia pomimo, że zakłady produkcyjne dysponują precyzyjnymi obrabiarkami gwarantującymi wysoką dokładność wymiarów i jakość powierzchni wytwarzanych części. Przyczyną tego są naprężenia szczątkowe powstające na każdym etapie procesu technologicznego powodujące wypaczenie części po kilku dniach od jego zakończenia. W pracy wykonano analizę wymagań jakości obróbki wałów, określonych dokumentacją techniczną oraz rzeczywiście uzyskanej jakości. Analiza ta potwierdziła istnienie zjawiska wypaczenia powodowanego naprężeniami szczątkowymi.

Rozpatrując proces technologiczny wykonania części jako jeden układ łączący wiele operacji opracowano modele matematyczne operacji: toczenia, obróbki cieplnej, frezowania rowków wpustowych, szlifowania, opisujące mechanizm powstawania naprężeń szczątkowych oraz ich wpływ na dokładność gotowego wyrobu.

Wyniki badań eksperymentalnych wpływu naprężeń szczątkowych na dokładność obróbki, potwierdzają obliczenia teoretyczne przeprowadzone w oparciu o opracowane modele matematyczne. Wykazano duży wpływ bicia nierównomiernego naddatku w czasie toczenia na powstawanie odkształceń szczątkowych. Wykonano badania w celu określenia udziału niedokładności związanej z wypaczeniem powstającym w czasie frezowania rowków wpustowych w ogólnej niedokładności obróbki. Analiza otrzymanych wyników wskazuje na możliwość wykorzystania przesunięcia nakielków przed poprzedzającą operacją toczenia do kompensacji odkształceń szczątkowych. Zbadano wpływ parametrów szlifowania na naprężenia szczątkowe. Otrzymane wyniki wskazują, że wielkość naprężeń szczątkowych powstających w czasie szlifowania zależy głównie od posuwu.

Na przykładzie obróbki precyzyjnych oprawek wykazano wpływ dziedziczności technologicznej na dokładność gotowego wyrobu. Zaproponowano nową technologię i kolejność operacji procesu technologicznego eliminującą szereg operacji obróbki cieplnej i pozwalającą zmniejszyć wpływ naprężeń szczątkowych na wypaczenie części.

Opracowano zalecenia praktyczne mające na celu zmniejszenie wpływu naprężeń szczątkowych na dokładność wytwarzania: zastosowanie hydraulicznej podtrzymki samocentrującej, układu stabilizacji przekroju warstwy skrawanej, układu regulacji odkształceń cieplnych. Uzasadniono teoretycznie celowość stosowania obróbki wibracyjnej wałów, polegającej na przyłożeniu obciążeń wywołujących drgania o określonych amplitudach i częstotliwościach. Kontrola położenia stref rezonansu umożliwia określenie miejsc występowania intensywnej relaksacji naprężeń. Zmieniając parametry obróbki wibracyjnej można sterować przemieszczeniem stref nagrzania każdego odcinka wału.

THE INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES ON THE PRECISION OF SHAFT MACHINING

ABSTRACT

Despite the fact that modern factories are in the possession of precise machine tools ensuring high accuracy in the size and quality of surface of machined parts, obtaining high precision of shaft machining is still a difficult task to fulfil. One of the main reasons behind such a situation are residual stresses arising on every stage of manufacturing process, which cause the part to warp within a few days after machining. This paper analyses the quality requirements of shaft machining, specified in technical documentation, and factual quality achieved in the process. The analysis confirmed the occurrence of warping as a result of residual stresses. Approaching the manufacturing process as a set of a number of operations, the mathematical models of following operations have been designed: turning, heat treatment, slot milling, grinding. The models describe the mechanism of residual stresses and their influence on the precision of the finished product. The results of experiments on the influence of residual stress on the accuracy of machining confirm the theoretical calculations based on the mathematical models. The experiments have also shown a considerable influence of non-uniform whipping of machining allowance on appearing residual deformations. The experiments were conducted to determine the part of the inadequacy connected with the warp appearing in slot milling in general inadequacy of machining. The results analysis indicates the possibility of moving the centre holes prior to the preceding turning in order to compensate for the residual deformations. Close examination of the influence of grinding parameters on residual stresses showed that what predominantly determines the volume of residual stresses is the rate of feed. The influence of technological heredity on the precision of the finished product was shown on the example of precise sockets machining. The paper introduces new technology and alters the order of technological process, which exclude a number of heat treatment operations allowing to decrease the influence of residual stresses on parts warping. The following practical instructions aimed at reducing the impact of residual stresses on the precision of machining have been introduced: using a hydraulic self-centring rest, cut area anti-rolling device, thermal deformation regulating device. It has been theoretically justified to apply vibration shaft machining, which consists in applying loads inducing vibration of specific amplitudes and frequencies. Resonant vibrations areas position control enables pinpointing the location of intense stress relaxation zones. By adjusting vibration machining parameters it is possible to control particular shaft section's heat zones.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ТОЧНОСТЬ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАЛОВ

АННОТАЦИЯ

Обеспечение высокой точности изготовления валов, несмотря на наличие прецизионных станков, гарантирующих точность размеров и качество поверхности обрабатываемых изделий, затрудняется наличие остаточных напряжений, которые возникают на всех стадиях технологического процесса, начиная с получения заготовки, и в дальнейшем наследуются при переходе от операции к операции. В работе представлена классификация остаточных напряжений и показаны пути их устранения. Проведены исследования требований точности и качества обработки валов в соответствии с технической документацией и фактической точности обработки на промышленных предприятиях. Анализ полученных данных свидетельствует о наличии явления коробления валов, вызванных остаточными напряжениями на всех стадиях технологического процесса.

На основе системного подхода к моделированию и управлению точностью обработки осесимметричных деталей для каждого технологического процесса, как целостной системы различных операций, входящих в этот процесс, разработаны математические модели операций точения, термической обработки, фрезерования шпоночных пазов, шлифования, учитывающие механизм появления остаточных напряжений на этих операциях, и их влияние на точность и эксплуатационные характеристики, изготавливаемого вала, как готового изделия.

Экспериментальные исследования влияния остаточных напряжений на точность обработки подтверждают теоретические исследования на разработанных математических моделях на различных операциях технологического процесса. Показано влияние неравномерного припуска на появление остаточных напряжений при точении. Предложено использовать эффект коробления на операции фрезерования шпоночных пазов для устранения влияния остаточных напряжений на точность готового вала. Исследовано влияние параметров шлифования на остаточные напряжения, при этом выявлено, что наибольшее влияние на их появление оказывает величина подачи. На примере обработки высокоточных оправок показано как влияет технологическая наследственность на точность изготовления этих деталей. Разработана и предложена новая технология и очередность операций технологического процесса, исключая ряд операций термической обработки и позволяющая уменьшить влияние остаточных напряжений на точность изготавливаемых изделий.

Разработаны практические рекомендации и конструкции устройств для уменьшения влияния остаточных напряжений на точность изготовления валов и их эксплуатационную точность: гидравлический самоцентрирующийся люнет, системы стабилизации сечения срезаемого слоя и управления тепловыми деформациями на операциях точения высокоточных валов. Теоретически обоснован и практически реализован метод вибрационной обработки валов, заключающийся в наложении знакопеременных нагрузок определенной амплитуды, частоты и формы колебаний. Повышение эффективности вибрационной обработки достигается за счет более равномерной проработки заготовки по ее длине путем диагностики релаксационных процессов в процессе колебаний и управления с учетом этого технологическими параметрами, которые включают в себя не только частоту и амплитуду гармонической нагрузки, но и положение опор и вибратора по длине вала, использования дополнительных масс с управляемыми коэффициентами жесткости их связей с заготовкой.