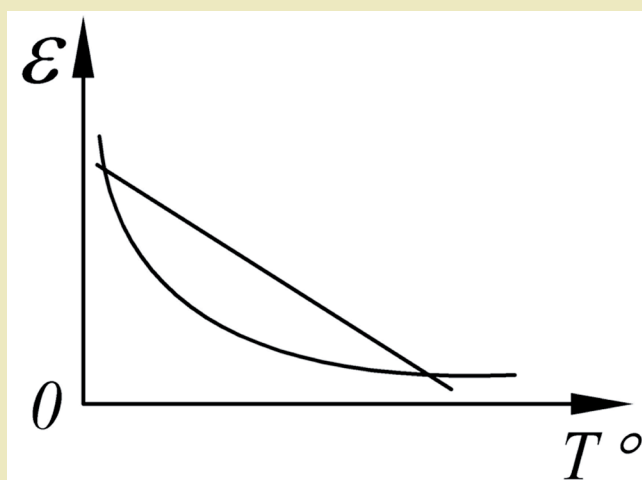




*Antoni Świć
Oleg Draczew
Wiktor Taranenko*

Zwiększenie dokładności części osiowosymetrycznych w wyniku obróbki cieplno-mechanicznej



Zwiększenie dokładności części
osiowosymetrycznych w wyniku
obróbki cieplno-mechanicznej

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Antoni Świć
Oleg Draczew
Wiktor Taranenko

Zwiększenie dokładności części osiowosymetrycznych w wyniku obróbki cieplno-mechanicznej



Politechnika Lubelska
Lublin 2013

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Włodimir G. Mitrofanow

dr hab. inż. Marek M. Janczarek, prof. Politechniki Lubelskiej

Redakcja i skład: Łukasz Wojciechowski

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2013

ISBN: 978-83-63569-87-7

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 80 egz.

SPIS TREŚCI

WSTĘP.....	7
1. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMATYKI BADAWCZEJ.....	8
1.1. Naprężenia szczątkowe w procesie technologicznym wykonania części.....	8
1.2. Procesy technologiczne stosowane do stabilizacji kształtu i wymiarów długich części o małej sztywności.....	14
2. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU TECHNOLOGICZNEGO OBRÓBKII CIEPLNO-MECHANICZNEJ.....	19
2.1. Założenia teoretyczne do obliczeń odkształcenia osiowego i naprężeń.....	19
2.2. Analiza teoretyczna i model matematyczny procesów obróbki cieplno-mechanicznej.....	32
2.3. Model układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej.....	43
2.4. Ocena analityczna prostoliniowości osi wału o małej sztywności przy hartowaniu w urządzeniu.....	53
3. BADANIA WPŁYWU CZYNNIKÓW TECHNOLOGICZNYCH NA STABILNOŚĆ PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH CZĘŚCI OSIOWOSYMETRYCZNYCH O MAŁEJ SZTYWNOŚCI.....	59
3.1. Podstawy technologiczne regulowania układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej.....	59
3.2. Specyfika przebudowy strukturalnej materiału części przy regulowanym procesie cieplno-mechanicznym.....	71
4. ŚRODKI TECHNOLOGICZNE DO ZWIĘKSZENIA STABILNOŚCI Kształtu i DOKŁADNOŚCI CZĘŚCI O MAŁEJ SZTYWNOŚCI.....	81
4.1. Urządzenie do osiowego odkształcania plastycznego.....	81
4.2. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej materiałów umacniających się.....	85
4.3. Układ sterowania automatycznego odkształceniami w warunkach przemiany fazowej materiału półfabrykatu.....	89
4.4. Metody technologiczne odkształcania osiowego przy powierzchniowym nagrzewaniu i hartowaniu.....	94
4.5. Sposoby sterowania procesem obróbki cieplno-mechanicznej części o małej sztywności.....	101
4.6. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności.....	106

4.7. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej wałów.....	109
4.8. Nowa technologia obróbki cieplno-mechanicznej długich wałów o małej sztywności.....	113
5. BADANIA EKSPERYMENTALNE NIEZMIENNOŚCI WYMIAROWEJ I DOKŁADNOŚCI WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI.....	121
5.1. Badania eksperymentalne wpływu obróbki cieplno-mechanicznej przy odpuszczaniu na dokładność geometryczną i niezmiennosc kształtu części o małej sztywności.....	120
5.2. Badania eksperymentalne wpływu obróbki cieplno-mechanicznej na równomierność odkształcenia plastycznego.....	135
5.3. Badanie charakteru rozkładu temperatury w piecu sekcyjnym przy różnych parametrach nagrzewania i ochładzania.....	141
5.4. Badanie wpływu temperatury odkształcenia na warunki przemiany martenzytycznej.....	149
5.5. Eksperymentalne badanie wpływu obróbki cieplno-mechanicznej przy hartowaniu na dokładność geometryczną wyrobów.....	158
6. METODY ANALITYCZNE I EKSPERYMENTALNE KONTROLI ODKSZTAŁCEŃ ORAZ NAPRĘŻEŃ SZCZĄTKOWYCH W OPERACJACH OBRÓBKIE CIEPLNO-MECHANICZNEJ.....	162
6.1. Obliczanie osiowych naprężeń szczątkowych według zmiany ugięcia wału.....	162
6.2. Opracowanie metodyk określania naprężeń szczątkowych w próbkach wyciętych z wału.....	168
6.3. Określenie naprężeń szczątkowych w próbkach o okrągłym przekroju poprzecznym.....	172
6.4. Określenie naprężeń szczątkowych w próbkach o pierścieniowym i sektorowym przekroju poprzecznym.....	174
6.5. Określenie stycznych naprężeń szczątkowych w próbkach pierścieniowych.....	177
6.6. Podział naprężeń szczątkowych na składowe osiowe, styczne i promieniowe.....	180
6.7. Budowa wykresów naprężeń szczątkowych w zależności od współrzędnej „Z” i „θ”	182
6.8. Urządzenia eksperymentalne do określania naprężeń szczątkowych.....	183
PODSUMOWANIE.....	194
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW.....	196
LITERATURA.....	197

WSTĘP

W wielu współczesnych maszynach, urządzeniach i przyrządach są stosowane spełniające istotną rolę części o małej sztywności. [43, 144, 145]. Ciągły wzrost ich zastosowania wynika z wyższej jakości procesów obliczeniowych, optymalizacji kształtu części i konstrukcji, stałego zmniejszania ilości materiałów stosowanych w wyrobach i wzrostu produkcji maszyn precyzyjnych. Dysproporcja parametrów konstrukcyjnych części o małej sztywności jest powodem poważnych trudności technologicznych przy ich produkcji. Niekorzystne oddziaływanie wymienionych czynników przy wytwarzaniu części o małej sztywności prowadzi do naruszenia baz technologicznych, błędów kształtu i wymiarów części, defektów powierzchniowych, ograniczenia parametrów skrawania, możliwości dokładnościowych obrabiarek, trwałości narzędzi i w efekcie do obniżenia eksploatacyjnej Niezawodności części o małej sztywności oraz gotowych wyrobów [43, 144, 145].

Najślabszym ogniwem układu technologicznego są obrabiane części. Ich znaczące odkształcenia sprężyste i plastyczne na wszystkich etapach wytwarzania prowadzą do ograniczenia parametrów obróbki, błędów kształtu i wymiarów. Zwiększenie dokładności obróbki półfabrykatów na wszystkich etapach sprzyja polepszeniu właściwości eksploatacyjnych maszyn i przyrządów, częściowego zmniejszenia lub całkowitej likwidacji dopasowywania części, operacji wykańczających i zmniejszenia nadatków na obróbkę. Prowadzi to z kolei do zmniejszenia pracochłonności wykonania części i montażu maszyn, a więc zwiększenia ich niezawodności.

Badania [23, 24, 31, 44, 77, 83, 91, 104, 105, 119, 124, 126, 128, 133, 139, 154, 157] dotyczące zagadnień zwiększenia wydajności, dokładności eksploatacyjnej i jakości wyrobów, a także wyniki przemysłowego ich zastosowania pokazują, że do podstawowych kierunków intensyfikacji procesów obróbki można zaliczyć:

- dobór parametrów technologicznych i warunków przebiegu procesu, umożliwiających uzyskanie wymaganej dokładności części;
- opracowanie stopów umożliwiających uzyskanie dużej niezmienności wymiarowej o stosunkowo niewysokich i stałych współczynnikach rozszerzalności cieplnej, wysokiej przewodności cieplnej materiału części o małej sztywności i wysokim module stycznym sprężystości podłużnej;
- sterowanie dziedzicznością technologiczną.

1. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMATYKI BADAWCZEJ

1.1. Naprężenia szczątkowe w procesie technologicznym wykonania części

Naprężeniami szczątkowymi są nazywane naprężenia, które występują wewnątrz materiału, a po ustąpieniu oddziaływań powodujących ich powstanie (siły powierzchniowe i masowe, oddziaływania temperaturowe itd.) ulegają zrównoważeniu [2, 107]. Naprężenia szczątkowe powstają prawie zawsze przy wszystkich procesach technologicznych obróbki cieplnej, mechanicznej, ciśnieniowej obróbki metali i wielu innych rodzajach obróbki. Przyczyny powstawania naprężeń szczątkowych są różnorodne (niejednorodność odkształcenia plastycznego oraz pola temperaturowego, przemiany fazowe itd.).

Naprężenia szczątkowe można umownie klasyfikować w zależności od prędkości zmiany naprężeń według współrzędnej przestrzennej. Można więc wyodrębnić naprężenia szczątkowe 1, 2 i 3 rzędu. Naprężenia szczątkowe 1 rzędu (makronaprężenia) nieistotnie zmieniają się w granicach ziarna materiału (w przypadku stopów technicznych zwykle powodują przemieszczenia rzędu setnych części milimetra). Naprężenia od obciążeń zwykle są zaliczane do makronaprężeń. Mikronaprężenia (naprężenia 2 i 3 rzędu) podlegają dużej zmianie w granicach ziaren i komórek siatki krystalicznej. Powiązane są z anizotropią kryształów, orientacją płaszczyzn krystalograficznych, występowaniem różnych faz, itd. W niniejszej monografii są rozpatrywane tylko makronaprężenia (naprężenia 1 rzędu).

W technice są znane przypadki, kiedy naprężenia szczątkowe są pożądane i są wtedy specjalnie generowane. Na przykład, w budowie maszyn do wytworzenia wstępnego naprężenia konstrukcji. Wiadomo również, że wraz ze wzrostem naprężeń ściskających na powierzchni wzrasta wytrzymałość zmęczeniowa. W związku z tym do wytworzenia odpowiedniego rozkładu naprężeń szczątkowych jest stosowany zgniot powierzchniowy (rolkowanie, śrutowanie itd., to znaczy powierzchniowe odkształcenie plastyczne).

Jednak, w większości przypadków naprężenia szczątkowe nie są pożyteczne. Przy oddziaływaniu obciążeń zewnętrznych w procesie obróbki mechanicznej lub eksploatacji naprężenia sumaryczne od naprężeń szczątkowych i sił zewnętrznych mogą przekroczyć granicę sprężystości, co prowadzi do nierównomiernego odkształcenia plastycznego, paczenia, skręcania itd. Może także nastąpić znaczne obniżenie stateczności elementu. Obróbka cieplna prowadzona

w celu zmniejszenia naprężeń szczątkowych może spowodować odkształcenie wyrobu. Przy wyraźnej zmianie temperatury w wyrobie, w którym występują naprężenia szczątkowe może nastąpić nie tylko zmiana wymiarów i kształtu, ale również jego uszkodzenie, w tym przypadku, szczególnie niebezpieczne są naprężenia rozciągające. Naprężenia szczątkowe obniżają wytrzymałość wyrobu przy działaniu obciążeń zmiennych i cyklicznych, wpływają na zużycie w trakcie tarcia ślizgowego i tocznego. W pracach [106, 107] wyszczególniono kilka efektów występowania naprężeń szczątkowych przy korozji. Negatywnym skutkiem naprężeń szczątkowych w półfabrykatów walcowanych jest ich paczenie w procesie walcowania i stygnięcia. Problem uzyskania prostych wałów jest związany nierozdzielnie z obniżeniem i stabilizacją poziomu naprężeń szczątkowych. Naprężenia szczątkowe mogą być częściowo usunięte w wyniku obróbki cieplnej.

Przy odpuszczaniu mającym na celu usunięcie naprężeń szczątkowych, podstawowym mechanizmem zmiany naprężeń jest ich relaksacja, która przebiega szybciej przy podwyższeniu temperatury [2, 5, 127, 128, 129].

Wadami tego procesu są:

- usunięcie naprężeń szczątkowych jest uzależnione od temperatury odpuszczania, długotrwałości wygrzewania, materiału, masywności wyrobu;
- przy nagrzewaniu i następnie ochładzaniu część, w której występują naprężenia szczątkowe zmienia swój kształt i wymiary;
- przeprowadzenie odpuszczania w przypadku długich wyrobów jest operacją pracochłonną, zmniejszającą wydajność procesu. Istotny wpływ przy tym okazuje prędkość ochładzania po odpuszczaniu – przy stygnięciu wyrobów jest możliwe powstanie nowych naprężeń szczątkowych powodujących paczenie długich elementów.

W oparciu o przedstawione wyżej można konstatować, że problem obniżenia poziomu naprężeń szczątkowych w procesach obróbki cieplnej metali jest niezwykle istotny.

W danej pracy problem badania i obniżenia naprężeń szczątkowych jest rozpatrywany jako ich stabilizacja i minimalizacja w procesie wytwarzania długich wałów po ich długości i w przekroju poprzecznym.

Zagadnienie to może być więc sformułowane w sposób następujący. W początkowym momencie badany materiał znajduje się w naturalnym stanie, w bardziej ogólnym przypadku, w niejednorodnym polu temperaturowym. Przy stygnięciu do temperatury otoczenia oddziałują na niego obciążenia siłowe i cieplne, część z nich można zastosować do sterowania tym procesem. Należy określić sposób sterowania stabilizujący lub minimalizujący poziom naprężeń szczątkowych w końcu procesu.

Przy takiej interpretacji można wyodrębnić naprężenia szczątkowe różnorodnego pochodzenia:

- naprężenia szczątkowe cieplne;
- naprężenia szczątkowe odkształcające, powstałe w wyniku niejednorodnych odkształceń plastycznych;
- naprężenia powstałe w wyniku przekształceń fazowych, itd.

Zadanie to można rozwiązać w wyniku wprowadzenia jako pierwszej operacji – stabilizacji cieplnej przy zastosowaniu układu kontroli przebiegu procesu technologicznego. Kontrolowana jest jednocześnie temperatura nagrzewania wzdłuż części, prędkość i wielkość odkształcenia plastycznego, jest zapewniana również stabilizacja odkształcenia plastycznego i temperatury wzdłuż elementu w wyniku sterowania tymi parametrami.

Przy obróbce mechanicznej (toczeniu) należy rozwiązać jednocześnie dwa problemy: uzyskać wymaganą dokładność oraz zachować ją w czasie eksploatacji. Badania w zakresie określenia zmiany kształtu i wzajemnego rozmieszczenia powierzchni części obrabiarek precyzyjnych przedstawiono w pracy [24]. Eksperymentalnie oceniono wielkość zmiany parametrów geometrycznych powierzchni po obróbce wrzecion obrabiarek współrzędnościowych. Podkreśla się, że przy wykonaniu wrzecion obróbką mechaniczną uzyskano wymiary średnicowe z dokładnością rzędu 1–2 μm , a w trakcie 5 miesięcy badań zarejestrowano zmianę wymiarów średnic o dziesiątki mikrometrów.

Powstanie owalności pierścieni łożyskowych po szlifowaniu można wyjaśnić nierównomiernym wydzielaniem ciepła przy zdejmowaniu nierównomiernego nadkładu [24, 25, 28, 30, 33, 36, 44]. W celu usunięcia owalności proponuje się przeprowadzenie, przed końcowym szlifowaniem, dodatkowego odpuszczania, umożliwiającego zmniejszenie poziomu naprężeń szczątkowych po wstępnym szlifowaniu. Jednak autorzy nie do końca zbadali mechanizmy procesów niezmienności kształtu głównych powierzchni wrzeciona i pierścieni łożysk.

Istotną wadą przy obróbce mechanicznej skrawaniem jest niestabilność kształtu obrabianej części, występująca bezpośrednio w trakcie realizacji operacji technologicznych. W pracach [24, 27, 54, 55] ustalono, że przy obróbce tokarskiej pierścieni łożyskowych wykonanych z walcowanych na zimno i gorąco rur wielkość owalności zależy od metody wykonania półfabrykatów.

Wysokie wymagania odnośnie dokładności i niezmienności parametrów wyjściowych precyzyjnych zespołów i maszyn warunkują specyfikę procesu technologicznego wykonania bardzo dokładnych części. Oprócz uzyskania wysokiej dokładności wymiarów i parametrów geometrycznych powierzchni szczególną uwagę zwraca się na kształtowanie własności fizyko-mechanicznych materiału. Przy tym są formułowane wymagania odnośnie właściwości materiału podstawowego, kształtu konstrukcyjnego części i procesu technologicznego jej wykonania.

Podstawowe z nich to:

- wysoka stabilność wymiarowa dokładnej części;
- kształt części gwarantujący jej niezmiennosć w wyniku działania sił masowych i powierzchniowych;
- możliwość doboru parametrów technologicznych umożliwiających wysoką niezmiennosć kształtu i wymiarów.

W celu uzyskania wysokiej niezmiennosć wymiarowej części przy jej wykonaniu powinna być zachowana określona kolejności przebiegu operacji technologicznych. Po otrzymaniu półfabrykatów lub po zgrubnej obróbce mechanicznej jest wykonywana operacja obróbki cieplnej w celu uzyskania wymaganych właściwości mechanicznych i stanu strukturalnego materiału części. Kolejne operacje obróbki mechanicznej procesu technologicznego części o wysokiej dokładności powinny być stosowane przemienne z operacjami stabilizacji cieplnej. Schematy typowych procesów technologicznych części o wysokiej dokładności i tablice parametrów stabilizującej obróbki cieplnej przedstawiono w pracach [61, 63, 137]. Z technologicznego punktu widzenia bardzo ważne są dane odnośnie wymiarowej niestabilności materiału, tak przed hartowaniem jak i po jego wykonaniu.

Konieczność zastosowania złożonych operacji technologicznych obróbki stabilizacyjnej jest uwarunkowana zachodzącymi zmianami kształtu i wymiarów prowadzącymi do zmiany parametrów wyjściowych i zmniejszenia niezawodności maszyn precyzyjnych. Należy więc zagwarantować ich niezmiennosć w warunkach długotrwałej eksploatacji przy stałej i zmiennej temperaturach [24, 29, 139, 144, 147]. Najpełniejszą charakterystyką stałości wymiarowej materiału w czasie jest wielkość naprężenia maksymalnego, niepodlegającego relaksacji w drugim okresie badań (500-3500 godzin), którą nazywa się umowną granicą relaksacji. Wielkość tę zaleca się stosować jako podstawową charakterystykę stabilności wymiarowej stopów w przemyśle maszynowym.

W przypadku maszyn precyzyjnych dobór materiałów konstrukcyjnych zaleca się przeprowadzać według wskaźników charakteryzujących ich niezmiennosć wymiarową czyli współczynnika oporu odkształcenia mikroplastycznego oraz granicy sprężystości odniesionej do gęstości materiału [14, 17, 19, 21, 41, 69]. Metale i stopy o wysokiej wartości tych wskaźników są najbardziej odpowiednie na konstrukcje o wysokiej dokładności. W przypadku takich konstrukcji najbardziej odpowiednie są materiały o minimalnym stosunku współczynników rozszerzalności i przewodności cieplnej [110, 118, 142, 145]. Ustalono, że stale konstrukcyjne o wysokiej wytrzymałości mają odpowiednie połączenie tych właściwości, co powoduje, że nadają się na części zewnętrzne o wysokiej dokładności. Również często są stosowne stale nierdzewne chromowe, a przy zastosowaniu odpowiedniej obróbki cieplnej także stale o średniej zawartości węgla – na części przenoszące średnie obciążenia. Materiał stosowany na części wysokoobrotowe powinien mieć mały ciężar właściwy i wysoki moduł

sprężystości, ponieważ przy dużym ciężarze względnym materiału w obracającej się dokładnej części występuje wysoki poziom naprężeń.

Metoda obróbki stabilizacyjnej części o wysokiej dokładności powinna być wybierana w taki sposób, aby uzyskać dużą niezmiennność stanu strukturalnego materiału całej części w warunkach eksploatacji oraz zmniejszenie poziomu naprężeń szczątkowych.

Ważnym czynnikiem, który może utrudniać uzyskanie odpowiednich parametrów dokładnościowych części o wysokiej dokładności jest jej kształt konstrukcyjny [32, 34, 40, 46, 60]. Ustalono, że przy obróbce podstawowych powierzchni wrzeczona o wysokiej dokładności jest utrudnione uzyskanie wymaganej dokładności z powodu nierównomiernej sztywności elementów konstrukcyjnych. Należy odnotować, że nierównomierna sztywność konstrukcyjna jest przyczyną odkształceń nawet w przypadku równomiernego rozkładu naprężeń szczątkowych. Zwiększenie niestabilności kształtu jest możliwe przy nieprawidłowym rozkładzie sił masowych, okazujących istotny wpływ na zmianę mikrostruktury warstwy powierzchniowej. Trudność w określeniu prawidłowego rozwiązania polega na tym, że element konstrukcyjny o określonej masie może spełniać pożyteczną rolę w procesie uzyskiwania wysokiej dokładności, a przy składowaniu części może powodować zmianę kształtu jej powierzchni.

Większość prac badawczych dotyczy problematyki podwyższania charakterystyk eksploatacyjnych maszyn i narzędzi w wyniku zastosowania nowych metod technologicznych, brak jest natomiast informacji odnośnie analizy przyczyn niestabilności i wpływu charakteru zakłócenia na zmianę kształtu gotowych części przy ich składowaniu i eksploatacji.

Konieczność wnikliwego badania zagadnienia stabilności mikrostruktury, według autorów prac [132, 143, 149], jest uwarunkowana tym, że zdolność do nadania materiałom pożądanych właściwości jest oparta na możliwości uzyskania wymaganej mikrostruktury. Każdy materiał części posiada swoją specyficzną mikrostrukturę. Takie mikrostruktury, jak odnotowują autorzy pracy [140], prawie zawsze są niestabilne termodynamicznie. Niestabilność powstaje z tego powodu, że każdy stop może posiadać tylko jedną strukturę stabilną i nieskończoną liczbę struktur niestabilnych. W materiale części oprócz charakterystycznej mikrostruktury powstają szczątkowe mikro i makronaprężenia kształtowane w trakcie realizacji procesu technologicznego jej wykonania. Mogą to być naprężenia szczątkowe od operacji cieplnych, od operacji obróbki mechanicznej itd.

Zastosowanie obróbki stabilizacyjnej prowadzi do powstania stabilnej struktury i zdjęcia makronaprężeń szczątkowych. Jednak pozostaje niestabilna mikrostruktura, charakterystyczna dla każdego materiału części i makronaprężenia zapamiętujące historię oddziaływania technologicznego.

W wyniku działania sił masowych i powierzchniowych niestabilność mikrostruktury z czasem prowadzi do zmiany kształtu i wymiarów części o małej sztywności. Makronaprężenia wewnętrzne określają naprężenia, intensy-

wność występowania struktury niestabilnej i charakter przebiegu procesów fizycznych. W przypadku części o małych wymiarach i masach [130, 140, 146, 148], jest możliwa zmiana kształtu i wymiarów nawet bez oddziaływania obciążeń zewnętrznych, tylko w wyniku oddziaływania czynników ukształtowanych oddziaływaniem technologicznym.

Liczbowe określenie zmiany kształtu i wymiarów części po wykonaniu operacji technologicznej umożliwi efektywne sterowanie metodami technologicznymi oddziaływania na obrabianą powierzchnię na dowolnym etapie wykonania części, tym bardziej, że uzyskanie odpowiednich parametrów geometrycznych obrabianych powierzchni może ułatwić zastosowanie teorii dziedziczenia technologicznego, przedstawionej w [24, 105, 119, 141].

Należy uwzględnić, że niestałość kształtu części o wysokiej dokładności, spowodowana oddziaływaniem złożonych niezbadanych zjawisk jest to wielkość mierzona w mikrometrach. Dlatego zjawisko niestałości kształtu i wymiarów części o wysokiej dokładności należy odnieść do dziedziczności technologicznej.

W technologii maszyn w teorii dziedziczenia technologicznego są stosowane dwa określenia: „dziedziczenie” i „dziedziczność” [62, 64, 66, 73, 74]. Pojętność znaczeniowa tych pojęć jest określona złożonością ich zrozumienia i występowania zjawisk zachodzących, w odniesieniu do zjawisk technologicznych, na różnych etapach operacji technologicznej. Wykorzystanie tych terminów do wyjaśnienia tych zjawisk wymaga dodatkowych badań. Teoria dziedziczności technologicznej umożliwiła zbadanie wielu specyficznych cech przebiegu procesu technologicznego wykonania części i wypracowanie sposobów technologicznych w celu uzyskania ich wysokiej dokładności. Teoria ta odgrywa istotną rolę przy kształtowaniu zasad niezawodności technologicznej. Oddziaływanie technologiczne może zmieniać (zwiększać lub zmniejszać) dziedziczone zachowanie podstawowego materiału, w niektórych przypadkach w sposób zasadniczy, lecz charakter oddziaływania zawsze jest uzależniony od badanej mikrostruktury.

Według parametrów ilościowych zmiany kształtu części i warunków ich pracy zjawisko niestałości kształtu można odnieść do dwóch przypadków: efektów dziedzicznych oraz relaksacji przy odpowiednich warunkach obciążenia w zakresie sprężystym. Zagadnienia dotyczące określania dziedziczności oraz funkcji pamięci są przedstawione w pracach [119, 155, 158, 160].

W warunkach relaksacji naprężeń w temperaturach pokojowej i nieco wyższej, według autorów prac [111, 112, 163], wewnątrz ziaren zachodzą procesy dyslokacyjno-przemieszczeniowe. Poślizg, powstający na granicach ziaren, rozprzestrzenia się w głąb. Procesowi poślizgu przy relaksacji naprężeń towarzyszy powstawanie bardziej równomiernej i stabilnej struktury dyslokacyjnej.

Wykorzystanie materiału eksperymentalnego, nagromadzonego w ciągu ostatnich dziesięcioleci, jest utrudnione brakiem teoretycznej interpretacji technologicznych naprężeń szczątkowych, które powinny odpowiadać następującym wymaganiom:

- prawidłowość zmiany naprężeń powinna być przedstawiona funkcjonalnie możliwie prosto;
- wielkość maksymalnych naprężeń rozciągania lub ściskania, głębokość zalegania i zasada rozkładu naprężeń po głębokości powinny być przedstawione w jawnej postaci na podstawie liczbowych wartości danych eksperymentalnych;
- powinna istnieć możliwość zmiany liczbowej wartości jednego z parametrów rozkładu naprężeń szczątkowych, przy pozostawieniu pozostałych bez zmiany.

Teoretyczny opis rozkładu naprężeń szczątkowych w warstwie powierzchniowej, przy spełnieniu przedstawionych wymagań, umożliwia przeprowadzenie badań wstępnych wpływu każdego z parametrów i określenie ich wartości, powodujących zwiększenie stabilności kształtu i wymiarów. Taki opis teoretyczny można zastosować także do oceny wpływu naprężeń szczątkowych, z uwzględnieniem zmiany ich wielkości w czasie, na inne parametry eksploatacyjne części maszyn.

Określenie mechanizmu procesów relaksacyjnych w warstwie powierzchniowej umożliwi ukierunkowane kształtowanie dziedzicznych własności materiału części w celu uzyskania niezmienności kształtu i wymiarów.

1.2. Procesy technologiczne stosowane do stabilizacji kształtu i wymiarów długich części o małej sztywności

Cykl technologiczny wykonania części o małej sztywności zawiera szereg operacji: prostowania, obróbki cieplnej – często wykonywanej wielokrotnie, obróbki mechanicznej. Każda operacja wnosi swoje naprężenia szczątkowe, powodujące odkształcenia zarówno na etapie wykonania jak i w trakcie eksploatacji części. Do obniżania naprężeń szczątkowych są stosowane różne rodzaje obróbki cieplnej – odpuszczanie, wyżarzanie niskotemperaturowe i starzenie sztuczne. Ostatnimi laty w tym celu zaczęto stosować obróbkę wibracyjną.

Przy metodzie wibracyjnej usuwania naprężeń, do metalu jest doprowadzana energia drgań [26, 39, 43, 52, 59, 57, 62, 100]. Dzięki temu w polikrystalicznym materiale zachodzą przemieszczenia siatki krystalicznej, którym towarzyszy redystrybucja naprężeń. Wibracje powinny być realizowane z częstotliwością rezonansową lub zbliżoną do niej. Jeżeli częstotliwość wibracji przewyższa częstotliwość drgań własnych wyrobu, mogą się pojawić naprężenia zmęczeniowe [53, 58, 79, 120, 122].

Metoda wibracyjna nadaje się dobrze do usuwania naprężeń szczątkowych w półfabrykatakach kształtowanych metodami odkształcania plastycznego oraz obróbką skrawaniem: frezowaniem, toczeniem, struganiem, szlifowaniem, przeciąganiem, wierceniem itd. Obróbka wibracyjna w porównaniu ze sposobami termicznego usuwania naprężeń posiada wiele zalet. Można do nich zaliczyć:

- prawie całkowity brak odkształceń;
- części nie zmieniają swojego kształtu i rozmiarów;
- nie występuje niebezpieczeństwo powstania nowych naprężeń, które mogłyby wystąpić przy nieprawidłowym trybie obróbki cieplnej;
- zmniejszenie długotrwałości procesu.

Nie jest także konieczne gromadzenie dużego zapasu i odpowiednich powierzchni do składowania części, również koszty odpowiednich urządzeń nie są wysokie.

Obróbka cieplna stosowana do usuwania naprężeń szczątkowych w celu stabilizacji naprężeń i wymiarów części znana jest jako starzenie sztuczne. Proces ten wyraźnie obniża poziom naprężeń szczątkowych i daje wysoką jakość ich stabilizacji, ale posiada również szereg wad, które nie występują przy metodach wibracyjnych.

Wszystkie metody przeciwdziałające paczeniu i umożliwiające stabilizację kształtu i wymiarów części są nazywane „starzeniem” [10, 23, 13, 117]. Podstawową przyczyną odkształcenia części są naprężenia szczątkowe, a doświadczenie pokazuje, że ulegają one wyraźnemu zmniejszeniu w procesie wyżarzania niskotemperaturowego, to powstało ogólne mniemanie, że według wielkości pozostałych w części naprężeń szczątkowych można sądzić czy będzie ona ulegać paczeniu czy też nie. Wielu badaczy wskazuje jednak, że przy starzeniu naturalnym zachodzi tylko porównywalnie niewielkie zmniejszenie naprężeń szczątkowych, a z praktyki wiadomo, że w procesie eksploatacji takie części nie ulegają paczeniu. Wysłunięto więc założenie, że paczenie zachodzi głównie z powodu relaksacji naprężeń szczątkowych w miejscach ich koncentracji, a nie relaksacji średnich naprężeń szczątkowych 1 rzędu, które są rozpatrywane przy ocenie naprężonego stanu części. To znaczy, że poziom naprężeń w wyrobie oraz stopień jego obniżenia nie mogą charakteryzować stabilności wymiarów obrabianych wyrobów i dlatego efektywność tej lub innej metody starzenia zaleca się oceniać według wielkości odkształcenia. Wszystkie znane metody starzenia umownie można podzielić na trzy grupy w zależności od stopnia zmiany naprężeń szczątkowych:

1. Naprężenia ulegają zmianie w niewielkim zakresie.
2. Naprężenia ulegają zauważalnemu zmniejszeniu.
3. Naprężenia ulegają wyraźnemu zmniejszeniu.

Do pierwszej grupy jest zaliczane starzenie naturalne, starzenie, starzenie wibracyjne, obróbka cieplna ($T^{\circ} = 200\text{--}300^{\circ}\text{C}$). Do drugiej grupy odnosi się

metodę obciążenia statycznego oraz metodę uderzeń cieplnych. Do trzeciej zalicza się wyżarzanie w temperaturze $T^\circ = 500\text{--}600^\circ\text{C}$.

Przed wyborem tej lub innej metody należy dokładnie określić wymagania stawiane części oraz co jest ważniejsze: wysoka stabilność wymiarów czy poziom naprężeń szczątkowych. Jeżeli wymagania są podobne to czasami należy je połączyć lub wziąć pod uwagę te, które odpowiadają obu warunkom.

Wielkość naprężeń szczątkowych w półfabrykatkach nie określa możliwości ich paczenia [31, 35, 37, 39]. Na przykład, przy występowaniu intensywnego umocnienia stabilizacja wymiarów półfabrykatów ma miejsce przy porównywalnie niewielkim obniżeniu w nich ogólnego poziomu naprężeń szczątkowych (do 10%). Natomiast przy intensywnym usuwaniu skutków zgniotu (wyżarzanie niskotemperaturowe przy $T^\circ = 500\text{--}600^\circ\text{C}$) paczenie nie zachodzi tylko po znacznym obniżeniu naprężeń szczątkowych (do 50–60%).

W celu likwidacji odkształcenia plastycznego należy zwiększyć wytrzymałość materiału na odkształcenia plastyczne to znaczy jego trwałość relaksacyjną lub też zmniejszyć działające naprężenia. Umocniona przez odkształcenie plastyczne stal jest bardziej odporna na powstanie nowego odkształcenia plastycznego.

W ostatnim czasie rozwijane są różne metody starzenia, podwyższające trwałość relaksacyjną materiału przy niewielkim obniżeniu naprężeń szczątkowych. Zalicza się do nich: obciążenie statyczne i dynamiczne, starzenie w wyniku uderzeń cieplnych, stabilizacja wymiarów części w polu magnetycznym, uderzenia elektrohydrauliczne, napromieniowanie promieniami rentgena.

Znanych jest kilka teorii próbujących wyjaśnić efekt osiągany podczas obróbki wibracyjnej, na przykład w pracach [110, 113, 156] stwierdza się, że w trakcie obróbki wibracyjnej metal uzyskuje energię drgań powodującą powstanie naprężeń czasowych, które w sumie z naprężeniami szczątkowymi mogą być większe od granicy plastyczności materiału przy naprężeniach zmiennych według znaku. Wielkość tej granicy jest niższa od statycznej granicy plastyczności, co można wyjaśnić efektem Bauschingera. Obróbka wibracyjna według znanych sposobów [7, 12, 121] posiada szereg wad:

- poszukiwanie pików rezonansowych łatwo można przeprowadzić tylko na niskich częstotliwościach, które odpowiadają rezonansowi dużych mas składających się na część;
- na wysokich częstotliwościach pików rezonansowych nie udaje się wykryć, a w związku z tym jakościowa stabilizacja naprężeń szczątkowych nie jest możliwa.

Dokładność określania i kontroli stanu naprężonego ulega istotnemu zwiększeniu przy zastosowaniu rozwiązań technicznych umożliwiających zmiany pętli histerezy. Wskaźnikiem początku stabilizacji naprężeń szczątkowych jest migracja nieliniowej części pętli histerezy, a zakończenia stabilizacji – uzyskanie jej liniowości. Przy tym powierzchnia ograniczona pętlą histerezy

ulega zmniejszeniu. Do uzyskania charakterystyk odzwierciedlających zależność intensywności odkształceń plastycznych (migracji pętli histerezy) od zewnętrznego obciążenia, w danym przypadku, jest stosowany klucz elektroniczny do odcięcia drgań harmoniczných, niewpływających na intensywność odkształceń plastycznych, dający na wyjściu „parametr sumaryczny”, rejestrowany przyrządem czujnikowym. W tym przypadku „parametrem sumarycznym” jest sumaryczna ilość impulsów nagromadzona przy zmianie częstości wzbudzenia w zadanym trybie.

W celu zwiększenia efektywności procesu stabilizacji wibracyjnej naprężeń szczytkowych i równomierności gęstości rozkładu drgań po objętości materiału części [38, 42] obróbka wibracyjna jest realizowana na częstotliwości równej najmniejszej wspólnej wielokrotności częstotliwości własnych ogniw składowych konstrukcji.

W przypadku obróbki wibracyjnej części o małej sztywności należy rozszerzyć zakres częstości wibratora i zbudować obwód sterowania poziomem drgań i częstotliwości rezonansowych.

Analiza badań teoretycznych i eksperymentalnych zaprezentowanych w literaturze pokazała, że na dokładność eksploatacyjną kształtu i wymiarów części o małej sztywności przy ich wykonaniu dominujący wpływ okazują fizyko-mechaniczne właściwości materiału półfabrykatu, poziom naprężeń szczytkowych oraz ich nierównomierność w przekrojach wzdłużnym i poprzecznym, a także błędy wnoszone odkształceniami sprężystymi i plastycznymi, układem technologicznym oraz samą obrabianą częścią.

Opracowanie nowych metod obróbki części o małej sztywności w przypadku poszczególnych operacji jest realizowane poprzez wprowadzenie nowych elementów konstrukcyjnych i technologicznych do obrabiarek oraz urządzenia, a także drogą sterowania parametrami technologicznymi procesów. Jakość gotowych wyrobów i ich dokładność eksploatacyjna zależy natomiast od procesu technologicznego przy uwzględnieniu wzajemnego oddziaływania operacji i ich dziedziczności technologicznej wnoszonej przez półfabrykat.

Jak wynika z analizy literatury, najbardziej efektywnymi metodami zwiększenia jakości i wydajności gotowych wyrobów są te, które obok sposobów tradycyjnych wykorzystują układy sterowania automatycznego. W rozwoju tych układów jest charakterystyczne coraz szersze zastosowanie informacji o charakterze przebiegu procesu technologicznego.

Stosowane modele obliczeniowe operacji technologicznych przy wytwarzaniu części o małej sztywności nie w pełni odzwierciedlają ich zachowanie i zmianę charakterystyk wytrzymałościowych w procesie wykonania. Najczęściej, nie uwzględniają one rozłożenia parametrów bezwładnościowych, sztywnościowych, wytrzymałościowych itd. wzdłuż półfabrykatu. W związku z tym jest celowe opracowanie bardziej dokładnych modeli i w oparciu o nie przeprowadzenie badań oraz opracowanie i realizacja nowych technologii obróbki wibracyjnej i cieplno-mechanicznej długich części o małej sztywności.

Problematyka zwiększenia wydajności, dokładności i stabilności kształtów osiowosymetrycznych części o małej sztywności poprzez opracowanie metod technologicznych umożliwiających uzyskanie stanu o równomiernym rozkładzie naprężeń przy zastosowaniu procesów obróbki wibracyjnej i cieplno-mechanicznej jest bardzo aktualna i ważna.

W tym celu należy:

- opracować modele matematyczne procesów obróbki wibracyjnej i cieplno-mechanicznej w trybach statycznym i dynamicznym w warunkach osiowego wzdłużnego odkształcenia;
- przeprowadzić badania modelu obróbki cieplno-mechanicznej w celu określenia konieczności regulowania odkształceń sprężysto-plastycznych;
- uzasadnić nowe założenia budowy operacji technologicznych obróbki cieplno-mechanicznej, kształtujących własności fizyko-mechaniczne materiału, kształty geometryczne półfabrykatów i ich odkształcenie sprężysto-plastyczne, a także rozkład naprężeń szczątkowych w objętości wyrobów;
- opracować metody technologiczne ukierunkowanego sprężystoplastycznego kształtowania stanu odkształconego w celu uzyskania zadanej dokładności i stabilności kształtu;
- opracować i uzasadnić zasady quasi-statycznej i dynamicznej diagnostyki procesu obróbki cieplno-mechanicznej;
- opracować i wykonać stanowiska, wyposażone w kanały diagnostyczne i elementy sterowania obróbką cieplno-mechaniczną;
- opracować metody kontroli naprężeń szczątkowych i urządzenia do ich realizacji;
- opracować algorytmy i programy do kontroli naprężeń szczątkowych.

2. MODEL MATEMATYCZNY PROCESU TECHNOLOGICZNEGO OBRÓBK CIEPLNO-MECHANICZNEJ

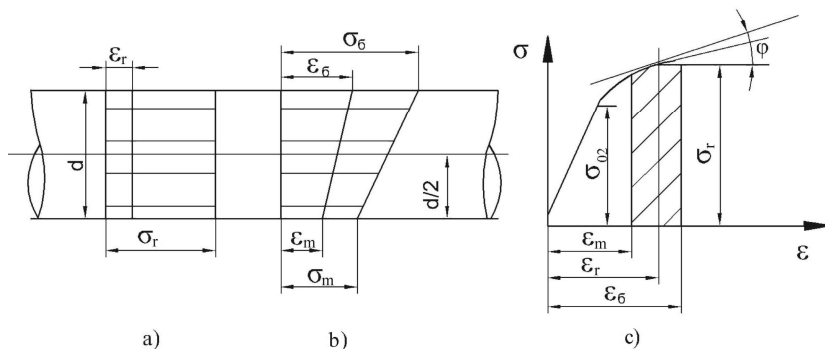
2.1. Założenia teoretyczne do obliczeń odkształcenia osiowego i naprężeń

Anizotropia metalurgiczna samorzutnej zmiany kształtu (wymiarów) wyrobu obrabianego – wału, podobnie jak anizotropia ogólna właściwości fizycznych i mechanicznych jest niejednoznacznością mikro i makrobudowy metalu rzeczywistego. Paczenie się części o małej sztywności jest uzależnione od naprężeń szczątkowych, powstających w wyniku odkształceń plastycznych o różnej wielkości, przy obciążeniu półfabrykatu. W trakcie walcowania półfabrykatów długich można wyodrębnić dwie przyczyny powstawania i rozwoju naprężeń szczątkowych, czyli nierównomierność odkształceń plastycznych metalu przy jego zgniocie i niejednorodność pola temperaturowego podczas chłodzenia.

Znane są sposoby obniżenia poziomu naprężeń szczątkowych w częściach o małej sztywności [24, 52, 114], w zależności od właściwości fizyko-mechanicznych: odkształcenia plastyczne, wyżarzanie, odpuszczanie. Jednym ze sposobów zachowania kształtu jest obróbka cieplna przy sztywnym ustaleniu położenia półfabrykatu, ponieważ w trakcie obróbki cieplnej, bez takiego ustalenia (na przykład przy odpuszczaniu), praktycznie prawie zawsze zmianie ulegają wymiary wału (ma miejsce relaksacja przy pełzaniu). Złożony stan mechaniczny materiału, w trakcie obróbki cieplnej wyrobów, naprężonych w połączeniu z różnorodnością występujących stanów fazowych, może spowodować następstwa technologiczne – zmianę wymiarów w trakcie kolejnych operacji mechanicznych lub składowania. Paczenie w stanie swobodnym ma miejsce również po obróbce cieplnej, początkowo często w określonym kierunku (zginanie, rozciąganie), przed zakończeniem przekształceń fazowych i odkształceń niesprężystych. Ustalenie wyrobu, przy hartowaniu także charakteryzuje się określoną specyfiką. Na przykład wtedy, kiedy ustalenie wyrobu hartowanego trwa dosyć długo, odkształcenia są niewielkie (w przypadku próbek 1–2% wielkości odkształcenia plastycznego powstającego przy obciążeniu). Odpuszczanie realizowane po hartowaniu, w szczególności przy występowaniu austenitu szczątkowego, gdy w materiale zachodzą przekształcenia fazowe (na przykład około 10%), zwiększa działania wtórne, które sumują się z poprzednimi (w tych samych kierunkach). Ostateczne odkształcenie wyrobu modeluje się zależnością nieliniową w funkcji działających naprężeń.

W celu minimalizacji paczenia – odkształceń wałów o małej sztywności, w trakcie obróbki cieplnej pod obciążeniem, należy utworzyć warunki do powstania odpowiedniego odkształcenia plastycznego lub przemiany fazowej. Na przykład w trakcie przemiany martenzytycznej stal traci wytrzymałość i ulega niewielkiemu odkształceniu ($\sigma_{0.2}$ ulega zmniejszeniu od 12 do 14 razy). Przy temperaturach hartowniczych pole naprężeń szczątkowych ulega redukcji do zera i jest jednorodne w przekroju; pełnej likwidacji ulega warstwa utwardzona przez zgniot. Technologicznie trudne jest zachowanie takiego stanu materiału, przy chłodzeniu do temperatury otoczenia, ponieważ przy stygnięciu i zdjęciu obciążenia nie jest spełniony warunek zgodności odkształceń plastyczno-sprężystych. W tym przypadku jest celowe przeanalizowanie specyfiki technologicznej przygotowania wyrobu do obróbki cieplnej. Konieczne jest, aby parametry geometryczne półfabrykatu, po prostowaniu i obróbce mechanicznej, nie były większe od tolerancji na obróbkę kształtującą. Nierównomierność odkształceń w przekroju i wzdłuż półfabrykatu jest uwarunkowana niedokładnością wykonania (szczególnie wielkością mimośrodów półfabrykatu – nie pokrywania się osi technologicznej i teoretycznej). Przy obciążeniu brak symetryczności w przekroju poprzecznym powoduje wytworzenie momentu zginającego, w wyniku powstawania odkształceń.

Rozpatrzono kolejne działania (procesy) technologiczne, przy zastosowaniu odkształcenia osiowego, w przypadku materiału nagrzanego i bez jego nagrzewania. Każda operacja może występować jako samodzielna, w zależności od przeznaczenia wyrobu. Istota pierwszego procesu technologicznego polega na tym, że przy rozciąganiu, wszystkie siły wzdłużne, w pierwszym przybliżeniu, są równomierne; powstają takie same naprężenia (rys. 2.1a). Wartość naprężeń roboczych σ_r można określić z diagramu naprężeń według wielkości odkształcenia względnego ε_r (rys. 2.1c).



Rys. 2.1. Odkształcenia i naprężenia przy obciążeniu osiowym

Na odcinkach skrzywionych pomimo rozciągania ma miejsce również prostowanie półfabrykatu, w wyniku czego odkształcenia względne warstw wzdłużnych tych odcinków są różne. Zwykle promień krzywizny nie jest

mniej niż 2–30 krotna wysokość przekroju poprzecznego półfabrykatów walcowanych, a więc charakter rozkładu odkształceń w przekroju wału przy prostowaniu można przyjąć taki, jak przy zginaniu belki prostoliniowej. W tym przypadku rozkład odkształceń względnych, wzdłuż wysokości półfabrykatu, jest zgodny z zależnością liniową (rys. 2.1b), a ich wartość najmniejszą i największą w warstwach skrajnych: zewnętrznej i wewnętrznej wału można, przedstawić jako:

$$\varepsilon_{\delta} = \varepsilon_r + \frac{d}{2r_k}, \quad \varepsilon_m = \varepsilon_r - \frac{d}{2r_k},$$

gdzie: r_k – promień krzywizny półfabrykatu.

Wartości wydłużeń względnych znajdują się w zakresie, przedstawionym na diagramie naprężeń strefą $\varepsilon_{\delta} - \varepsilon_m$ (rys. 2.1c). Można przyjąć, że moduł styczny sprężystości podłużnej E_y jest stały. W tym przypadku, rozkład naprężeń wzdłuż wysokości wału również odpowiada zależności liniowej (rys. 2.1 b). Zależność naprężeń w strefie odkształceń względnych można zapisać jako:

$$\sigma_{\delta} = \sigma_r + \frac{E_y}{E} v, \quad \sigma_m = \sigma_r - \frac{E_y}{E} v, \quad (2.1)$$

gdzie: v – współrzędna naprężeń pochodzących od centralnej warstwy półfabrykatu.

Siłę rozciągającą i moment zginający można wyznaczyć z zależności:

$$F_{roz} = \sigma_r \cdot S, \quad M = \frac{E_y \cdot v}{E \cdot J}. \quad (2.2)$$

W wyniku nierównomiernego rozkładu naprężeń, według średnicy na odcinkach skrzywionych, działa moment sił wewnętrznych, który powinien być równoważony momentem zginającym zewnętrznym. Moment ten powstaje dzięki przemieszczeniu środka ciężkości przekroju poprzecznego odcinka wału, w stosunku do linii działania siły rozciągającej. W tym przypadku moment zginający od sił zewnętrznych jest równy $M_{zewn} = F_{roz} \cdot y_e$, gdzie y_e – jest wielkością bezwzględną części skrzywienia ostatecznego, którą można przedstawić przy pomocy znanych wielkości:

$$y_e = \frac{J \cdot E_y}{r_k \cdot S \cdot \sigma_r}. \quad (2.3)$$

Wielkość y_e jest tylko częścią ostatecznego, pozostałego po prostowaniu naprężenia. Podstawowa część skrzywienia ostatecznego powstaje przy zdjęciu zewnętrznego obciążenia rozciągającego, w wyniku relaksacji naprężeń szczą-

tkowych i skutków niesprężystych, to znaczy skrzywione wcześniej odcinki częściowo odbudowują krzywiznę, ponieważ w nich oprócz siły rozciągającej jest zdejmowany również moment zginający powstający od tych sił.

Na podstawie przeprowadzonych badań analitycznych procesów odkształcenia osiowego wału można wyciągnąć wniosek, że ostateczna krzywizna wyrobu zależy od skrzywienia początkowego $\frac{1}{r_k}$, od właściwości fizyko-

mechanicznych materiału i technologii wykonania. W związku z tym należy odnotować kilka podejść do projektowania procesów technologicznych obróbki wałów o małej sztywności, w zależności od materiału półfabrykatu.

Gdy materiał półfabrykatu ma charakterystykę rosnącą, to przy określaniu zewnętrznego obciążenia rozciągającego strefa wydłużeń względnych $\varepsilon_\delta - \varepsilon_m$, powinna odpowiadać odcinkowi diagramu $\sigma - \varepsilon$, o minimalnym module stycznym sprężystości podłużnej. W przypadku stali niskowęglowych jest to strefa plastyczności ($E_y = 0$). Przy określaniu odkształcenia osiowego, materiałów skłonnych do umacniania, strefa $\varepsilon_\delta - \varepsilon_m$ na diagramie $\sigma - \varepsilon$ powinna być umiejscowiona po odcinku początkowym, o stromym wznoszeniu się krzywizny naprężeń. Stale wysokowęglowe i wysokostopowe charakteryzuje strome wznoszenie się naprężeń na odcinku wydłużenia równomiernego. W związku z dużymi wartościami modułu stycznego sprężystości podłużnej, wymagają dużych obciążeń osiowych, co powoduje, że odkształcenia znacznie przekraczają granicę wytrzymałości materiału.

Przedstawione podejście technologiczne, do poprawienia krzywizny części osiowosymetrycznych, jest do przyjęcia jako proces obróbki zgrubnej, wstępnej, w przypadku wałów o stosunku $\frac{L}{d} = 100$ i nie przejawiających skłonności do umacniania.

W celu zwiększenia dokładności i stabilności kształtu geometrycznego części o małej sztywności opracowano sposób, łączący w sobie proces prostowania i obróbki cieplnej [145, 148]. Realizacja tej metody technologicznej rozpatrywana jest w rozdziałach 4 i 5. Istota tej metody polega na tym, że odkształcenie osiowe – rozciąganie jest przykładane do wału przy nagrzewaniu (temperatura hartowania), a przy stygnięciu wyrób jest ustalany odnośnie urządzenia, przy czym prędkość stygnięcia wału jest kilkakrotnie większa niż urządzenia (rys. 2.2a). Na rysunku 2.2 i wykresie 2.1 cyfrą 1 oznaczono urządzenie, a 2 – wyrób oraz charakterystyki przy nagrzewaniu i chłodzeniu.

Przy obliczeniach teoretycznych założono, że krzywizna osi półfabrykatu opisywana jest sinusoidą:

$$y = \frac{\alpha \cdot \sin \pi \cdot x}{L}, \quad (2.4)$$

a wielkość zmiany długości półfabrykatu określano zależnością (2.2a):

$$\Delta L = \frac{\pi^2 \cdot y_\alpha^2}{4L}, \quad (2.5)$$

gdzie: α – początkowa strzałka ugięcia.

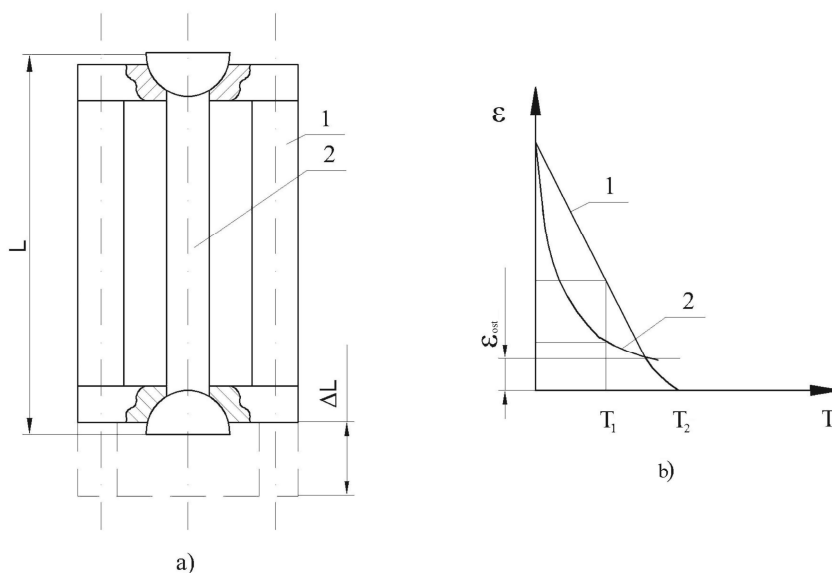
Przy rozciąganiu półfabrykatu o krzywiznie początkowej, nie większej niż 1% na długości L , wielkość odkształceń $y_{\alpha 1}$ jest powiązana z krzywizną początkową y_α zależnością:

$$\alpha_1 = \frac{y_\alpha}{1 + \frac{F_{roz}}{F_{kr}}}, \quad (2.6)$$

z której można wyznaczyć wielkość obciążenia osiowego, niezbędnego do zmniejszenia ugięcia od y_α do $y_{\alpha 1}$:

$$F_{roz} = F_{kr} \cdot \frac{y_\alpha}{y_{\alpha 1} - 1}, \quad (2.7)$$

gdzie: F_{kr} – siła osiowa krytyczna.



Rys. 2.2. Schemat uproszczony realizacji technologicznej metody obróbki – a), charakterystyki przy nagrzewaniu i chłodzeniu – b)

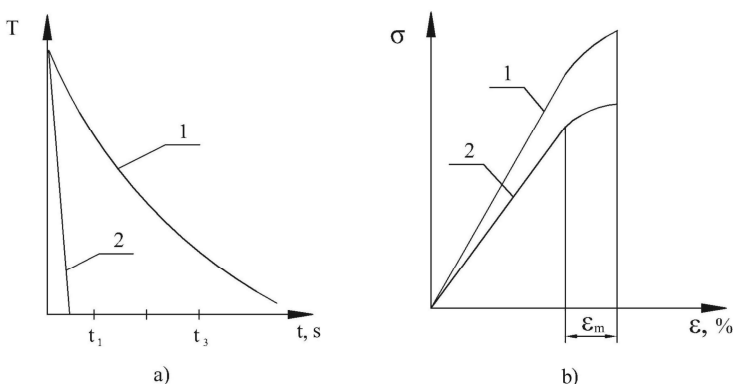
Zależność naprężeń od wydłużeń względnych może być stosowana pod warunkiem spełnienia nierówności (2.8):

$$\lambda \geq \left(\pi^2 \cdot \frac{E}{\sigma_{02}} \right)^{1/2}, \quad (2.8)$$

jeżeli $\lambda < 100$, to osiowa siła rozciągająca powinna być określana z zależności:

$$F_{roz} = E \cdot S_{pól} \cdot \frac{\Delta L}{L}, \quad (2.9)$$

gdzie: $S_{pól}$ – pole przekroju poprzecznego półfabrykatu.



**Wykres 2.1. Zależności temperatury chłodzenia urządzenia i półfabrykatu – a),
zależność naprężeń i wydłużeń względnych – b)**

Na podstawie danych obliczeniowych można stwierdzić, że do osiągnięcia granicy proporcjonalności materiału (na przykład stal nierdzewna) półfabrykatu, o średnicy 60mm i długości 3000mm, w przypadku którego $\sigma_{02} = 200 \text{ N/mm}^2$, konieczne jest przyłożenie siły osiowej w granicach $6 \cdot 10^5 \text{ N}$. Proces odkształcenia osiowego, oprócz wymienionych wad, ma więc jeszcze jedną – niezbędny jest napęd o dużej mocy. W proponowanych technikach znajdują zastosowanie podstawy fizyczne procesu obróbki cieplnej, kiedy to odkształcenie osiowe półfabrykatu jest realizowane w wyniku doboru współczynników rozszerzalności cieplnej wyrobu i urządzenia, jak również ich długości (półfabrykat umieszczany jest w urządzeniu i mocowany końcami na czołach – rysunek 2.2a).

Różnica wydłużeń półfabrykatu i urządzenia jest określana zgodnie z zależnością:

$$\Delta L = \alpha_{urz}(T^\circ) \cdot T^\circ \cdot L_{urz} - \alpha_{pól}(T^\circ) \cdot T^\circ \cdot L_{pól}. \quad (2.10)$$

Analiza zależności (2.7a) wykazuje, że ze wzrostem temperatury nagrzewania różnica wydłużeń wzrasta nieliniowo. W celu stabilizacji geometrii wyrobu, przy obróbce cieplnej w urządzeniu, należy wytworzyć wydłużenie sumaryczne nie mniejsze niż 1% jego długości.

Przy nagrzewaniu półfabrykat ulega wydłużeniu o:

$$\Delta L = (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_{02} + \Delta_3) \cdot L \cdot K_1, \quad (2.11)$$

gdzie: odpowiednie wydłużenia spowodowane: Δ_1 – początkową krzywizną elementu, Δ_2 – różnicą współczynników rozszerzalności cieplnej materiałów, Δ_{02} – umownym przedziałem proporcjonalności przy $T^\circ = 20^\circ\text{C}$, Δ_3 – wydłużeniem względnym wyrobu, $K_1 = S_w / S_{prz}$ – współczynnik uwzględniający ściśnięcie przyrządu (S_{prz} – pole przekroju poprzecznego przyrządu).

Analiza zależności (2.11) pokazuje, że wraz ze wzrostem temperatury nagrzewania odkształcenie osiowe rośnie nieliniowo i wynosi nie więcej niż 1%. W proponowanym rozwiązaniu wał odkształca się przy nagrzewaniu z założoną prędkością, zgodnie z technologią obróbki cieplnej. Urządzenie wydłuża się w większym stopniu niż wyrób, proporcjonalnie do różnicy współczynników rozszerzalności liniowej, a prędkość chłodzenia jest od 1,5 do 3 razy mniejsza od prędkości chłodzenia wału.

Umożliwia to stabilizację obciążenia osiowego na początku chłodzenia i łagodne zdjęcie obciążenia. Przy obliczaniu typowych procesów należy rozwiązać problem niestacjonarnej przewodności cieplnej, to znaczy określić zależność zmiany temperatury i ilości przekazywanego ciepła w czasie, w dowolnym punkcie ciała. Równanie różniczkowe przewodności cieplnej w przypadku ciał sztywnych ma postać:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (2.12)$$

W celu rozwiązania analitycznego równania (2.12) należy wyznaczyć warunki brzegowe: 1) początkowy rozkład temperatury w materiale; 2) oddziaływanie na powierzchnię środowiska zewnętrznego, co można określić na trzy sposoby: a) temperaturą powierzchni, b) ilością ciepła przechodzącego przez powierzchnię, c) temperaturą otoczenia zewnętrznego i współczynnikiem przekazywania ciepła γ . Zgodnie z prawem Newtona:

$$dQ = \gamma (T_{prz}^\circ - T_c^\circ) dS, \quad (2.13)$$

gdzie: dQ – ilość ciepła,
 T_{prz}°, T_c° – temperatura ścianki przyrządu i cieczy,
 dS – jednostka powierzchni,
 b – współczynnik przewodności temperaturowej.

Wynikiem rozwiązania równania (2.12) jest funkcja, która powinna jednocześnie spełniać warunki brzegowe. Szukana funkcja zależy od dużej liczby parametrów, które można zgrupować w dwa bezwymiarowe kompleksy:

– kryterium Biota – $B_i = \frac{\gamma \delta_p}{\varphi}$,

– kryterium Fouriera – $F_0 = \frac{b \cdot t_{ch}}{\delta_p}$,

gdzie: γ – współczynnik wymiany ciepła na powierzchni granicznej,
 δ_{prz} – grubość ścianki przyrządu,
 φ – współczynnik przewodzenia ciepła,
 t_{ch} – czas chłodzenia.

Na podstawie drugiego twierdzenia podobieństwa, szukana funkcja w postaci temperatury bezwymiarowej $\frac{Q}{Q'}$, w różnych punktach może być przedstawiona jako:

$$Q/Q' = \Phi(B_i, F_0, L),$$

gdzie: $L = \frac{x}{\delta}$, x – współrzędne strefy nagrzewania.

Wał można przedstawić jako nieskończenie długi cylinder o promieniu R , w tym przypadku równanie różniczkowe przewodności cieplnej ma postać:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = b \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2} + \frac{\partial Q}{t \partial t} \right). \quad (2.14)$$

Warunki brzegowe: przy $r = R$; $\frac{\partial Q}{\partial t} = \gamma \frac{Q}{\varphi_c}$.

Warunki początkowe: przy $t = 0$; $Q = Q'$.

Na wykresie zależności $\varepsilon = \psi(T^\circ)$ (rys. 2.2b) pokazano charakter zależności odkształcenia przyrządu i wału przy chłodzeniu, gdzie ε_{ost} – odkształcenie półfabrykatu o wielkość ε_m (wykres 2.1b), w przypadku różnicy współczynników rozszerzalności liniowej.

Jeżeli współczynniki rozszerzalności cieplnej półfabrykatu i przyrządu są jednakowe, to odkształcenie osiowe może być (zgodnie z obliczeniami) uzyskane jako różnica długości przyrządu i półfabrykatu lub przez odpowiedni dobór prędkości ich chłodzenia (wykres 2.1a).

Naprężenia rozciągające osiowe przy obróbce cieplnej są określane z zależności:

$$\sigma_r = \alpha_T \cdot \Delta T^\circ \cdot E \cdot \frac{S_{pól}}{S_{prz}}, \quad (2.15)$$

gdzie: ΔT – różnica temperatury półfabrykatu i przyrządu przy chłodzeniu,

$$\alpha_T = \alpha(T) + T \frac{d\alpha}{dT} - \text{rzeczywista różnica współczynników rozszerzalności cieplnej.}$$

Jeżeli przy hartowaniu półfabrykatu (wał), jest on stopniowany w kierunku wzdłużnym, to warunki równości naprężeń roboczych, na wszystkich stopniach półfabrykatu, są określane z zależności:

$$S_w \cdot E_w^n \cdot \alpha(T^\circ) \cdot \frac{T^\circ}{S_{prz}^n} = S_w^{n-1} \cdot E_w^{n-1} \cdot \frac{\alpha(T^\circ)}{F_{prz}^{n-1}}, \quad (2.16)$$

gdzie: S_w^n , S_w^{n-1} , S_{prz}^n , S_{prz}^{n-1} – płaszczyzny przekrojów poprzecznych półfabrykatu i przyrządu w „ n ” i „ $n-1$ ” stopniach.

W pierwszym etapie chłodzenia wału (półfabrykatu) w przyrządzie, to znaczy, kiedy różnica temperatur półfabrykatu i przyrządu jest maksymalna, wielkość małych odkształceń ostatecznych półfabrykatu jest sumą odkształceń sprężystych ε_y , plastycznych ε_{pl} i temperaturowych ε_T :

$$\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_y + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_T, \quad (2.17)$$

gdzie: $\varepsilon_T = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_T(T^\circ) dT$.

Przy opracowanej technologii obróbki cieplnej, z przyłożeniem odkształceń osiowych, naprężenia pozostałe od operacji poprzednich ulegają likwidacji [47, 49], niezależnie od właściwości materiału. Jednak przy chłodzeniu wału rozciągniętego, zamocowanego w przyrządzie powstają nowe naprężenia rozciągające, równomiernie rozłożone w przekroju półfabrykatu. Poziom naprężen końcowych jest określane zależnością:

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon_y + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_T). \quad (2.18)$$

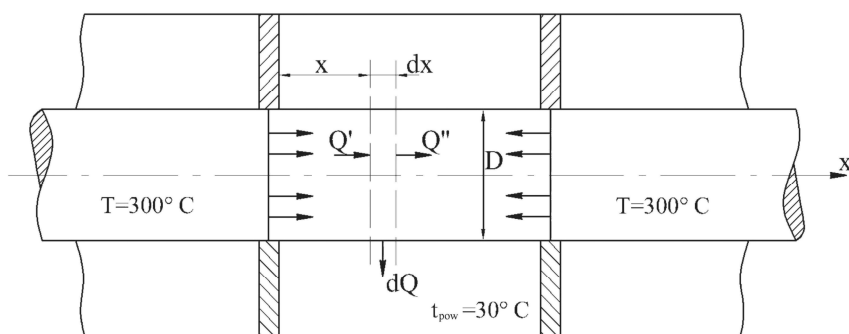
Przy chłodzeniu powierzchnia zewnątrz półfabrykatu ostyga szybciej, niż wewnątrz i naprężenia w warstwach wierzchnich będą przeciwne w stosunku do naprężeń wewnątrz półfabrykatu. Przy ochłodzeniu pełnym, znaki naprężeń ulegną zamianie, główna zaleta proponowanego przedsięwzięcia techno-

logicznego polega na tym, że w zewnętrznych warstwach, naprężenia będą tego samego znaku, co wyklucza paczenie się części.

Dalsza obróbka, przy równomiernym zdejmowaniu metalu odnośnie do osi wału, również, nie spowoduje paczenia. Przedstawione w tym rozdziale zależności są prawidłowe przy założeniu liniowości modelu. Nieliniowość, to znaczy odkształcenie plastyczne przy hartowaniu z odkształceniem osiowym nie przekracza 1%, co umożliwia aproksymację tej zależności z wystarczającą w praktyce dokładnością. Proces hartowania jest początkiem technologii obróbki cieplnej, a więc procesy relaksacji i inne następstwa tutaj nie są rozpatrywane. Kontrola czynna stanu materiałów, w procesie nagrzewania i odkształcenia półfabrykatu, umożliwia sterowanie naprężeniami szczątkowymi w ciągu całego czasu obróbki.

Urządzenie do realizacji sposobu sterowania procesem odkształcenia plastycznego, wałów o małej sztywności (rys. 2.3) [48, 50, 51], zawiera piec szybowy 1, z sekcyjnymi elektrycznymi elementami grzewczymi 2. Obrabiany półfabrykat jest ustawiany w pryzmie i umieszczany w piecu. Wstępnie na półfabrykacie są ustawiane żebra, rozdzielające przestrzeń pieca szybowego na komory, przy czym każda komora ma wejście i wyjście powietrza chłodzącego.

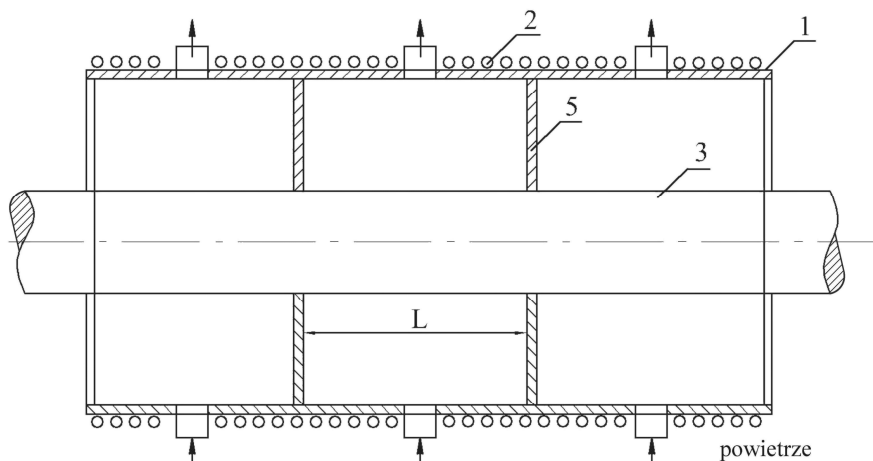
Po ustawieniu na sztywno półfabrykatu, są włączane elementy grzewcze w celu nagrzania półfabrykatu. Wartość bieżąca temperatury jest określana przy pomocy termopar, znajdujących się w każdej komorze. Po osiągnięciu temperatury półfabrykatu $T^{\circ} = 300^{\circ}\text{C}$ jest włączany system oddziaływania osiowego (rozciągania) na półfabrykat.



Rys. 2.3. Schemat urządzenia do sterowania procesem odkształceń plastycznych wału o małej sztywności

Właściwości fizyko-mechaniczne wzdłuż półfabrykatu nie są jednakowe, tak więc na różnych jego odcinkach czas osiągnięcia granicy plastyczności może być inny. Rejestracja miejsca naruszenia proporcjonalności wydłużenia osiowego jest wykonywana przy pomocy czujnika pneumatycznego (na rysunku 2.3 umownie niepokazany).

Elektryczne sekcje grzewcze, na odcinku, na którym występuje strefa umocnienia plastycznego, są odłączane i jest włączana sprężarka podająca powietrze chłodzące. Odcinek półfabrykatu chłodzony powietrzem osiąga temperaturę $T^{\circ}=200^{\circ}\text{C}$, po czym znowu następuje nagrzewanie po odłączeniu podawania powietrza. Schemat obliczeniowy do określenia czasu ochłodzenia odcinka i jego długości jest przedstawiony na rysunku 2.4.



Rys. 2.4. Schemat obliczeniowy do określania długości odcinka oraz czasu jego chłodzenia

Materiał półfabrykatu: stal X10CrNi18-8, masa właściwa – $\gamma = 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$,
 współczynnik przewodności cieplnej – $\lambda_s = 14,5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}}$, pojemność cieplna
 – $C = 0,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$, współczynnik przekazywania ciepła od powietrza do wału
 – $\psi_w = 6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$, współczynnik przewodności cieplnej – $\mu = 5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$.

W dalszym ciągu rozpatrzono przekazywanie ciepła przez sworzeń cylindryczny, którego przekrój poprzeczny $S = \pi \cdot R^2$, a obwód przekroju $U = 2\pi \cdot R$, (R – promień wału).

Temperatura sworznia zależy funkcjonalnie tylko od jego długości, to znaczy:

$$T^{\circ} = f(x) .$$

Określono zasadę zmiany temperatury wzdłuż sworznia i ilość ciepła, przekazywanego przez sworzeń przy trybie stacjonarym.

W odległości x od początku odcinka (rys. 2.4) wyodrębniano element dx , w przypadku, którego zapisywano równanie bilansu cieplnego:

$$Q' - Q'' = dQ.$$

Zgodnie z zasadą Fouriera:

$$Q' = -\lambda_{przy} \cdot S \frac{dT^\circ}{dx},$$

$$Q'' = -\lambda_{prz} \cdot S \left(\theta + \frac{dT^\circ}{dx} \cdot dx \right),$$

a więc

$$Q' - Q'' = dQ = \lambda_{prz} \cdot S \frac{d^2 T^\circ}{dx^2} \cdot dx, \quad (2.19)$$

a z drugiej strony

$$dQ = \alpha_w \cdot U \cdot \theta \cdot dx. \quad (2.20)$$

Porównując (2.19) i (2.20) otrzymano:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{\psi_B \cdot U \cdot T}{\lambda_{prz} \cdot S} = m^2 \cdot \theta, \quad (2.21)$$

gdzie: $m = \sqrt{\psi_w \cdot \frac{U}{\lambda_{prz} \cdot S}} \left[\frac{1}{m} \right]$

Rozwiązanie równania (2.21) można zapisać w postaci:

$$T^\circ = C_1 \cdot e^{mx} + C_2 \cdot e^{-mx}.$$

Wartości współczynników C_1 i C_2 są wyznaczone z warunków brzegowych. W przypadku sworzni o nieskończonej długości i przekroju okrągłym:

$$\frac{U}{S} = \frac{4}{D},$$

$$C_1 = x \cdot m = x \sqrt{\frac{\psi_w \cdot U}{\lambda_{prz} \cdot S}} = x \sqrt{\frac{6 \cdot 4}{0,045 \cdot 14,5}} = 6x,$$

$$T^\circ = T_0^\circ \cdot e^{-mx},$$

gdzie: x

– współrzędna bieżąca,

$T^\circ = T^\circ - T_{\text{oddz}}$ – temperatura otoczenia,

$T_0^\circ = T_0^\circ - T_{\text{pow}}$ – temperatura początkowa,

T° – temperatura bieżąca, $T_0^\circ = 300^\circ C$, $T_{\text{pow}}^\circ = 30^\circ C$.

Równanie krzywej temperaturowej przy danych warunkach jest następujące:

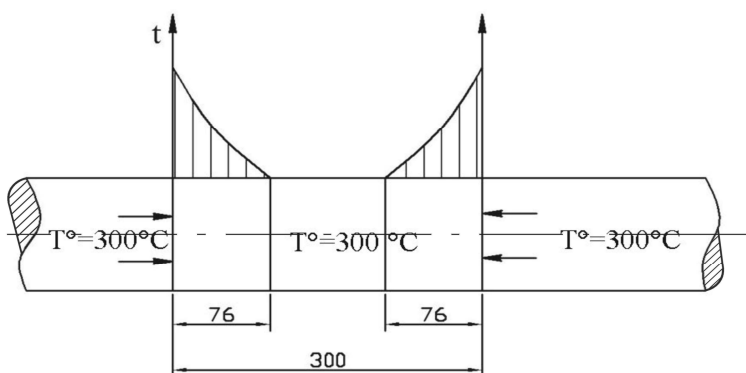
$$T^{\circ} = 270 \cdot e^{-6x} \quad (2.22)$$

Z równania (2.22) jest wyznaczana długość odcinka x , na którym zostanie ustalona temperatura $T^{\circ} = 200^{\circ}$:

$$T^{\circ} = T^{\circ} - T_{\text{pow}} = 260^{\circ} - 30^{\circ} = 170^{\circ} \text{C},$$

$$\frac{170}{270} = \frac{1}{e^{6x}}; e^{6x} = \frac{270}{170} = 1,58; 6x = 0,45; x = 0,076 \text{ m} = 76 \text{ mm}.$$

Schemat obliczeniowy do wyznaczania czasu chłodzenia odcinka przedstawiono jest na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Schemat obliczeniowy do określania czasu chłodzenia odcinka

Ilość ciepła przekazywanego przez przekrój:

$$Q = \lambda_u \cdot S \cdot m \cdot T_0 = 14,5 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,045^2}{4} \cdot 6 \cdot 270 = 37,3 \text{ J}.$$

Czas chłodzenia odcinka wału:

kryterium:

$$B_i = \psi_w \cdot \frac{R}{\lambda_{prz}} = \frac{6 \cdot 0,0225}{14,5} = 0,0093,$$

$$F_0 = \mu \cdot \frac{\tau}{\delta_p^2} = 5 \cdot 10^{-6} \frac{\tau}{0,0225^2} = 0,0098 \tau.$$

Stosując zależność w przypadku małych wartości B_i otrzymano:

$$T = T' \cdot e^{-2B_i \cdot F_0}, \quad (2.23)$$

gdzie: $T^{\circ} = 200^{\circ} - 30^{\circ} = 170^{\circ} \text{C}$, $T' = 300^{\circ} - 30^{\circ} = 270^{\circ} \text{C}$.

Z zależności (2.23) jest określany czas chłodzenia odcinka wału:

$$t_{ch} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta^2 \cdot \ln \frac{\theta'}{\theta}}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0093} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,0225^2 \cdot \ln \frac{270}{170}}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0093} = 0,025 \text{ h} = 90 \text{ s}.$$

Ilość ciepła, odprowadzanego przez powietrze w czasie pełnego ochłodzenia odcinka wału o długości $L = 300 \text{ mm}$ przy $T' = 100^\circ\text{C}$, wyznacza się jako:

$$\begin{aligned} Q' &= c \cdot \gamma \cdot V \cdot T', \\ V &= \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 0,045^2}{4} \cdot 0,3 = 4,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3, \\ Q' &= 0,5 \cdot 10^3 \cdot 7900 \cdot 100 \cdot 4,75 \cdot 10^{-4} = 187625 \text{ J}. \end{aligned}$$

Ilość ciepła przepływającego przez przekrój z gorącej strony w czasie $t = 90 \text{ s}$ jest określana z zależności:

$$Q_{prz.} = 2 \cdot 37,3 \cdot 90 = 6714 \text{ J}.$$

2.2. Analiza teoretyczna i model matematyczny procesów obróbki cieplno-mechanicznej

W przypadku dowolnego odkształcenia, naprężenia i odkształcenia powinny być przedstawione w postaci tensorów drugiego rzędu i wtedy można je przedstawić jako układ równań liniowych, wyrażających każdą składową tensora naprężeń przez składową tensora odkształcenia i odwrotnie. W danym przypadku to uogólnienie doprowadziłoby tylko do niepotrzebnego skomplikowania zagadnienia, dlatego zastosowano zależność:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

lub

$$\varepsilon = j \cdot \sigma,$$

gdzie: $E = \frac{1}{j}$, j – współczynnik podatności $\left[\frac{\text{mm}^2}{\text{N}} \right]$.

Przy takim podejściu jest zakładany prosty sposób odkształcenia – odkształcenie postaciowo czyste lub odkształcenie jednoosiowe. Niesprężystość materiału można określić trzema warunkami: każdej wartości naprężenia odpowiada jedna równoważna wartość odkształcenia lub odwrotnie; równoważna wartość wyjściowej wielkości jest osiągana tylko po upływie odpowiedniego czasu – równowaga jest uzyskiwana w zakresie od mikrosekund do bardzo dużych odcinków czasu; związek między odkształceniem i naprężeniem jest liniowy. Warunki pierwszy i trzeci jest to powtórzenie warunków spręży-

stości idealnej. W proponowanym sformułowaniu zagadnienia, sens liniowości można przedstawić następującym twierdzeniem: jeżeli zmiana naprężenia w czasie $\sigma_1(t)$ powoduje odkształcenie $\varepsilon_1(t)$ i jeżeli naprężenie $\sigma_2(t)$ prowadzi do odkształcenia $\varepsilon_2(t)$, to $\sigma_1(t) + \sigma_2(t)$ powoduje odkształcenie $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$.

Wiadomo, że układem termodynamicznym jest dowolna substancja, która w przypadku wielu nieskończenie małych zmian parametru zewnętrznego może przyjmować wiele stanów równoważnych. Dlatego pierwszemu warunkowi niesprężystości, zawierającemu wymagania jednoznaczności, równoważnego stosunku między naprężeniami i odkształceniem, w związku z pełną zdolnością do odbudowy, odpowiadają wszystkie materiały, które odpowiadają określeniu termodynamiczne stabilnych ciał. Drugi warunek niesprężystości oznacza, że w odpowiedzi na zmianę przyłożonego naprężenia mechanicznego, w celu ustalenia równowagi w materiale niesprężystym, potrzebny jest pewien czas.

Samonastawianie układu termodynamicznego w czasie na nowy stan równowagi, w odpowiedzi na zmianę parametru wejściowego, nazywa się właśnie relaksacją. Jeżeli oddziaływaniem wejściowym jest naprężenie, to relaksacja jest zależnym od czasu ustaleniem stanu wartości równoważnej parametru wyjściowego – odkształcenia (lub odwrotnie). Zewnętrznym przejawem relaksacji jest nastawienie parametrów wewnętrznych do nowych wartości równoważnych. Z punktu widzenia teorii automatycznej regulacji parametry wewnętrzne układu wpływają na stronę ilościową procesu przejściowego, czyli uważa się, że relaksacja jest procesem przejściowym. Między σ i ε istnieje nie tylko bezpośredni związek czysto sprężysty, ale również powiązanie pośrednie poprzez parametr wewnętrzny. W miarę relaksacji parametru wewnętrznego do wartości równowagi, odkształcenie ε dąży również do odpowiedniej wartości nie momentalnie, lecz z określoną prędkością (zmiana momentalna odpowiada przypadkowi sprężystości w postaci czystej).

Relaksacja niesprężysta jest w istocie właściwością termodynamiczną, uwarunkowaną powiązaniem σ i ε , z określonymi parametrami wewnętrznymi, które mogą ulegać zmianie do wartości równowagi w wyniku procesów kinetycznych (na przykład dyfuzji). Zewnętrznym przejawem takiej relaksacji wewnętrznej są zależne od czasu właściwości, dotyczące odkształcania.

Paczenie półfabrykatu jest funkcjonalnie powiązane z niejednorodnością odkształcenia plastycznego i pola temperaturowego oraz z różnym charakterem odkształceń plastycznych i sprężystych przy zdejmowaniu obciążenia. Analogiczny proces zachodzi także z naprężeniami szczątkowymi, ponieważ ich relaksacja zaczyna się niejednocześnie i w różnych częściach wyrobu, zarówno w przekroju poprzecznym jak i wzdłużnym.

Opracowane sposoby stabilizacji kształtu geometrycznego części o małej sztywności [41, 52] bazują na odkształceniu osiowym przy odpuszczaniu – sterowaniu nimi przy nagrzewaniu i odpuszczaniu. Celowe jest więc rozpatrzenie trzech modeli sterowania: odkształceniem sprężysto-plastycznym; stabilizacją obciążeń zewnętrznych i procesem zdejmowania obciążenia. Taki umo-

wny podział jest poprawny w przypadku rozpatrywania modelu prętowego, kiedy analizowane są naprężenia pierwszego rzędu.

W modelu pierwszym naprężenia $\sigma(t)$ i odkształcenia $\varepsilon(t)$ ulegają zmianie w czasie, sterowanie jest realizowane według dwóch parametrów σ i T° , jest kontrolowana wielkość wyjściowa $\varepsilon(t)$; w drugim $\sigma = const$ (podtrzymuje system sterowania automatycznego), zmianie ulega $\varepsilon(t)$; w modelu trzecim naprężenie σ jest utrzymywane na stałym poziomie, sterowanie jest realizowane według parametru $\varepsilon(t)$, z uwzględnieniem zmiany temperatury stygnięcia T° .

Do jakościowego zbadania procesów, są niezbędne równania, opisujące układ dynamiczny obróbki cieplno-mechanicznej, jako obiekt sterowania.

W danym przypadku zastosowano znaną metodykę [147] podziału obiektu na człony dynamiczne – tabela 2.1. W celu scharakteryzowania stanu członu dynamicznego, jako współrzędną uogólnioną na wejściu członu przyjęto $\sigma_l(\varepsilon)$, a na wyjściu $\varepsilon_l(\sigma)$, i określono je odpowiednio jako wejściowa i wyjściowa wielość członu, o działaniu ukierunkowanym.

Proces odkształcenia sprężysto-plastycznego można reprezentować członem o działaniu ukierunkowanym z wielkością wyjściową σ oraz wyjściową ε i odwrotnie w zależności od tego, czy rozpatrywana jest relaksacja naprężeń czy też podatności.

Eksperymentalne charakterystyki statyczne (zależność wielkości wyjściowej ε członu od wejściowej σ w ustalonym trybie) przedstawiono na wykresie 2.2.

Istotne jest, że człon dynamiczny niekoniecznie jest przedstawiony w postaci konstrukcyjnej lub schematycznej. W niektórych przypadkach człony dynamiczne w ogóle mogą nie mieć sensu fizycznego, charakteryzując tylko zależności matematyczne, pomiędzy niektórymi wielkościami układu automatycznego i obiektu.

Modelami przedstawionych charakterystyk statycznych są zależności nieliniowe i przy realizacji układu sterowania automatycznego są one linearyzowane, umożliwia to uproszczenie układu sterowania automatycznego, nie powodując obniżenia wymagań odnośnie dynamiki procesów obróbki cieplno-mechanicznej.

Charakterystyki statyczne w pełni odzwierciedlają zachowanie członu dynamicznego w trybie ustalonym, co umożliwia opracowanie zasad sterowania odkształceniem sprężysto-plastycznym.

Układ sterowania działa również w trybie nieustalonym, dlatego ważne jest przy badaniu układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej, zachowanie członów dynamicznych, w trakcie procesów przejściowych.

Rodzinę charakterystyk statycznych zbudowanych w przypadku różnych wartości temperatury T przedstawiono na wykresie 2.2.

Charakterystyki statyczne obiektu sterowania nie zawierają czasu relaksacji, co jest przeszkodą w opracowaniu urządzenia i regulowaniu procesu obróbki cieplno-mechanicznej.

Opis powinien być realizowany na podstawie układu parametrów, który można rozpatrywać jako właściwość samego materiału. Przy takim podejściu, istotny jest stosunek między naprężeniem i odkształceniem, zapisany w postaci liniowego równania różniczkowego, zawierającego naprężenie, odkształcenie i ich pochodne po czasie. Liniowe równania różniczkowe odkształcenia, które opisują niesprężystość, zawierają trzy parametry niezależne. Odpowiednio model jest budowany z trzech podstawowych elementów – dwóch sprężyn i tłumika.

Określenie niesprężystości zawiera wymóg liniowości, a więc równania różniczkowe niesprężystości, wiążące σ i ε , powinny być równaniami pierwszego stopnia i zawierać tyle niezależnych stałych, ile jest niezbędnych do opisu niesprężystego zachowania danego ciała sztywnego. W ogólnej postaci równanie liniowe ze stałymi współczynnikami można zapisać w sposób następujący:

$$a_0 \cdot \sigma + a_1 \cdot \frac{d\sigma}{dt} t + \dots + a_n \cdot d^n \frac{\sigma}{dt^n} = b_0 \cdot \varepsilon + b_1 \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + \dots + b_n \cdot d^n \frac{\varepsilon}{dt^n} \quad (2.24)$$

lub

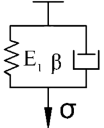
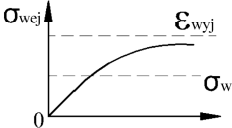
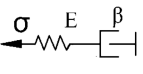
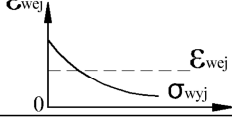
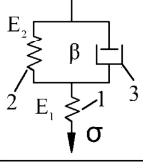
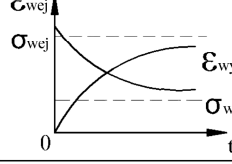
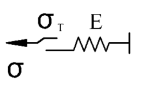
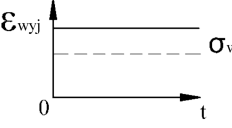
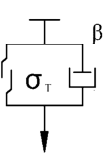
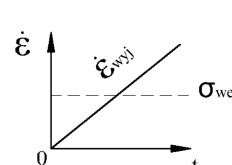
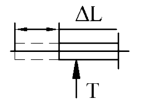
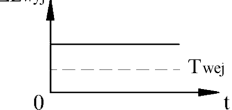
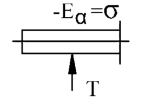
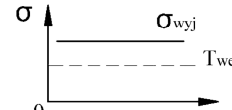
$$A\sigma = B\varepsilon ,$$

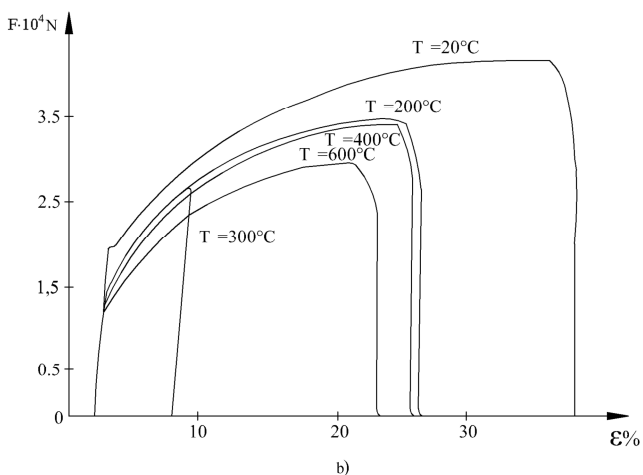
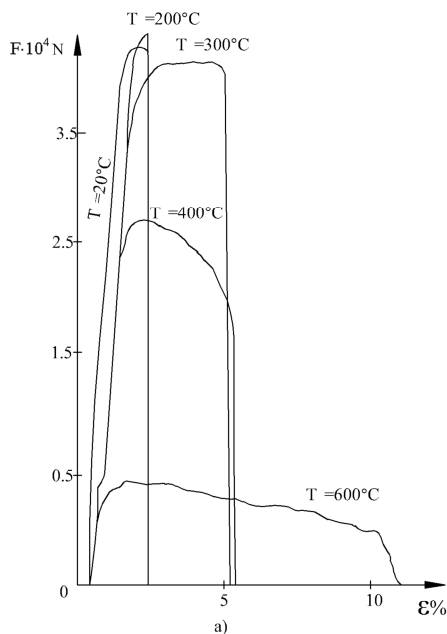
gdzie: A i B – operatory liniowe, zawierające odpowiednie współczynniki a_i i b_i .

Układ mechaniczny może być modelem określonego materiału niesprężystego wtedy, gdy spełnia te same zależności między siłą, przemieszczeniem i czasem, co odpowiednio naprężenia, odkształcenia i czas w przypadku materiału niesprężystego. Siła działająca na sprężynę odzwierciedla naprężenie, przemieszczenie-odkształcenie, a współczynnik sztywności sprężyny K – odpowiada modułowi sprężystości E lub podatności j .

Cechą charakterystyczną takiej sprężyny jest nagromadzona w niej energia odwracalna. Innym elementem niezbędnym do występowania tarcia wewnętrznego jest tłumik Newtona, który jest tłokiem przemieszczającym się w idealnie lepkiej cieczy, prędkość ruchu tłoka jest proporcjonalna do działającej siły, a więc praca w pełni jest zużywana na powstawanie ciepła. W przypadku takich ciał sztywnych tłumik jest stosowany tylko w połączeniu ze sprężyną.

Tab. 2.1. Człony dynamiczne i ich opis matematyczny

	Model mechaniczny	Opis matematyczny	Proces przejściowy	Transmitacje operatorowe
1.		$\sigma = E\varepsilon + \beta\dot{\varepsilon}$ $T\dot{\varepsilon} + \varepsilon = K\sigma_{wej}$ $\sigma = \sigma_0/E(1 - e^{-t/T})$		$G(S) = \varepsilon(S)/\sigma(S) =$ $= K/(TS + 1)$
2.		$\dot{\varepsilon} = \sigma/\beta + \dot{\sigma}/E$ $T\sigma + \sigma = K\dot{\varepsilon}$ $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-t/T}$		$G(S) = \sigma(S)/\varepsilon(S) =$ $= K/(TS + 1)$
3.		$E\varepsilon + \beta\dot{\varepsilon} = (1 + E/E_2)\sigma + (\beta/E_1)\dot{\sigma}$ $T_1\dot{\varepsilon} + \varepsilon = T_2\dot{\sigma} + K\sigma$ $\sigma = \varepsilon_0(E + (E_1E_2))e^{-(t(E_1 + E_2)/\beta)}$		$G(S) = \varepsilon(S)/\sigma(S) =$ $= \frac{K(T_2S + 1)}{(T_1S + 1)}$
4.		$\sigma < \sigma_T \quad \sigma \geq \sigma_T$ $\sigma = \varepsilon\sigma \quad \sigma = \sigma_{wyj}$ $\sigma = K\varepsilon_{wej} \quad \varepsilon_{wej} \geq \sigma_T/E$		$G(S) = \varepsilon(S)/\sigma(S) =$ $= K = 1/E$ przy $\sigma < \sigma_T$
5.		$\sigma \geq \sigma_T \quad \sigma = \sigma_T + \beta\dot{\varepsilon}$ $\sigma \leq \sigma_T \quad \sigma/\beta = \dot{\varepsilon}$ $\sigma = \sigma_0 > \sigma_T \quad \dot{\varepsilon} = K(\sigma_0 - \sigma_T)$ $S\varepsilon_{wyj} = K\sigma_{wej}$		$G(S) = \varepsilon(S)/\sigma(S) =$ $= K/S$
6.		$\varepsilon = \alpha \cdot L T_{wej}$ $(TS + 1)\varepsilon = K T_{wej}$ $T = C \cdot Q / K \cdot F$		$G(S) = \varepsilon(S)/T(S) =$ $= K = \alpha \cdot L$ $G(S) = K/T \cdot S + 1$
		$\sigma = \alpha \cdot E T > \sigma_T$ $T = \sigma_T / E \alpha$		$G(S) = \sigma(S)/T(S) =$ $= \alpha \cdot E$



Wykres 2.2. Charakterystyki statyczne układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej

W trakcie konstruowania modeli elementy mechaniczne mogą być łączone szeregowo i równolegle [139]. Przy łączeniu szeregowym (tab. 2.1, mod. 2) naprężenia σ_1 i σ_2 są równe, a odkształcenia się sumują: $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$. Przy połączeniu równoległym tych elementów $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$, $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$. Kombinacje modeli różnorodnych połączeń z dwóch i trzech elementów przedstawiono w tabeli 2.1.

Model 1 posiada inercyjność jako wynik podatności i oddziaływania sprężystego. Do opisu ilościowego należy wyprowadzić, a następnie rozwiązać równanie różniczkowe odkształcenia, odpowiadające przytoczonemu modelowi. Stosując zasadę równoległo-szeregowego połączenia elementów modelu mechanicznego przyjęto odkształcenie sprężyny $\varepsilon_1 = j \cdot \sigma_1 = \frac{\sigma_1}{E}$, a tłumika

$$\varepsilon_2 = j \cdot \frac{\sigma_2}{E} T. \text{ Eliminując } \varepsilon_1, \varepsilon_2, \sigma_1 \text{ i } \sigma_2, \text{ otrzymano równanie (tab. 2.1, mod.1).}$$

Rozwiązując to równanie, uzyskano funkcję podatności. Proponowany model nie dopuszcza odkształcenia momentalnego, to znaczy nie odzwierciedla on rzeczywistego zachowania ciała sztywnego, w momencie $t = 0$, nie można wytworzyć odkształcenia ε_0 i opisać relaksacji naprężenia. Jednak w połączeniu z innymi elementami model ten także znajduje zastosowanie.

Przy połączeniu szeregowym sprężyny i tłumika (tab. 2.1, mod. 2) wygodnie jest przedstawić lepkość β wielkością $E \cdot T$ (gdzie T – stała czasu). Rozpatrzony model umożliwia opisanie praktycznie pełnej relaksacji σ do wartości σ_2 , równych zero.

Uogólnione równanie odkształceń, odpowiadające temu modelowi, można otrzymać zakładając $\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1$ i $\sigma_2 = E \cdot T \cdot \dot{\varepsilon}_2$ (tab. 2.1, mod. 2). Równanie w przypadku tych dwóch modeli jest ekwiwalentne równaniu (2.24) wtedy, gdy wszystkie współczynniki oprócz a_0 , a_1 i b_0 , b_1 są równe zero i obie części pierwszego równania podzielone są przez b_0 , a drugiego przez a_0 .

Z równania modelu 2 (tab. 2.1) wynika, że również drugi model – szeregowo połączone tłumik i sprężyna – opisują materiał niesprężysty, ponieważ umożliwia on określenie stacjonarnej podatności ciągliwości. Należy więc rozpatrzeć model, składający się z trzech elementów. W tabeli 2.1, (mod. 3) jest przedstawiony model trzejelementowy. Model taki ma wszystkie specyficzne cechy charakterystyczne materiału niesprężystego; w tym przypadku odkształcenie na jednostkę naprężenia zmienia się od chwilowej wartości j do ostatecznej wartości podatności $j_\Sigma = j_1 + j_2$. W oparciu o model jest możliwe opisanie relaksacji naprężenia, ponieważ zaczynając z momentu $t = 0$, można w nim podtrzymywać odkształcenie ε_0 ; w tym przypadku początkowo jest rozciągany tylko element – sprężyna 1, a następnie zaczyna przemieszczać się tłok tłumika 3, dopóty, dopóki naprężenie σ_3 , działające na tłumik (naprężenie na tłumiku), nie osiągnie wartości zero. Przemieszczenie to wpływa na zmniejszenie naprężenia od wartości początkowej $\frac{\varepsilon_0}{j_1}$ do wartości końcowej

$$\frac{\varepsilon_0}{(j_1 + j_2) \varepsilon_0 \cdot \frac{1}{j_1 + j_2}}.$$

Rozpatrywany jest model prosty, ale jednocześnie posiadający wszystkie charakterystyki materiału niesprężystego. Równanie różniczkowe, opisujące taki model i jego rozwiązanie, przedstawiono w tabeli 2.1 – model 3. W przypadku elementów 1–3 $\varepsilon_1 = j \cdot \sigma_1$, $\varepsilon_2 = j \cdot \sigma_2$, $\varepsilon_3 = j \cdot \sigma_3$. Warunki początkowe, przy rozwiązaniu równania są następujące: $\sigma = \sigma_2$, $\sigma = 0$, $t \geq 0$, $\varepsilon = j_1 \cdot \sigma$, przy $t = 0$. Przedstawione równanie różniczkowe trzech elementów modelu jest równoważne równaniu (2.24), kiedy wszystkie współczynniki oprócz a_0 , a_1 i b_0 , b_1 są równe zero i obie części równania są podzielone przez b_0 . Jednocześnie można oczekiwać, że dowolny bardziej złożony model 3-elementowy uwzględnia w równaniu różniczkowym odkształcenia pochodne wyższych rzędów, co komplikuje opis matematyczny obiektu sterowania nie zmieniając fizycznej istoty procesu. Z rozwiązania równania wynika, że funkcja podatności jest eksponencjalną funkcją rosnącą typu $\left[1 - \exp\left(\frac{-t}{t_\sigma}\right)\right]$, (t_σ – czas relaksacji

przy stałym naprężeniu). Zgodnie z teorią sterowania automatycznego, tę wielkość przyjęto nazywać stałą czasową. W szczególności, przy $t = t_\sigma$, $j(t)$ ulegnie zwiększeniu o $(1 - e^{-1})$, w stosunku do pełnej zmiany j_2 . Do określenia funkcji relaksacji naprężeń niezbędne są następujące warunki początkowe: $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\varepsilon = 0$, $t \geq 0$, $\sigma = E \cdot \varepsilon_0$ przy $t = 0$. Dodatkowo wprowadzono oznaczenie $t_\varepsilon = t_\sigma \cdot \frac{j_1}{j_1 + j_2} = t_\sigma \cdot \frac{E_2 - t_1}{t}$, gdzie $\Delta = \frac{j_1}{j_2}$ stopień relaksacji (wielkość bezwymiarowa). Wartość t_ε jest to czas, niezbędny do zmniejszenia naprężenia o e razy, czyli t_ε jest to czas relaksacji naprężenia przy stałym odkształceniu. Funkcja relaksacji naprężeń jest eksponencjalnie malejącą funkcją typu $\exp \rightarrow \frac{-t}{t_\varepsilon}$.

Łącząc kolejno n sprężysto-ciągłych elementów (sprężyna wprowadzona równolegle do tłumika), otrzymano model o takich samych własnościach ogólnych, lecz o znacznie bardziej złożonej zależności procesu odkształcenia od czasu.

Równoległe połączenie n elementów (sprężyna połączona szeregowo z tłumikiem) utworzy model podobny do modelu 2 (tab. 2.1), lecz ściślej opisujący właściwości relaksacyjne materiałów rzeczywistych, w tym przypadku rozwiązanie równania wygląda następująco:

$$\sigma_1 = \varepsilon_0 \cdot E_m \cdot e^{\frac{t}{t_m^\varepsilon}}, \quad t_m^\varepsilon = \frac{\beta_m}{E_m^\varepsilon},$$

a przy $n \rightarrow \infty$, zamieniając stałe E_m i E_m^ε funkcją rozkładu:

$$\frac{E(t)}{\sigma_1} = \varepsilon_0 \int_0^\infty E(t) \cdot e^{\frac{-t}{t}} dt.$$

Zachowanie się półfabrykatów ustalonych, na sztywno i swobodnie, w trakcie nagrzewania oraz ich modele mechaniczne i matematyczne przedstawiono w tabeli 2.1, model 6. Przy opracowaniu schematu strukturalnego obiektu, jakim jest układ dynamiczny obróbki cieplno-mechanicznej, modele te będą rozpatrywane w połączeniu z zaprezentowanymi modelami mechanicznymi (tab. 2.1).

W celu dalszych przekształceń matematycznych, w przypadku rozpatrywanych modeli, należy sformułować zasadę superpozycji. Jeżeli do materiału kolejno w różnych odstępach czasu przykładany jest ciąg naprężeń, to każde wpływa na odkształcenie. Sumaryczne odkształcenie spowodowane działaniem naprężeń stałych σ_1 i σ_2 , jest równe $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$, gdzie $\varepsilon_1(t)$ i $\varepsilon_2(t)$ – odkształcenia, które powstałyby, jeżeli σ_1 i σ_2 oddziaływałyby niezależnie, analogicznie, więc odkształcenie sumaryczne $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$ jest spowodowane naprężeniami $\delta_1(t) + \delta_2(t)$. Zasada superpozycji jest najbardziej ogólnym sformułowaniem wymagania liniowości, zawartym w przytoczonym wcześniej określeniu niesprężystości. W dalszym ciągu przeanalizowano funkcję następstwa: w momencie t_i przyłożono naprężenie σ_i ; z funkcji podatności wynika, że przy $t \geq t_i$, $\varepsilon(t) = \sigma \cdot j(t - t_i)$. Przy założeniu, że kolejno w czasie $t_1, t_2, \dots, t_n$ są przykładane naprężenia σ_i ($i = 1, 2, \dots, n$), to zgodnie z zasadą superpozycji (jeżeli odkształcenie zmienia się dyskretnie lub ciągle) otrzymano:

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot j(t - t_i) \quad \text{lub} \quad \varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t j(t - t_i) \sigma_i(t) dt. \quad (2.25)$$

Równanie (2.25) wiąże więc $\varepsilon(t)$ ze zmianami naprężenia w czasie przez funkcję podatności. Analogicznie, jeśli odkształcenie jest zmienną niezależną, a badana jest zależność naprężenia od czasu, to:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \frac{t - t_i}{j} \quad \text{lub} \quad \sigma(t) = \int_{-\infty}^t E(t - t_i) \varepsilon(t) dt. \quad (2.26)$$

Równania całkowe (2.25) i (2.26) wskazują, że obiekt zachowuje się w taki sposób, jakby miał pamięć; odkształcenie w momencie t związane jest z czasem poprzednim, poprzez zmianę naprężenia $\sigma(t)$ i podatności $j(t)$, będących charakterystykami metalu. Ta własność pamięci pokazuje, że $\varepsilon(t)$ zależy nie tylko od chwilowej wartości $\sigma(t)$, ale również od parametrów wewnętrznych, których wartości chwilowe odtwarzają prehistorię materiału.

Jeżeli zmiany naprężenia $\sigma(t)$ w czasie przebiegają zarówno ciągle, jak dyskretnie, to można zastosować kombinację zależności (2.25) i (2.26), to znaczy:

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^n \sigma_i \cdot j(t - t_i) + \int_{-\infty}^t j(t - t_i) \sigma_i(t) dt. \quad (2.27)$$

Do pełnej analizy obiektu sterowania – układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej rozpatrzono kilka modeli z elementem sprężysto-plastycznym

(tab. 2.1, mod. 2.4). Połączone szeregowo: element plastyczny i sprężyna utworzą model ciała sprężysto-plastycznego. Do granicy plastyczności σ_T ciało odkształca się sprężysto, płynięcie plastyczne zachodzi przy stałym naprężeniu. Po zdjęciu obciążenia powstaje odkształcenie trwałe. Równania stanu plastycznego, wiążące naprężenia z odkształceniem, nie zawsze mają rozwiązanie z powodu złożoności procesu odkształcenia plastycznego [44, 81, 85, 103].

Model z elementami ciągliwo-plastycznymi (tab. 2.1, mod. 5) charakteryzuje się równoległymi połączeniami elementów ciągliwego i plastycznego. Przy naprężeniu poniżej granicy plastyczności σ_T , ciało nie ulega odkształceniu: przy $\sigma_T = \text{const} = \sigma_0 > \sigma_T$ prędkość odkształcenia jest proporcjonalna do naprężenia nadmiarowego $\sigma_0 - \sigma_T$. Model ten opisuje materiały, które mają zauważalną plastyczność przy wysokich naprężeniach (na przykład metale w wysokiej temperaturze).

Przy jednoosiowym stanie naprężeniowym równanie odkształcenia – równanie odkształcenia środowiska ciągliwo-plastycznego ma postać, przedstawioną w tabeli 2.1, model 5. Specyfiką takich modeli jest, że w strefach o naprężeniach niezbyt dużych nie powstają odkształcenia.

Połączenie szeregowo elementów ciągliwego i plastycznego utworzy model o następujących własnościach: przy $\sigma_l > R_e$ – czynnik płynie, podobnie jak ciecz lepka; przy $\sigma_l = R_e$ – ma miejsce płynięcie plastyczne, przy którym naprężenia nie mogą przekraczać granicy plastyczności. Dodatkowy element sprężysty włączony, do modelu ciągliwo-plastycznego, uwzględnienia wpływ odkształceń sprężystych. W przypadku naprężeń niższych niż granica plastyczności $\sigma_l < \sigma_T$, model zachowuje się jak czynnik sprężysto-plastyczny, przy $\sigma_l = \sigma_T$ występuje płynięcie plastyczne – naprężenia nie mogą być wyższe od granicy plastyczności.

Przedstawione wcześniej modele trzelementowe, odpowiadające równaniu różniczkowemu odkształcenia i zawierające tylko naprężenia i odkształcenia oraz ich pochodne pierwszego stopnia po czasie, są modelami prostymi. W takich modelach funkcje podatności relaksacji naprężeń są funkcjami wykładniczymi, z których każda zawiera jeden czas relaksacji.

Przeanalizowano również modele bardziej złożone, opisujące niesprężyste materiały sztywne. Na podstawie modelu (tab. 2.1 – mod. 2, 1) można opisać zachowanie niesprężyste; w tym celu należy połączyć te dwa modele szeregowo oraz dodatkowo włączyć szeregowo jedną sprężynę, uzyskując model zawierający pięć elementów. Równanie różniczkowe odkształcenia, zgodnie z przyjętymi wcześniej zasadami, zawiera w przypadku każdego elementu odpowiednie zależności między naprężeniem i odkształceniem, bez wszystkich zmiennych oprócz naprężenia sumarycznego i odkształcenia sumarycznego. Równanie odkształcenia jest przekształcane do równania drugiego stopnia odnośnie σ oraz ε .

Odształcenie sumaryczne jest równe sumie odształceń $\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$, a więc z modelu można bezpośrednio, bez rozwiązywania równania różniczkowego, otrzymać funkcję odształcenia:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1 \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{T_{\sigma}^{(1)}}\right) \right] + \varepsilon_2 \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{T_{\sigma}^{(2)}}\right) \right]. \quad (2.28)$$

Funkcja odształcenia jest sumą dwóch członów rosnących wykładniczo, a podatność relaksacyjna jest określona zależnością $\varepsilon_{\Sigma} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, przy tym $T_{\varepsilon}^{(1)}$ i $T_{\sigma}^{(2)}$ – dwie wartości stałych czasowych (czas relaksacji) przy stałym naprężeniu.

Taki model nie umożliwia jednak rozwiązania zagadnienia z relaksacją naprężenia, dlatego jest celowe jego przebudowanie, czyli równoległe podłączenie do dwóch równoległych modułów sprężyny (tab. 2.1, mod. 2); przy tym $E_{\Sigma} = E_1 + E_2$. Oba równania różniczkowe opisujące model pięcioelementowy są ekwiwalentne i zawierają pięć niezależnych parametrów. Funkcję relaksacji naprężeń można zapisać w postaci sumy dwóch relaksacji wykładniczych o czasie relaksacji równym stałym czasowym $T_{\varepsilon}^{(1)}$ i $T_{\sigma}^{(2)}$:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1 \exp\frac{-t}{T_{\varepsilon}^{(1)}} + \varepsilon_2 \exp\frac{-t}{T_{\sigma}^{(2)}}. \quad (2.29)$$

Z przedstawionej analizy ciała sztywnego o pięciu parametrach wynika, że w przypadku standardowego ciała niesprężystego jest możliwe zastosowanie dwóch ekwiwalentnych modeli, pierwszego w celu otrzymania funkcji podatności, a drugiego – funkcji naprężenia. W przytoczonych modelach nie ma masy, ponieważ powoduje ona zachowanie typu rezonansowego, a nie relaksacyjnego.

Zalety zastosowania zaprezentowanych modeli są widoczne w bardziej złożonych przypadkach, kiedy równanie różniczkowe jest stopnia wyższego niż drugi, wtedy funkcję podatności naprężenia można wyprowadzić bezpośrednio z modelu. Nie jest do tego konieczna znajomość parametrów innego modelu ekwiwalentnego oraz współczynników równania różniczkowego odształcenia. Funkcję pełzania w przypadku modelu z pięcioma parametrami można uogólnić na przypadek modelu, zawierającego kilka modeli typu (tab. 2.1, mod. 1):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{(i)} \left(1 - \exp\frac{-t}{T_{\sigma}^{(i)}} \right), \quad (2.30)$$

gdzie: $T_{\sigma}^{(i)}$ i $\varepsilon_{(i)}$ czas relaksacji i podatności i -go modelu.

Przy naprężeniach wysokich w przypadku wielu materiałów zależność liniowa między naprężeniem i odkształceniem nie znajduje potwierdzenia w badaniach eksperymentalnych.

Należy stosować, w tym przypadku, zależności nieliniowe, które są jednak trudne do realizacji [93, 150-159], a więc bardziej właściwym rozwiązaniem jest zastosowanie równania przedstawionego w pracach [119, 151]:

$$\varphi(\varepsilon_1) = \sigma_1(t) + \int_0^t Q(t-t_1) \cdot \sigma_1(t_1) dt_1, \quad (2.31)$$

gdzie: t_1 – czas przyłożenia obciążenia siłowego; jeżeli t jest niewielki, to odkształcenie działania wtórnego, opisywane członem całkowym, jest małe, czyli $\sigma_1 = \varphi(\varepsilon_1)$.

Równanie (2.31) w stosunku do funkcji $\varphi(\varepsilon_1)$ jest liniowe. Rozwiązując je względem σ_1 , otrzymuje się zależność:

$$\sigma_1(t) = \varphi(\varepsilon_1) - \int_0^t R(t-t_1) dt_1, \quad (2.32)$$

gdzie: $R(t-t_1)$ – jądro (lub współczynnik relaksacji).

Z rozwiązania równania (2.31), przy naprężeniu $\sigma_1 = \text{const} = \sigma_0$ wynika, że:

$$\varphi(\varepsilon_1) = [1 + K(t)] \sigma_0, \quad K(t) = \int_0^t Q(t-t_1) dt_1,$$

to znaczy krzywe odkształcenia przy ustalonych naprężeniach są podobne. W przypadku relaksacji, stała odkształcenia $\varepsilon_1 = \text{const} = \varepsilon_0$, z równania (2.32) uzyskuje się:

$$\sigma_1 = [1 - L(t)] \varphi(\varepsilon_0), \quad L(t) = \int_0^t R(t-t_1) dt_1. \quad (2.33)$$

Jeżeli rozciąganie początkowe jest realizowane szybko, to w związku z relaksacją $\sigma_1 = \varphi(\varepsilon_0)$ można zapisać:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = 1 - L(t), \quad (2.34)$$

czyli krzywe relaksacji również są podobne.

2.3. Model układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej

Przedstawioną analizę teoretyczną możliwości zbudowania modelu matematycznego układu dynamicznego, obróbki cieplno-mechanicznej, przeprowa-

dzono w odniesieniu do właściwości mechanicznych, metali przy temperaturze $T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$, jednak wpływ temperatury na właściwości mechaniczne ma bardzo istotną wartość praktyczną. Podobnie do procesów mechanicznych, należy rozróżniać efekty temperaturowe według stopnia ich oddziaływania: nagrzewanie pieca można zaliczyć do makroefektów, a efekty temperaturowe przy powtórnych obciążeniach do mikroefektów.

W związku z tym, że moduł sprężystości odzwierciedla zmianę międzyatomowych sił adhezyjnych, wraz ze zmianą odległości międzyatomowych jest naturalne, iż moduły sprężystości powinny być powiązane z parametrami siatki [56, 67].

Poziom temperatury istotnie wpływa na opór odkształcenia plastycznego (rys. 2.3). Jak wynika z rysunku 2.3, opór przeciwko początkowym odkształceniom plastycznym (granica plastyczności) w istotny sposób zależy od temperatury. Przy zmianie temperatury występują zasadnicze różnice pomiędzy metalami z siecią regularną przestrzennie centryczną i siecią regularną płasko centryczną [75, 77, 109]. Odkształcenie metalu przy różnych temperaturach zależy głównie od dwóch czynników: wpływu temperatury na kierunek przepływu przy danej strukturze odkształcanego metalu oraz wpływu różnic w strukturze (na przykład różnej gęstości dyslokacji), powstających przy różnych temperaturach w przypadku materiałów o określonym stopniu odkształcenia.

Wpływ temperatury na krzywą umocnienia odkształceniowego metalu, o sieci regularnej płasko centrycznej (stal X10CrNi18-8) wynika z tego, że metal w stanie odkształconym ma różną strukturę przy różnych temperaturach, ponieważ nie zauważono dużej zmiany wartości naprężenia przy zmianie temperatury. Przekształcenia fizyko-mechaniczne zachodzące przy zmianie temperatury w istotny sposób wpływają na plastyczność i ciągliwość. Przy obniżeniu temperatury w większym stopniu zmniejsza się plastyczność, a nie ciągliwość.

Szeroko rozpowszechnione jest prostowanie osiowe. Przy wyciąganiu półfabrykatu cylindrycznego wszystkie włókna doprowadzane są do granicy plastyczności, dlatego istniejące wcześniej naprężenia szczątkowe osiowe są usuwane. W procesie prostowania osiowego przy odkształceniach ostatecznych 0,5–1% naprężenia szczątkowe są likwidowane w pełni [76].

Badania przeprowadzono w urządzeniu do obróbki cieplno-mechanicznej [48], w przypadku prostowania osiowego wałów o małej sztywności ze stali austenitycznej X10CrNi18-8 oraz hartowania (przeprowadzanego w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali) – odpuszczanie, w tym przypadku, nie jest wymagane [4, 6, 37]. Stale austenityczne mają duży współczynnik rozszerzalności termicznej (WRT) i niską granicą plastyczności, dlatego w celu wytworzenia obciążenia prostowania osiowego, po zakończeniu nagrzewania półfabrykatu wału do hartowania, jego końce są ustalane w urządzeniu wykonanym ze stali, o współczynniku rozszerzalności termicznej niższym niż materiał półfabrykatu wału i realizowane jest chodzenie urządzenia z zamocowanym półfabrykatem.

W wyniku różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej przy chłodzeniu powstaje obciążenie osiowe, które działając na półfabrykat wału, powoduje jego osiowe prostowanie. Jako urządzenie jest stosowana sztywna rura ze stali C 25, perforowana na powierzchni przez otwory przeznaczone do chłodzenia. Chwyty wykonane są na końcach urządzenia. Opracowanie układu sterowania automatycznego obróbką cieplno-mechaniczną nie jest możliwe bez modelu matematycznego samego obiektu sterowania, który funkcjonalnie wiąże parametry wejściowe i wyjściowe. Specyficzną cechą układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej jest jednoczesne przyłożenie dwóch oddziaływań zewnętrznych – siły osiowej i temperatury. Temperatura i prędkość odkształcenia przy obróbce cieplno-mechanicznej mają różny wpływ; charakterystyki sprężyste E, G nie zależą od prędkości, lecz od temperatury odkształcenia; ponieważ zmiana temperatury (szczególnie jej podwyższenie) często powoduje nałożenie na czynniki czysto mechaniczne procesów fizyko-mechanicznych, zachodzących zarówno wewnątrz samego metalu, jak również uwarunkowanych oddziaływaniem metalu z otoczeniem. Obróbka cieplno-mechaniczna, jako podstawowa operacja procesu technologicznego, której celem jest wyrównywanie i minimalizacja naprężeń szcążkowych wzdłuż półfabrykatu, jednocześnie łączy w sobie dwa procesy: odkształcenie plastyczne i oddziaływanie temperaturowe. Problemem niejednorodności pola temperaturowego w zagadnieniach teorii plastyczności zajmuje się wielu badaczy [23, 75, 83, 90, 165].

Jednak dokładnego rozwiązania analitycznego zagadnienia o polu temperaturowym półfabrykatu nie opracowano, ponieważ występują tutaj jednocześnie procesy niestacjonarnego przenoszenia ciepła i masy. Praktycznie przy badaniu procesów obróbki cieplno-mechanicznej mają istotny wpływ na kształtowanie właściwości mechanicznych.

Jeżeli zależność funkcjonalną naprężenie – odkształcenie elastoplastyczne (wykres 2.1) aproksymować dwiema lub kilkoma zależnościami liniowymi, w zależności od wielkości odkształcenia plastycznego, to przy rozpatrywaniu modelu procesu nagrzewania i chłodzenia, przy obróbce cieplno-mechanicznej, dobrze jest zastosować teorię termosprężystości i termoplastyczności [1, 4, 157]. Rozpatrzono przypadek, kiedy pole temperaturowe jest znane i niezależne od stanu naprężeniowego, a samo ciało jest sprężyste i izotropowe. Przy obciążeniu jednoosiowym, co odpowiada obróbce cieplno-mechanicznej, prawo Hooke’a przy rozszerzalności cieplnej ma postać:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \alpha \cdot T^\circ, \quad \varepsilon_2 = \frac{-\mu \cdot \sigma_1}{E}, \quad (2.35)$$

W tym przypadku rozszerzenie cieplne sumuje się z wydłużeniem, uwarunkowanym naprężeniem. Równanie to wyrażone odnośnie do naprężeń ma postać:

$$\sigma_1 = \alpha \cdot E \cdot T^\circ + E \cdot \varepsilon_1, \quad \sigma_2 = 0. \quad (2.36)$$

Stosując zasadę sumowania działania sił, można określić przemieszczenie temperaturowe i naprężenia przy zerowych siłach zewnętrznych, a zatem można zsumować znalezione wielkości z przemieszczeniem i naprężeniami od działania obciążeń. Naprężenia temperaturowe są równe zero, jeżeli temperatura jest stała lub można ją modelować jako funkcję liniową współrzędnych. Złożoność opisu matematycznego obróbki cieplno-mechanicznej, jako obiektu sterowania, polega na tym, że wyjściowy rozkład temperatury, naprężeń szczątkowych, odkształceń plastycznych w objętości półfabrykatu jest nieznany lub nie ma środków pomiarowych, umożliwiających kontrolowanie bieżącego rozkładu tych parametrów. W trakcie obciążeń cieplno-mechanicznych jest mierzona temperatura środowiska pieca i wielkość odkształceń elastoplastycznych. Jeżeli proces odkształcenia elastoplastycznego zostanie rozpoczęty wtedy, kiedy jeszcze nie osiągnięto niezbędnego rozkładu temperatury, to jakościowo gorszy jest proces odkształcenia plastycznego (większa nierównomierność wzdluzna), przy tym czas obróbki ulega zwiększeniu. Z drugiej strony zbyt długotrwałe nagrzewanie obniża wydajność procesu i zwiększa nakłady na produkcję.

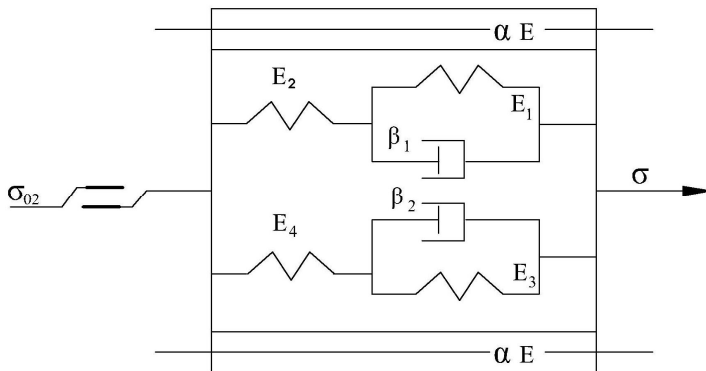
Czas i prędkość nagrzewania są określane według informacji apriorycznej, ponieważ znajdują przy tym zastosowanie pewne zasady i podejścia heurystyczne. Praktyka pokazuje jednak, że takie sterowanie procesem nie jest wystarczająco efektywne i jest zalecany kompleksowy system sterowania automatycznego obróbką cieplno-mechaniczną. W tym celu należy opisać sam obiekt sterowania – półfabrykat, w stanie termoplastycznym. Z charakterystyki statycznej obiektu sterowania, we współrzędnych siła – przemieszczenie wynika (wykres 2.2), że zachowuje się on jako środowisko sprężysto-ciągliwe oraz jako sprężysto-ciągliwo-umocnione, przy przekroczeniu granicy plastyczności.

Przy uwzględnieniu opracowanych członów układu sterowania automatycznego, o działaniu ukierunkowanym (tab. 2.1) oraz wyników badań eksperymentalnych, model mechaniczny „n” elementu półfabrykatu można przedstawić w postaci pokazanej na rysunku 2.5. Model ma cechę specyficzną, polegającą na tym, że do opisanego przejścia od sprężystej części diagramu „naprężenie – przemieszczenie względne” do odkształcenia plastycznego jest stosowany element plastyczny (z punktu widzenia układów automatycznych element przekąźnikowy), który w sposób poglądowy charakteryzuje działanie modelu mechanicznego.

Jeżeli obciążenie zewnętrzne nie przekracza granicy plastyczności, to działą górną gałąź i standardowe ciało niesprężyste charakteryzuje się parametrami E_2 , E_1 , β_1 , wtedy przy obliczeniach jest spełnione prawo Hooke’a. Po osiągnięciu σ_{02} obciążenie jest kierowane na drugą gałąź o parametrach E_4 , E_3 , które są nazywane „zmiennymi modułami sprężystości lub „modułami umocnienia” [77, 84].

W przypadku tych dwóch stref obciążenia przedstawiono również modele temperaturowe, na wejście których jest podawana temperatura, a na wyjściu jest naprężenie temperaturowe lub wydłużenie; ich opis matematyczny przedstawiono w tabeli 2.1. Taki model mechaniczny elementu półfabrykatu umożliwia opracowanie schematu strukturalnego obiektu sterowania. Schemat strukturalny jest zgodny z opisem matematycznym przekształcenia procesów fizycznych i zjawisk zmiennych się w czasie.

Metody strukturalne, w zastosowaniu do poszczególnych elementów dynamicznym, można zastosować do określenia struktury wewnętrznej, procesów przebiegających w elementach. Umożliwiają również uzyskanie lepszych charakterystyk, w wyniku nałożenia dodatkowych powiązań zewnętrznych, wzmacniających pożądane i neutralizujących niechciane powiązania wewnętrzne. W odniesieniu do całego układu metody strukturalne pozwalają ustalić racjonalne układy, z punktu widzenia rozwiązania podstawowego, stawianego przed nimi zadania – odtwarzania oddziaływania sterowniczego, przy jednoczesnej kompensacji – działających na układ dynamiczny – zakłóceń. Uszczegółowiony układ znajduje bezpośrednie zastosowanie do nastawiania według niego schematu komputera, na którym otrzymuje się szukane rozwiązania.



Rys. 2.5. Model matematyczny „n” elementu obrabianego półfabrykatu

Proces odkształcania cieplnego, na etapie odkształcania osiowego, po użyciu określonych parametrów temperaturowych, opisywany jest równaniami, zgodnie z charakterystyką statyczną modelu mechanicznego:

$$\begin{aligned}
 E_2 \cdot \varepsilon_1 + \beta \cdot \dot{\varepsilon}_1 &= \frac{1 + E_2}{E_1} \cdot \sigma_1 + E_1 \cdot \dot{\sigma}_1, \\
 \sigma_1^T &= E \cdot \alpha \cdot T^\circ, \quad \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \alpha \cdot T^\circ, \\
 \varepsilon_2 &= \frac{-\mu \cdot \sigma_1}{E}, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} = \frac{\sigma_1}{E} - \mu \cdot \frac{\sigma_2}{E}, \\
 \varepsilon_2 &= \varepsilon_{22} + \varepsilon_{21} = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\mu \cdot \sigma_1}{E}, \\
 \varepsilon_1 + \frac{C \cdot G}{v \cdot F_{pow} \cdot \varepsilon_1} &= T^\circ.
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

Przy odkształceniu osiowym wałów długich $\sigma_2 = 0$, w przypadku przekrojów płaskich, równania są bardziej proste i funkcje transmitancji obiektu sterowania, w przypadku jednej gałęzi przyjmują postać (rys. 2.9):

$$\begin{aligned}
 G_1(s) &= \frac{\varepsilon(s)}{\sigma(s)} = \frac{K_1(1 + T_2 \cdot s)}{1 + T_1 \cdot s}, \\
 G_2(s) &= \frac{\varepsilon_1^T(s)}{T^\circ(s)} = \frac{K_2}{1 + T_3 \cdot s}, \\
 G_3(s) &= \frac{\sigma_1^T(s)}{T^\circ(s)} = E \cdot \alpha = K_3, \\
 G_4(s) &= \frac{\varepsilon_2(s)}{\varepsilon_{1\Sigma}(s)} = \mu = K_4, \quad G_5(s) = \frac{\sigma_1'(s)}{\varepsilon_2(s)} = E / \mu = K_5,
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

gdzie: $T_1 = \frac{\beta}{E_2}$, $T_2 = \frac{\beta}{E_1} E_2$, $T_3 = c \cdot \frac{G}{F} \cdot S$ – stałe czasowe,

E_1 i E_2 – moduły sprężystości podłużnej,
 β – współczynnik ciągliwości, $K = E_1 + E_2 / E_1 \cdot E_2$,
 K_1 – K_5 – współczynniki wzmacnienia,
 C – ciepło właściwe,
 G – ciężar,
 F_{pow} – powierzchnia półfabrykatu,
 v – współczynnik względny oddawania ciepła.

Odształcenie półfabrykatu wzdłuż osi powoduje jednocześnie zmniejszenie – zwężenie średnicy półfabrykatu i w związku z tym – umocnienie

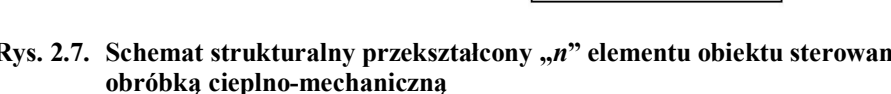
materiału oraz wzrost naprężeń osiowych. Stosując więc terminologię z zakresu teorii sterowania automatycznego, układ dynamiczny obróbki cieplno-mechanicznej można przedstawić jako system zamknięty, z dodatnim sprzężeniem zwrotnym, według naprężenia (rys. 2.6).

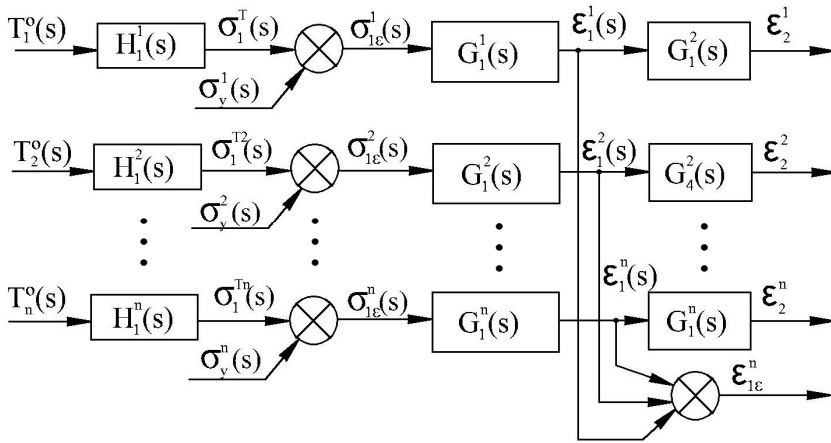
Wejściami schematu strukturalnego są naprężenie osiowe i temperatura, wyjściami odkształcenia względne wzdłużne i poprzeczne ε_1 i ε_2 . Schemat strukturalny, zgodnie z charakterystyką statyczną obiektu (wykres 2.2), ma dwie równoległe gałęzie. Przy osiągnięciu granicy sprężystości σ_T , w schemacie strukturalnym człon jest przedstawiany jako element nieliniowy typu przekaźnik, do działania włącza się druga gałąź schematu. Jeżeli przy rozciąganiu jednoosiowym na krzywej odkształcenia występuje odcinek pełzania i umocnienia (wykres 2.2a), to „niewrażliwość półeczki” na krzywej pokazuje, że σ_T jest stałe, a ε zmienia się w przedziale $\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n = a$, to $\sigma = -E \cdot a + E_y$ przy $\varepsilon \geq \varepsilon_a$, gdzie ε_a – odkształcenia przy stałym naprężeniu. Wielkość „półeczki” ε_a jest równa w przypadku różnych materiałów. Jeżeli występuje ograniczenie (nasylenie), to granica plastyczności nie ulega zmianie i nie ma krzywej umocnienia, to $\sigma = E \cdot \varepsilon$ przy $|\varepsilon| \leq \sigma_T / E$; $\sigma = \sigma_T$ przy $\varepsilon \geq \sigma_T / E$.

W celu uwzględnienia przejścia z jednej gałęzi struktury na drugą, to znaczy przy przejściu przez granicę plastyczności, w pierwszej gałęzi wprowadzono jednostkowe sprzężenie zwrotne, które włącza „przekaźnik” i proces odkształcenia osiowego przebiega w gałęzi drugiej. Celowa jest linearyzacja procesu umocnienia (krzywej umocnienia), co jest słuszne przy niewielkich odkształceniach, a wtedy również transmitancja operatorowa w swojej istocie jest niezmienna, zmianie ulegają tylko wartości liczbowe stałych czasowych i współczynników wzmocnienia (transmitancja operatorowa oznaczona jako $G'(s)$) – rys. 2.6). Na wyodrębniony element półfabrykatu, zgodnie ze schematem strukturalnym, jest podawane summaryczne naprężenie cieplne – odkształcające $\sigma_{1\Sigma} = \sigma_1 + \sigma_T$, jeżeli nie jest ono większe od granicy plastyczności i $\sigma_{1\Sigma}$ – jeżeli zachodzi proces umocnienia. Na wyjściu każdej gałęzi struktury, wartość wydłużenia względnego również jest równa sumie odkształceń $\varepsilon'_{1\Sigma} = \varepsilon_1 + \varepsilon^T$, $\varepsilon'_{1\Sigma} = \varepsilon'_1 + \varepsilon^{T1}$. Całkowite odkształcenie względne w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym jest równe: $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1\Sigma} + \varepsilon'_{1\Sigma}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{21} + \varepsilon'_{21}$.

Po przekształceniach strukturalnych obiekt sterowania – układ dynamiczny obróbki cieplno-mechanicznej przedstawiono w postaci przekształconego schematu strukturalnego (rys. 2.7). Obiekt sterowania obróbką cieplno-mechaniczną można przedstawić w postaci schematu strukturalnego (rys. 2.8) n -wymiarowego układu regulowania [96, 97].

Istnieje powiązanie wewnętrzne między elementami (częściami półfabrykatu), ponieważ w przypadku każdego konturu sterowania jest ono obciążeniem zewnętrznym, w postaci strumienia siłowego lub cieplnego. Schemat strukturalny (rys. 2.8) otrzymano na podstawie „ n ” elementu (rys. 2.5) po





Rys. 2.8. Schemat strukturalny obiektu sterowania w postaci n -wymiarowego układu regulowania

Przy obciążeniu półfabrykatu siłą osiową transmitancję operatorową wiążącą wyjście z wejściem, rozpatrywanego członu, można zapisać jako

$$G(s) = \frac{\varepsilon(s)}{\sigma(s)} = j_R(\omega) + j_J(\omega), \text{ gdzie } j_R(\omega) - \text{część rzeczywista (podatność nagromadzenia), } j_J(\omega) - \text{część urojona (podatność strat).}$$

Przy podstawieniu $G(j\omega)$ jako wektora, który charakteryzuje ruchy ustalone przy zakłócaniu okresowym o częstotliwości ω (w zakresie od 0 do $+\infty$), którego koniec nakreśli na płaszczyźnie zespolonej charakterystykę amplitudowo-fazowo-częstotliwościową (CHAFK); umożliwia to prześledzenie powiązań: j_R , j_J i Φ ;

$$|j|^2 = j_R^2 + j_J^2, \quad \text{tg} \Phi = \frac{j_J}{j_R}.$$

Przy ochłodzeniu półfabrykatu, jest określane odkształcenie okresowe:

$$G(s) = \frac{\sigma(s)}{\varepsilon(s)} = |E|(\omega)^{j\Phi(\omega)} = E_R(\omega) + E_J(\omega), \quad |E|^2 = E_R^2 + E_J^2, \quad \text{tg} \Phi = \frac{E_J}{E_R}.$$

Jeżeli wyrazić podatność przez moduł sprężystości w postaci kompleksowej, to można zapisać:

$$j_R = \frac{E_R}{|E|^2} = [E_R \cdot (1 + \text{tg}^2 \Phi)]^{-1}, \quad (2.39)$$

$$j_J = \frac{E_J}{|E|^2}, \quad E_J = \frac{j_J}{|j|^2}.$$

Sens wielkości j_R i j_J , jako odpowiednio „podatności nagromadzenia” i „podatności strat”, ilustrują obliczenia energii nagromadzonej i rozproszonej w trakcie okresu drgań. Jest to istotne, gdy w procesie odkształcenia cieplnego jest stosowana obróbka wibracyjna, jako proces przyspieszający relaksację. Energia w jednostce objętości w trakcie cyklu jest równa $\int \sigma d\varepsilon$ – całkowanie jest realizowane między punktami cyklu: początkowym i rozpatrywanym. Energię Π_C , rozproszoną w ciągu całego cyklu, w jednostce objętości wyrażono zależnością:

$$\Pi_C = \pi \cdot j_J \cdot \sigma_0^2, \quad (2.40)$$

gdzie: σ_0 – amplituda naprężeń.

Z drugiej strony maksymalna wartość energii Π , zgromadzonej w jednostce objętości, jest określana z zależności:

$$\Pi = \int_{\omega t}^{\pi/2} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} j_R \cdot \sigma_0^2. \quad (2.41)$$

Stosunek energii rozproszonej do nagromadzonej, wyrażony w procentach, jest to względna zdolność odkształceniowa materiału. Stosunek ten jest powiązany z kątem strat w sposób następujący:

$$\frac{\Pi_C}{\Pi} = 2p \frac{j_J}{j_R} = 2\pi \cdot \operatorname{tg} \Phi. \quad (2.42)$$

Analogicznie, wyrażenie to można przedstawić przez moduł $\Pi_C = \pi \cdot E_i \cdot \varepsilon_0^2$, $\Pi = 0,5 E_R \cdot \varepsilon_0^2$, $\frac{\Pi_C}{\Pi} = 2\pi \cdot \operatorname{tg} \Phi$. Miarą strat energii (w ciągu jednego okresu), uwarunkowanych niesprężystym zachowaniem jest Φ (lub $\operatorname{tg} \Phi$), a zatem wielkość Φ określa tarcie wewnętrzne materiału.

Opracowano i uzasadniono założenia umożliwiające budowę schematów obliczeniowych układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej w trybie stacjonarnym. Określono i przedstawiono wpływ technologii na geometryczną niestabilność części osiowosymetrycznych o małej sztywności.

Pokazano, że wykorzystanie informacji a priori nie daje możliwości określenia z wymaganą dokładnością parametrów procesu technologicznego z powodu dużego rozrzutu własności fizyko-mechanicznych i parametrów geometrycznych półfabrykatów, a więc także wytworzenia gotowych wyrobów o wymaganej dokładności. Otrzymano i przeanalizowano uniwersalne równania, opisujące układ dynamiczny obróbki cieplno-mechanicznej części osiowosymetrycznych o małej sztywności przy uwzględnieniu zmiany ich parametrów geometrycznych. Uzyskane zależności umożliwiają wykonanie oceny błędów dziedziczności sprężystej.

Pokazano istotny wpływ nierównomierności rozkładu temperatury nagrzewania w trakcie procesu technologicznego na kształtowanie stabilności wymiarów części o małej sztywności. Przedstawiono rezultaty badań analitycznych liniowego układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej, umożliwiające ocenę dokładności geometrycznej półfabrykatu po obróbce cieplnej. Układ dynamiczny obróbki cieplno-mechanicznej może być przedstawiony jako człon o ukierunkowanym działaniu, którego wejściami i wyjściami mogą być naprężenia lub odkształcenia. Powiązania parametrów wejściowych i wyjściowych obiektu sterowania – układu dynamicznego opisano liniowymi równaniami różniczkowymi ze stałymi współczynnikami. Zastosowano nowe podejście do budowy modeli matematycznych, opisujących stan sprężysty niesprężysty części przy wykorzystaniu transmitancji operatorowej i schematów strukturalnych umożliwiających zastosowanie częstotliwościowych metod oceny zachowania dynamicznego części jako ciała sztywnego.

2.4. Ocena analityczna prostoliniowości osi wału o małej sztywności przy jego hartowaniu w urządzeniu

Przy wytwarzaniu wałów długich są stosowane długie półfabrykaty walcowane, które przy dostawie mają znaczną krzywiznę. Przed obróbką mechaniczną należy przeprowadzać prostowanie półfabrykatów, do uzyskania prostoliniowości 0,5mm na 1m [68, 71, 101], wystarczającej przy toczeniu do wykonania wału, o założonej tolerancji, na krzywiznę jego osi. Wadą prostowania przez zginanie jest powstawanie naprężeń szczątkowych, nierównomiernych, w przekroju wzdłużnym półfabrykatu wału, które przy zdjęciu warstwy materiału w procesie obróbki mechanicznej, powodują powstanie momentu zginającego i zmianę prostoliniowości osi wału [139, 142].

Szeroko rozpowszechnione jest prostowanie osiowe. Przy wyciąganiu półfabrykatu cylindrycznego, wszystkie włókna osiągają granice plastyczności, dlatego istniejące wcześniej osiowe naprężenia szczątkowe są usuwane. W trakcie prostowania osiowego, przy odkształceniu trwałym 0,5–1%, naprężenia szczątkowe są likwidowane w pełni [9, 36].

Badania przeprowadzone w urządzeniu do obróbki cieplno-mechanicznej [29, 38] w przypadku prostowania osiowego wałów ze stali austenitycznej X10CrNi18–8, są połączone z operacją hartowania (wykonywaną w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali), przy tym odpuszczanie nie jest potrzebne [8, 149]. Stale austenityczne mają duży współczynnik rozszerzalności cieplnej i niską granicę plastyczności. W celu wytworzenia obciążenia osiowego prostowania po zakończeniu nagrzewania półfabrykatu wału do hartowania, jego końce są ustalane w urządzeniu wykonanym ze stali o współczynniku rozszerzalności cieplnej niższym, niż materiał półfabrykatu wału i jest realizowane chłodzenie przyrządu z półfabrykatem w stanie zaciśniętym. W wyniku różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej, przy chłodzeniu

powstaje siła osiowa, która działając na półfabrykat wału, powoduje jego prostowanie osiowe. Jako przyrząd jest stosowana sztywna rura ze stali C 25, perforowana na powierzchni otworami, umożliwiającymi kontakt z otoczeniem. Uchwyty są wykonane na końcach urządzenia.

W danym procesie jako jakościowe prostowanie osiowe półfabrykatu wału rozumiane jest takie, przy którym, w wyniku działania siły osiowej prostowania, w żadnym włóknie, w każdym przekroju poprzecznym półfabrykatu, nie występuje naprężenie większe od granicy plastyczności. Przy ściskaniu, a następnie, przy wyciąganiu w dowolnym przekroju poprzecznym na całej jego powierzchni, powstają naprężenia nie mniejsze od granicy plastyczności.

Jako maksymalne, wejściowe ugięcie półfabrykatu jest rozumiane takie ugięcie początkowe, przy którym, w skrajnie ściskanym włóknie, powstają naprężenia ściskania nie większe niż granica plastyczności przy temperaturze, odpowiadającej dojściu skrzywionej osi do linii prostej. W przeciwnym razie w przekroju poprzecznym półfabrykatu powstaje zgniot „ściskania”, który w trakcie dalszego wyciągania, do granicy plastyczności, nie jest zdejmowany; jest to efekt Bauschingera. W wyniku powstaje niesymetryczna strefa zgniotu, której odpowiada niesymetryczny, odnośnie osi symetrii przekroju poprzecznego, rozkład naprężeń szczytkowych, wpływający następnie na prostoliniowość wału. Ustalono, że ugięciu osi półfabrykatu wału długiego, najbardziej jest zbliżone do równania paraboli drugiego stopnia w postaci:

$$f(z) = y(z) = \frac{4y_{max}}{l} \cdot z \cdot \left(1 - \frac{z}{l}\right), \quad (2.43)$$

gdzie: y_{max} – maksymalne wyjściowe ugięcie półfabrykatu,
 l – odległość między środkami skrajnych przekrojów wału,
 z – wartość bieżąca ugięcia.

Napężenie maksymalne powstające w skrajnym włóknie przy wyciąganiu zgiętej osi wału do linii prostej jest określone z zależności:

$$\sigma_{\max} = \frac{y_{\max} \cdot F_{roz}}{W_x}, \quad (2.44)$$

gdzie: F_{roz} – siła osiowa, W_x – wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego półfabrykatu wału na zginanie.

Wartość F_{roz} jest określana według zależności [36], których przekształcenie prowadzi do wzoru:

$$F_{roz} = \frac{3\pi \cdot d^4 \cdot E}{20 \cdot l^2}, \quad (2.45)$$

gdzie: d – średnica półfabrykatu wału.

Oznaczając stosunek l do d przez K_0 , otrzymano:

$$y_{\max} \leq \frac{5K_0^2 \cdot d \cdot \sigma_{02}}{24E}. \quad (2.46)$$

Maksymalne naprężenia ściskające we włóknie ściskanym powstają w trakcie chłodzenia wału o temperaturę ΔT° , odpowiadającą skróceniu do wielkości maksymalnego ugięcia początkowego, jak również zmianie σ_{02} ze spadkiem temperatury ($\sigma_{02} = \sigma_{02}(t)$, $E = E(t)$), a więc zależność (2.46) można przekształcić do postaci:

$$y_{\max} \leq \frac{5K_0^2 \cdot d \cdot \sigma_{02}(t - \Delta T^\circ)}{24E(t - \Delta T^\circ)}. \quad (2.47)$$

Przy zmniejszeniu temperatury o ΔT° , jego długość ulegnie skróceniu o:

$$\Delta l = \Delta\alpha(t) \cdot l \cdot \Delta T^\circ, \quad (2.48)$$

gdzie: $\Delta\alpha(t)$ – różnica współczynników rozszerzalności temperaturowej materiału półfabrykatu wału i przyrządu, zależna funkcjonalnie od temperatury.

Skrócenie długości wału Δl przy stygnięciu powinno umożliwić wyprostowanie skrzywionej osi do linii prostej, to znaczy, że:

$$\Delta l = \delta_{ow} + 2\delta_{lc}, \quad (2.49)$$

gdzie: δ_{ow} – odległość niezbędna do „wyboru” ugięcia półfabrykatu wału określana jako:

$$\delta_{ow} = \frac{8 \cdot \delta_{p \max}^2}{3l},$$

δ_{lc} – luz między czołem przyrządu i czołem występu oporowego, równy:

$$\delta_{lc} = \frac{2d_w \cdot \delta_{p \max}}{l},$$

gdzie: d_w – średnica występów.

Stosunek średnicy występu chwytającego (lub nakrętki) do średnicy półfabrykatu oznaczono jako C , a z zależności (2.46) wyznaczono ΔT° , jako:

$$\Delta T^\circ = \frac{1}{\Delta \alpha(t) \cdot l^2} \left(\frac{8}{3} \delta_{p \max}^2 + 4C \cdot d \cdot \delta_{p \max} \right). \quad (2.50)$$

Podstawiając zależność (2.50) do (2.47) i rozwiązując względem $\delta_{\max}$, wyznaczono maksymalne początkowe ugięcie półfabrykatu wału, w zależności od jego geometrii i właściwości fizycznych materiału. W szczególności, w przypadku półfabrykatów wału ze stali X10CrNi18-8 i urządzenia ze stali C 25, mają one następującą postać:

$$\Delta \alpha = 1,43 \cdot T^{-0,205}, \quad E = 2688 \cdot T^{-0,075}, \quad R_e = 84,1 \cdot T^{-0,314}.$$

Porównanie wielkości obliczeniowych: początkowego ugięcia jakościowego z danymi, w przypadku półfabrykatów rzeczywistych ze stali X10CrNi18-8, o średnicy od 20 do 80mm i stosunkiem długości do średnicy od 30 do 80 wykazuje, że są półfabrykaty o ugięciu początkowym większym od początkowego jakościowego. Dlatego przed prostowaniem wałów długowymiarowych, półfabrykaty należy wybierać według ugięcia początkowego. W przypadku wałów ze stali X10CrNi18-8, półfabrykaty o długości 1050mm i średnicy 30mm, powinny mieć początkowe ugięcie jakościowe nie większe niż 3,4mm; w praktyce są spotykane półfabrykaty o takich wymiarach o ugięciu do 6mm.

Ugięcie półfabrykatu, które można usunąć przy zastosowaniu obróbki cieplno-mechanicznej z uwzględnieniem, że takiemu prostowaniu są poddawane półfabrykaty o ugięciu początkowym, nieprzekraczającym maksymalnego jakościowego, jest określone następująco: przy stygnięciu skrócenie półfabrykatu powinno pokrywać następującą sumę wydłużeń:

$$\Delta l = \delta_{ow} + 2\delta_{lc} + \delta_{sp} + \delta_{wp}, \quad (2.51)$$

gdzie: δ_{sp} – skrócenie przyrządu w wyniku działania obciążenia od skracającego się półfabrykatu wału, równe:

$$\delta_{sp} = \frac{\sigma_{02} \cdot l}{E_u \cdot K_s},$$

przy czym:

- σ_T – granica plastyczności materiału półfabrykatu przy 20°C,
- E_u – moduł sprężystości materiału przyrządu przy 20°C,
- K_s – stosunek sztywności przyrządu do sztywności półfabrykatu,
- δ_{wp} – wydłużenie, które należy nadać półfabrykatowi, żeby włókna skrajne o naprężeniach ściskających osiągnęły naprężenia nie mniejsze od granicy plastyczności materiału wału przy rozciąganiu, równe:

$$\delta_{wp} = \frac{(\sigma_k + \sigma_{02}) \cdot l}{E_{20^0}},$$

gdzie: σ_k – naprężenie we skrajnym włóknie przekroju maksymalnego ugięcia półfabrykatu, występujące przy wyciąganiu skrzywionej osi wału do linii prostej.

Zgodnie z (2.46) zależność do określenia σ_k można zapisać jako:

$$\sigma_k = \frac{24d \cdot E_t \cdot \delta_{p \max}}{5l^2},$$

gdzie: E_t – moduł sprężystości materiału wału w temperaturze nagrzewania.

Rozwiązując (2.51) odnośnie do $\delta_{p \max}$, uzyskano:

$$\begin{aligned} \delta_{p \max} = & -d \left(0,9 \frac{E_t}{E_{20}^0} + \frac{3}{4} C \right) + \\ & + d \frac{1}{2} \sqrt{\left(1,8 \frac{E_t}{E_{20}^0} + 1,5C \right)^2 + 1,5K_0^2 \frac{\sigma_{02}}{E_{20}^0} \left(\frac{\Delta\alpha \cdot t \cdot E_{20}^0}{R_e} - \frac{E_{20}^0}{E_u K_s} - 1 \right)}, \end{aligned} \quad (2.52)$$

gdzie: T° – temperatura nagrzewania,

$\Delta\alpha$ – różnica współczynników rozszerzalności temperaturowej materiału półfabrykatu i materiału przyrządu, w zakresie temperatur od 20°C do temperatury nagrzewania,

R_e – granica plastyczności materiału wału.

Analiza ugięć początkowych półfabrykatów o różnych wymiarach, obliczenia maksymalnego ugięcia, które można jeszcze usunąć w urządzeniu, a także praktyka pokazują, że według tego sposobu można przeprowadzać prostowanie osiowe półfabrykatów wałów z jednoczesną obróbką cieplną, przy tym jest korygowane początkowe ugięcie półfabrykatu. Wyciąganie włókien w dowolnym przekroju poprzecznym do granicy plastyczności umożliwia kształtowanie tym samym w materiale półfabrykatu symetrycznych odnośnie osi naprężeń szczątkowych.

3. BADANIE WPŁYWU CZYNNIKÓW TECHNOLOGICZNYCH NA STABILNOŚĆ PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH CZĘŚCI OSIOWOSYMETRYCZNYCH O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

3.1. Podstawy technologiczne regulowania układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej

Przed opracowaniem układu do realizacji obróbki cieplno-mechanicznej, zawierającego niezbędne urządzenia, należy przeanalizować specyfikę fizyki procesu. Pod układem procesu obróbki cieplno-mechanicznej rozumie się niezbędne urządzenia oraz realizowany proces technologiczny [43, 45, 50]. Aktualnie nie jest możliwe opisanie za pomocą równań stanu ciała z powiązaniami zmiennymi, niezależnie od tego jak dokładnie zostało ono przebadane. Zastosowanie podejścia, przy którym nie są uwzględniane poszczególne elementy układu i ich działanie, a jest badane całościowe funkcjonowanie układu jako związku między wyjściem a wejściem również nie umożliwia rozwiązania postawionego problemu.

Proces odkształcenia plastycznego posiada szereg cech specyficznych, takich jak zależność przeciwdziałania odkształceniu w danej chwili od historii odkształcenia – dziedziczności technologicznej to jest prawidłowości przebiegu odkształcenia w czasie. Przeciwdziałania odkształceniu nie można określić w postaci $\sigma = f(\varepsilon)$, czyli jako funkcji od stopnia odkształcenia przy określonej temperaturze. Przy osiągnięciu zadanego $\varepsilon = 0,2\%$ i zagwarantowaniu $\varepsilon = const$, naprężenie będzie ulegać zmniejszeniu, chociaż stopień odkształcenia nie ulega zmianie. Świadczy to o tym, że nie istnieje jedna zależności typu $\sigma = f(\varepsilon, \varepsilon')$. Przytoczone wcześniej równania modeli ciał niesprężystych (rozdz. 2.4) i ich rozwiązania pokazują, że naprężenie σ nie jest określane wartością ε w danej chwili, a zależy od funkcji $f(\varepsilon)$. Założenie, że czas relaksacji jest stały, w przypadku metali, nie znalazło potwierdzenia w danych eksperymentalnych. Nie można uważać, że jest znana funkcja $\sigma = f(\varepsilon, \varepsilon', t)$, jeżeli w danym momencie nie są znane wartości $\varepsilon, \varepsilon', t$. Odkształcenie do określonej wielkości może być uzyskane różnymi sposobami, to znaczy, przy takiej samej wartości odkształcenia naprężenia mogą być wyraźnie inne. Zjawiska pełzania i relaksacji pokazują, że nie ma jednej zależności $\sigma = f(\varepsilon, \varepsilon', t)$, a próby otrzymania takiej funkcji są skazane na niepowodzenie.

Istotę tego problemu można przedstawić w następujący sposób. Na odcinku o ustalonej podatności przy $\varepsilon = \text{const}$ odkształcenie wzrasta, a σ pozostaje niezmiennie. Jeżeli przy $\varepsilon' = \text{const}$ naprężenie σ byłoby funkcją ε , to można by uzyskać wartość ε , odpowiadającą danemu σ – w tym przypadku odkształcenie nie zachodzi. Tak się jednak nie dzieje. Przy relaksacji $\varepsilon = \text{const}$ i $\varepsilon' = \text{const}$, a σ , jednak ulega zmianie od początkowej być może bardzo dużej wartości do bardzo małej. Jeżeli byłoby tak, że $\sigma = f(\varepsilon, \varepsilon')$, to przy $\varepsilon = \text{const}$ także i $\sigma = \text{const}$, to znaczy, relaksacja nie zachodzi. Jeżeli w czasie t miało miejsce odkształcenie ε_0 , to σ nie jest określane ani wielkością ε , ani ε_0 , ponieważ σ nie jest funkcją dwóch i więcej zmiennych, a zależy od całej funkcji $f(\varepsilon)$.

Z określenia naprężeń szczątkowych nie wiadomo, jakie przyczyny leżą u podstaw powstania pola naprężeń szczątkowych. Jedyne, co można wyjaśnić to sposób ich określenia, znany jako twierdzenie o odciażaniu.

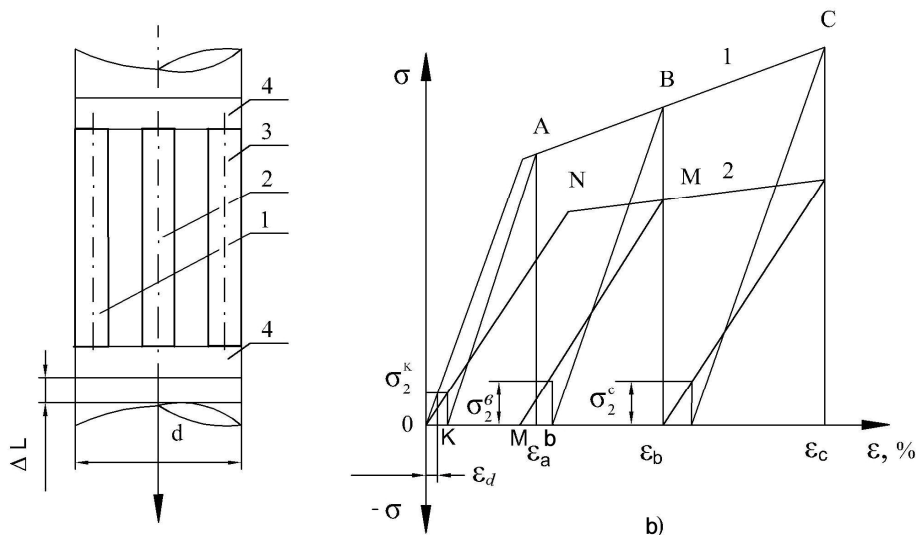
Istota powstania i rozwoju naprężeń szczątkowych zostanie przedstawiona na przykładzie interpretacji graficznej powstawania naprężeń szczątkowych przy zastosowaniu krzywej schematyzowanej $\sigma - \varepsilon$. W tym celu wał (wykres 3.1a) został przedstawiony w postaci prętowego płaskiego modelu (trzy pręty o jednakowej średnicy połączone nieodkształcalną poprzecznicą 4 w płaszczyźnie maksymalnego ugięcia). Zakłada się, że do przyłożenia obciążenia pręty znajdowały się w początkowym nienaprzężonym stanie. W wyniku działania siły rozciągającej F_{roz} wszystkie pręty ulegają jednakowemu wydłużeniu $\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_n$ i odkształceniu $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = \varepsilon$.

Przeanalizowane zostaną najbardziej charakterystyczne warianty nie-zgodności odkształceń przy odciażaniu, w pierwszym moduły Younga prętów: $E_3 > E_2$, $E_2 > E_1$ i moduły umocnienia $E_{y3} > E_{y2} > E_{y1}$, oznacza to, że powierzchnia wyrobu w płaszczyźnie maksymalnego odkształcenia i jego środek charakteryzują się różnymi wartościami modułu Younga (wykres 3.1 a, b). W wariancie drugim – wyrób do odkształcenia posiada jednakowe własności, ale w procesie obciążania prętów 1–3 uzyskano różne wartości odkształcenia plastycznego.

W pierwszym wariancie, kiedy moduły sprężystości podłużnej i umocnienia nie są sobie równe (wykres 3.3, b) jest celowe porównanie dwóch prętów 1 i 2, co nie naruszy fizyki procesu i pozwoli uprościć rysunek. Rozpatrzone zostaną dwa warianty odciażania. Pręt 2 w trakcie obciążania znajduje się jeszcze w stanie sprężystym i jego odkształcenie, zgodnie z prawem Hooke'a, jest równe $\varepsilon_2 = \sigma_2 / E_2$, gdzie σ_2 – naprężenie w pręcie 2, a pręt 1 przy tym obciążeniu jest w stanie plastycznym i jego odkształcenie można przedstawić w postaci $\varepsilon_1 = \varepsilon_{pl} + \varepsilon_s$, gdzie ε_{pl} i ε_s – odpowiednio odkształcenie plastyczne i sprężyste. Przy zdjęciu obciążenia zewnętrznego odkształcenie i naprężenie w pręcie 1 zmniejsza się według linii AK , a w pręcie 2 po linii NO . Po odciażeniu wielkość odkształcenia w pręcie 1 jest równa $OK = \varepsilon_{pl}^1$, a naprężenie jest równe zero, a w pręcie 2 $\sigma_2 = \sigma_2^k$, to znaczy, pręt 2 jest jeszcze rozciągnięty sprężysto

i posiada energię potencjalną $E_{p2}^k = \sigma_2^k \cdot \frac{\varepsilon_{pl}^1}{2}$, to znaczy, że w wyniku oddzia-

ływania energii potencjalnej odpowiadającej σ_2^k , pręt 2 będzie dalej ulegał skracaniu. Ponieważ pręty 1 i 2 są połączone poprzecznica 4, to skracający się pręt 2 spowoduje powstanie w pręcie 1 odkształcenia i naprężenia ściskania. Odkształcenie prętów będzie zachodzić aż do osiągnięcia stanu równowagi sprężystej $E_{p2} = E_{p1}$.



Wykres 3.1. Obciążania i odciążania modelu prętowego typu wał: płaski model prętowy wału - a), wykres odciążania przy różnych modułach sprężystości podłużnej i umocnienia - b)

Przy drugim wariancie odciążania w pręcie 2, tak jak i pręcie 1, ma miejsce plastyczne, nierównomierne odkształcenie i odciążanie przebiega według linii Bb i Mm . Przy pełnym odciążeniu pręta 1 $\sigma_1 = 0$, a $\sigma_2 = \sigma_2^b$.

Podobnie jak i w pierwszym wariancie skracający się pręt 2 spowoduje odkształcenia ściskania i naprężenia ściskania, które będą się utrzymywać do stanu pełnej równowagi sprężystej energii potencjalnych $E_{p2} = E_{p1}$.

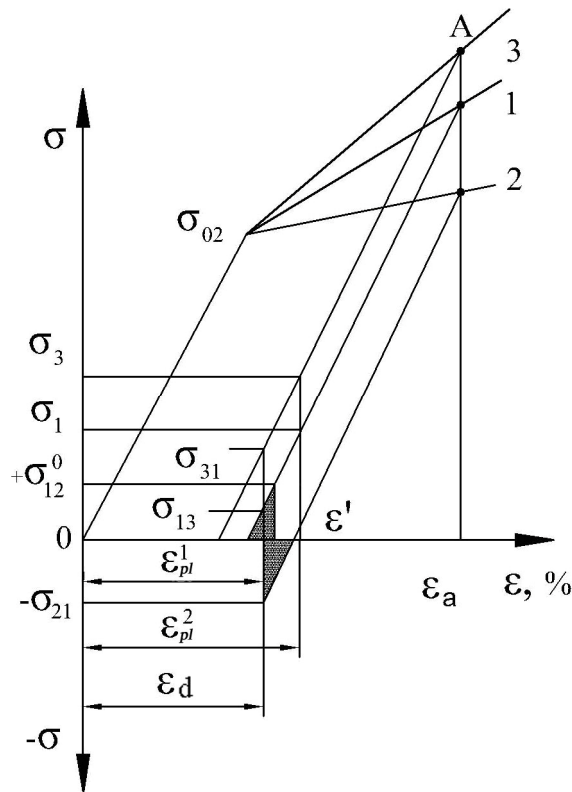
Z przytoczonego przykładu wynika, że różnica właściwości mechanicznych zewnętrznych i wewnętrznych części wyrobu (wał) prowadzi do tego, że przy odciążaniu nie cała skumulowana w układzie energia potencjalna ulega rozproszeniu, przy tym im większe jest odkształcenie plastyczne tym więcej energii jest kumulowanej. Jeżeli ciało przed odkształceniem miało jednorodne właściwości w przekroju, a przy odkształcenia w trakcie obciążania w trzech sąsiednich elementach 1–3 wystąpiło różne odkształcenia plastyczne, to ele-

menty osiągnęły granicę sprężystości przy takim samym odkształceniu całkowitym σ_{02} (wykres 3.2) i począwszy od tego punktu ma miejsce niejednakowe odkształcenia plastyczne. W przypadku materiału umacniającego się przy obciążeniu kąty nachylenia krzywych umocnienia prętów 1–3 nie są jednakowe. Jeżeli odciążyć ciało zaczynając od ε_a , to w punkcie ε' w elemencie drugim nie będzie naprężeń, a w pierwszym wystąpią naprężenia rozciągania σ_1 . Naprężeniom tym odpowiada pewien poziom energii potencjalnej $E_{p1} = \sigma_1 \cdot (\varepsilon_{pl}^2 - \varepsilon_{pl}^1) / 2$, powodujący powstanie w pręcie 2 naprężeń ściskania (górny indeks odpowiada numerowi porządkowemu pręta). Przy równowadze pręt 2 jest ściśnięty sprężystością ($-\sigma_{21}^0$), a pręt 1 rozciągnięty sprężystością. Powierzchnie trójkątów zakreskowanych odpowiadają poziomom energii potencjalnych $E_{p1} = E_{p2}$. W analogiczny sposób można opisać zachowanie 3-go pręta względem 1 i 2. W wyniku niejednakowych odkształceń plastycznych w przekroju poprzecznym wyrobu (wału) własności mechaniczne od elementu do elementu (od zewnętrznej powierzchni wału do wewnętrznej) są więc różne, w wyniku, czego pojawienie się naprężeń szczątkowych jest nieuniknione, a więc przy uwzględnieniu znaku naprężenia szczątkowe powodują powstanie momentu zginającego, który powoduje paczanie wyrobu gotowego. Przy uwzględnieniu procesów relaksacyjnych zjawisko to może pojawiać się po dłuższym czasie (po upływie miesięcy od wytworzeniu wyrobu).

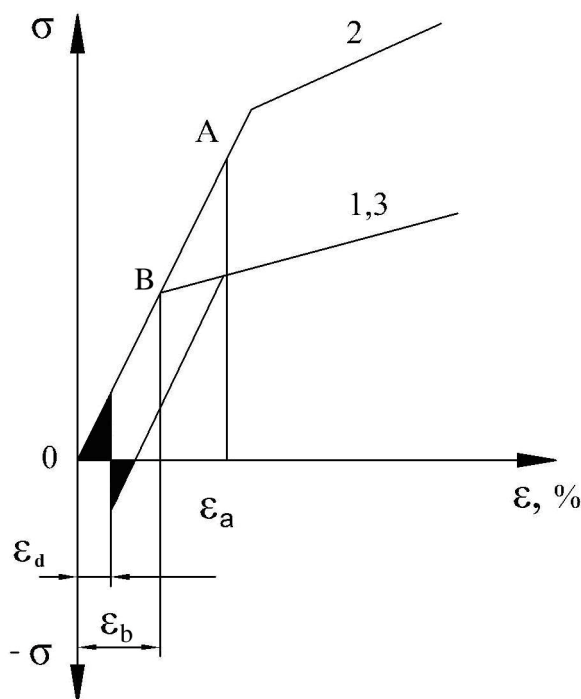
Wariant trzeci – wszystkie trzy pręty mają taki sam moduł sprężystości podłużnej, lecz temperatura 1 i 3 elementu (powierzchni wału) ulega podwyższeniu na tyle, że granica ich sprężystości jest wyraźnie mniejsza od granicy sprężystości elementu 2 (wykres 3.3). W tym przypadku tak jak i w poprzednich różne odkształcenia plastyczne prowadzą do powstania naprężeń szczątkowych. We wszystkich rozpatrzonych przypadkach naprężenia szczątkowe ulegają zanikowi, jeżeli elementy układu (pręty) nie są wzajemnie ze sobą powiązane. Układ bez powiązań bez problemu rozprasza zmagazynowaną energię potencjalną, chociaż należy zauważyć, że geometria takich niepowiązanych ze sobą elementów będzie inna, to znaczy, naruszeniu ulega wspólność odkształceń plastycznych. W procesie odciążania przemieszczenie rzeczywiste we współrzędnych $\sigma - \varepsilon$ zaczyna się w punktach ε_a (wykres 3.3) i kończy w punkcie ε_b . Odcinek $\varepsilon_a - \varepsilon_b$ odpowiada wektorowi rzeczywistego sprężystego przemieszczenia układu przy odciążaniu.

W punkcie ε_b układ sprężystych naprężeń szczątkowych w elementach ciała znajduje się w stanie równowagi dalszy ruch – odciążanie jest możliwe tylko przy obtaczaniu wyrobu (wału). Jeżeli jako oddziaływanie zewnętrzne wystąpi przesunięcie w czasie przekształceń fazowych w różnych miejscach odkształcanego ciała, to można zbudować diagramy podobne do tych na wykresie 3.1, ponieważ zmiany fazowe w ogólnym przypadku powodują zmiany objętości i charakterystyk mechanicznych w różnych punktach ciała w różnym czasie.

Wyroby walcowane do wykonania długich wałów o małej sztywności mają ugięcie, a więc technologia ich wykonania wymaga przedsięwzięć technologicznych, umożliwiających stabilizowanie i minimalizowanie poziomu naprężeń szczątkowych w przekrojach wyrobów gotowych.



Wykres. 3.2. Wykresy obciążania i odciążania modelu prętowego części typu wał; wyrób o jednorodnych własnościach, lecz w procesie obciążania w prętach wystąpiły różne odkształcenia plastyczne



Wykres 3.3. Wykresy obciążania i odciążania modelu prętowego części typu wał, wszystkie trzy pręty mają jednakowy moduł sprężystości podłużnej, lecz temperatury prętów są różne

Na pierwszym etapie projektowania, kiedy są rozpoznawane możliwości obiektu – układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej jest celowe, w miarę możliwości, zastosowanie modelu uproszczonego, uwzględniającego tylko podstawowe powiązania. Takie podejście umożliwia przeanalizowanie w prosty sposób uzyskanych wyników i zgromadzenie doświadczenia odnośnie projektowania stanowisk w ramach teorii liniowej. Stopnia idealizacji układów sterowania nie można rozpatrywać w oderwaniu od zadań do rozwiązania, których są one przeznaczone oraz wymagań, jakie powinny spełniać. Przy obróbce cieplno-mechanicznej układ dynamiczny, zawierający układy regulacji, jest połączeniem różnorodnych ogniw wielowymiarowych, a więc w tym przypadku pod obiektem sterowania rozumie się oprócz modelu matematycznego obiektu sterowania również określone charakterystyki dynamiczne urządzeń wzmacniająco-regulacyjnych i pomiarowych. Oprócz tego na sam obiekt sterowania – układ dynamiczny obróbki cieplno-mechanicznej są nałożone więzi, jedna z nich jest uwarunkowana własnościami fizycznymi obiektu sterowania: podwyższenie temperatury prowadzi do zmniejszenia charakterystyk wytrzymałościowych materiału obrabianego, a ze wzrostem

zewnętrznego obciążenia roboczego wzrasta odkształcenie wzdłużne i poprzeczne. Drugi rodzaj więzi jest nakładany na układ regulacji zgodnie z warunkami wynikającymi z procesu technologicznego (zewnętrzne powiązania). Złożoność opracowania układu dynamicznego (urządzenia) do realizacji procesów nagrzewania półfabrykatu jako obiektu sterowania o parametrach wejściowych i wyjściowych polega na tym, że wejściowy rozkład temperatury w półfabrykacie nie jest znany i nie ma środków pomiarowych, umożliwiających kontrolowanie bieżącego rozkładu temperatury. W trakcie procesu nagrzewania jest mierzona temperatura robocza środowiska pieca. Taka niepełna informacja pomiarowa o przebiegu procesu utrudnia regulowanie prędkości nagrzewania i określenie momentu stabilizacji temperatury po długości i średnicy półfabrykatu.

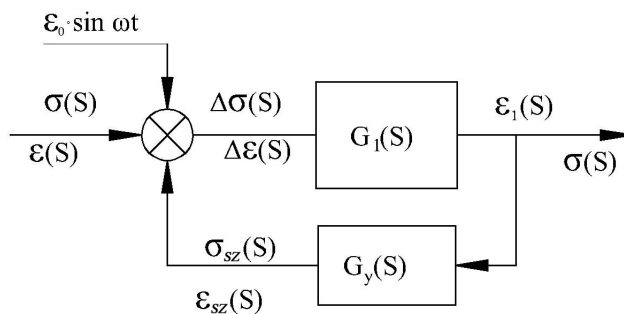
Jak odnotowano wcześniej, celem opracowania stanowiska do obróbki cieplno-mechanicznej jest wytworzenie zrównoważonego minimalnego stanu naprężonego półfabrykatu w przekrojach poprzecznym i wzdłużnym. Przeprowadzenie bezpośredniej kontroli zachowania materiału, w procesie obróbki cieplno-mechanicznej nie jest możliwe, dlatego w opracowanym urządzeniu zastosowano pośrednie metody pomiaru w czasie rzeczywistym takich parametrów jak: wydłużenie i zwężenie półfabrykatu, zewnętrzne obciążenie, temperatura nagrzewania i ochładzania, a także ich pochodne. W oparciu o informację a priori o wzajemnym oddziaływaniu wymienionych parametrów oraz zależności matematyczne, przedstawione w rozdziale 2.2, opracowano wielokanałowe urządzenie do odpuszczania, pracujące w oparciu o opracowane algorytmy, którego poszczególne obwody, uwzględniając odchylenie regulowanego parametru (na przykład w oparciu o odkształcenie poprzeczne wyrobu), pracują jako układy stabilizacji siły zewnętrznej i zadanej wielkości odkształcenia (regulowanie w oparciu o odkształcenie wzdłużne oraz temperaturę nagrzewania i ochładzania).

Rozpatrzono także wpływ sprzężenia zwrotnego, to znaczy, regulatora na obiekt sterowania – układ dynamiczny. Dla przejrzystości schemat został uproszczony; obiekt sterowania przedstawiono w postaci funkcji transmitancji $G_I(s)$, a obwód regulowania jednym członem $G_Y(s)$, co nie zmienia istoty fizycznej, ale daje dokładne przedstawienie o wzajemnym oddziaływaniu obiektu i regulatora (rys. 3.1). Na wyjściu jest uzyskiwane odkształcenie (lub naprężenie), a na wejściu naprężenie (lub odkształcenie).

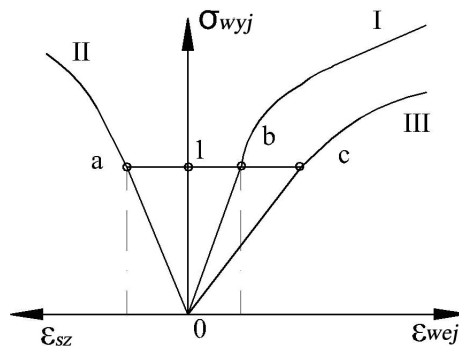
Charakterystyka statyczna obiektu ze sprzężeniem zwrotnym jest przedstawiona na rysunku 3.1b (charakterystyka statyczna obiektu bez sprzężenia zwrotnego – krzywa 1, obwody sterowania – krzywa 2).

W przypadku ujemnego sprzężenia zwrotnego $\Delta\varepsilon$ i ε_{wej} ($\Delta\sigma$ i σ_{wej}) jest wygodnie odkładać na osi poziomej na prawo, a ε_{sz} (σ_{sz}) – na lewo i budować charakterystykę obwodu sterowania w drugim kwadracie. Przy tym $\varepsilon_{wej} = \Delta\varepsilon + |\varepsilon_{sz}|$, to znaczy, odległości „ab” na rys. 3.4 b. Przesunawszy odcinek „ab” poziomo w prawo tak, aby jego koniec „a” pokrył się z punktem 1, można

określić punkt szukanej charakterystyki. Przy ujemnym sprzężeniu zwrotnym wynikowa charakterystyka obiektu (krzywa 3) przebiega nieco bardziej pochyło, niż charakterystyka bez sprzężenia zwrotnego. Wynika z tego, że przy takim samym wyjściowym oddziaływaniu ε_{wej} z uwzględnieniem sprzężenia zwrotnego naprężenie na wyjściu jest mniejsze. Jeżeli współczynnik wzmocnienia obiektu w przypadku standardowego ciała: $K_0 = E_1 + E_2 / E_1$ (rozdz. 2. 2, tab. 2.1, mod. 3), a w obwodzie sprzężenia zwrotnego również ma miejsce wzmocnienie to $\varepsilon_{wej} = K_0 / (1 + K_0 \cdot K_{sz}) = K \cdot \sigma_{wej}$. W przypadku kiedy $K_0 \cdot K_{sz} = 1$ to współczynnik wzmocnienia obwodu sterowania K jest nieskończenie wielki, co praktycznie oznacza, że liniowy człon (obiekt sterowania) staje się astatyczny (człon nieliniowy przechodzi w tryb przekaźnikowy). Podczas pracy urządzenia w trybie astatycznym odchylenie regulowanej wielkości dąży do zera, niezależnie od wielkości oddziaływania zewnętrznego w stanie ustalonym. Obliczanie astatyzmu układu [72, 80, 92, 162] jest zadaniem inżynierskim i w danym opracowaniu nie jest rozpatrywane.



a)



b)

Rys. 3.1. Uproszczony obwód sterowania – a), charakterystyka statyczna obiektu ze sprzężeniem zwrotnym – b)

W odniesieniu do procesu obróbki cieplno-mechanicznej oddziaływaniem zewnętrznym może być naprężenie lub odkształcenie, jeżeli zmienną niezależną jest naprężenie to relaksacja niesprężysta występuje jako zależna od czasu równoważna wartość sprzężonej zmiennej – odkształcenia (lub odwrotnie). Zewnętrzne objawy relaksacji odzwierciedlają korektę parametrów wewnętrznych materiału części do nowych równoważnych wartości w przypadku każdej wartości przyłożonego naprężenia. Występuje pewna równoważna wartość parametru wewnętrznego i w miarę jego relaksacji do tej wartości, odkształcenie ε również dąży do odpowiedniej wartości równoważnej. Zmiana parametrów wewnętrznych może zachodzić w wyniku procesów kinematycznych, takich jak dyfuzja. Zewnętrznym przejawem relaksacji wewnętrznej są zależne od czasu własności odkształceniowe.

Celowe jest zwrócenie uwagi na problemy technologiczne związane ze sterowaniem obróbką cieplno-mechaniczną (odpuszczanie, normalizacja itd.) przy uwzględnieniu charakterystyk wytrzymałościowych i własności fizyko-mechanicznych obrabianego materiału. W znanych pracach z zakresu sterowania poziomem naprężeń szczątkowych [103, 108, 110] zagadnienie jest rozwiązywane w oparciu o informację a priori o czasie chłodzenia wyrobu w ostatnim stadium jego walcowania w celu wyrównywania temperatur w przekroju wyrobu i minimalizacji w taki sposób poziomu naprężeń szczątkowych. Zadanie sterowania w tym przypadku sprowadza się do stworzenia warunków do powstania wspólnych odkształceń plastycznych.

Przyczyny paczenia części o małej sztywności typu wał wystarczająco dokładnie przeanalizowano w rozdziale 1. Należy tylko odnotować, że utrata dokładności geometrycznej wyrobu jest bezpośrednio związana z powstaniem naprężeń szczątkowych pierwszego rzędu. Powstają one w wyniku nierównomierności odkształceń plastycznych metalu, niejednorodności pola temperaturowego w półfabrykacie w procesie chłodzenia oraz przebiegu w różnym czasie procesu przekształceń strukturalnych. Przy minimalizacji poziomu naprężeń szczątkowych, w wyniku sterowania parametrami bieżącymi obróbki cieplno-mechanicznej, te przyczyny są usuwane. Trudność w wyborze parametrów sterowalnych polega na tym, że nie ma jednoznacznych zależności między bieżącymi i końcowymi parametrami procesu obróbki cieplno-mechanicznej. Jako podstawowe (dominujące) parametry sterowania przyjęto: temperaturę i odkształcenie wzdłużne.

Proces obróbki cieplno-mechanicznej należy podzielić na trzy etapy: obciążania, obciążenia stałego i odciążania. Każdy z tych etapów, w zależności od charakterystyk wytrzymałościowych metalu, wymaga odpowiedniego podejścia technologicznego. Istnieje standardowa technologia realizacji takich operacji jak na przykład odpuszczanie, których temperatura przebiegu jest znana, ale najczęściej jest wyznaczana z punktu widzenia inżynierii materiałowej, a nie technologii obróbki części osiowosymetrycznych o małej

sztywności typu wał ulegających paczeniu. Obniżenie poziomu naprężeń szczątkowych w zasadzie prowadzi do paczenia części w procesie odpuszczania lub wyżarzania, a korekta ich krzywoliniowości również powoduje powstanie niejednorodnych naprężeń szczątkowych.

Celem rozpatrywanej obróbki cieplno-mechanicznej jest minimalizacja i stabilizacja naprężeń szczątkowych długiej części w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym. Osiągnięcie postawionego celu wymaga rozwiązania jednego z podstawowych problemów – przy jakiej temperaturze należy przeprowadzać obróbkę cieplno-mechaniczną. Zależności granicy plastyczności od temperatury, przy podwyższonych temperaturach, w przypadku różnych stali konstrukcyjnych opracowane na podstawie danych z tablic własności mechanicznych, przedstawiono na wykresie 3.4.

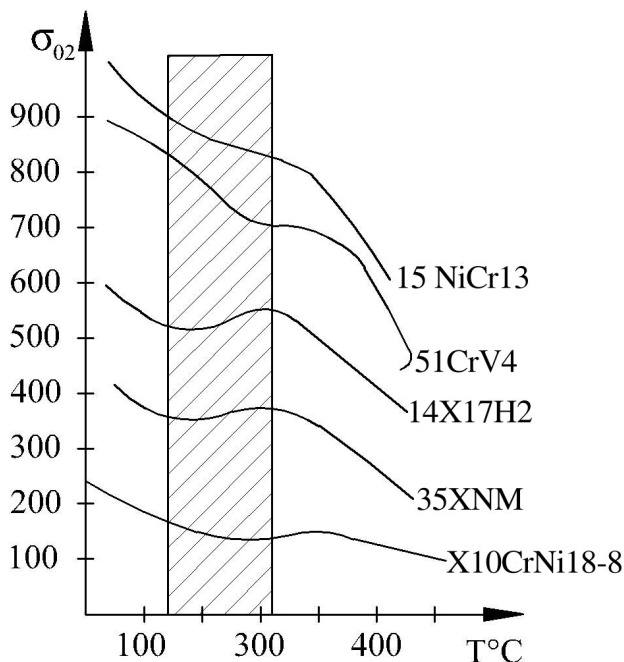
W przypadku stali konstrukcyjnych jest charakterystyczne występowanie odcinków o słabej zależności granicy plastyczności od temperatury, przy czym takie odcinki leżą w przedziale $(0,15-0,25) T_{pl}^o$, a niektóre stale (na przykład 41Cr4) mają odcinki o podwyższonej wartości granicy plastyczności przy nagrzewaniu. W przypadku wyrobu z takiej stali należy szczególnie uważnie wybrać tę wielkość odkształcenia plastycznego na którą skokowo i lokalnie ulegają odkształceniu mikroobjętości metalu przy wyjściu poza granicę sprężystości – krytyczne odkształcenie różnych materiałów jest różne, lecz nie przekracza 4%. Przy wyjściu poza granicę plastyczności odkształcenie plastyczne nie zachodzi jednocześnie w całej objętości materiału – do czasu kiedy wszystkie mikroobjętości metalu nie będą objęte odkształceniem plastycznym o wartości krytycznej. Dopiero wtedy jest możliwe jednoczesne odkształcenie w całej objętości materiału.

Trudność określenia tej krytycznej wielkości jako informacji do zadajnika bloku sterowania odkształceniem osiowym polega na tym, że ta wielkość zależy od: wymiarów ziarna, obróbki cieplnej, prędkości odkształcania itd. Niezbędna jest więc kontrola nierównomierności odkształcenia plastycznego wzdłuż półfabrykatu. Konieczne jest także kryterium charakteryzujące średnią nierównomierność odkształcenia plastycznego $K_{sr} = \varepsilon_{max} / \varepsilon_{sr}$.

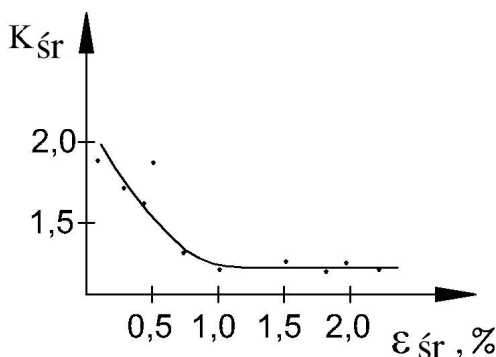
Wartość K_{sr} bliska jedności świadczy o jednorodności odkształceń plastycznych materiału po całej długości półfabrykatu. Wartości współczynnika K_{sr} w zależności od średniego odkształcenia szczątkowego próbki ze stali X10CrNi18-8 przy temperaturze $T^o = 320^oC$ przedstawiono na wykresie 3.5, przy czym wartość K_{sr} wraz ze wzrostem odkształcenia średniego stopniowo ulega zmniejszeniu, a przy $\varepsilon \leq 1\%$ jest obserwowany znaczny rozrzut danych i duża wartość współczynnika K_{sr} (1,5 do 2).

W przypadku wyrobów ze stali 15NiCr13, 51CrV4, X10CrNi18-8 obróbkę cieplno-mechaniczną najlepiej jest przeprowadzać przy temperaturach 300^o-320^oC , ponieważ granica plastyczności przy tej temperaturze ulega obniżeniu od 20% do 25% i zależność σ_{02} od temperatury jest niewielka. Zatem

należy rozwiązać zadanie o granicznej krytycznej wielkości odkształcenia osiowego. Jest to związane z tym, że odkształcenie plastyczne w metalach półkryształicznych w warunkach jednorodnego stanu naprężonego charakteryzuje się lokalnością przebiegu, przy czym należy rozróżniać mikro i makro lokalność (niejednorodność) odkształcenia plastycznego.



Wykres 3.4. Zależności eksperymentalne σ_{02} od temperatury



Wykres 3.5. Zależność współczynnika K_{sr} od odkształcenia osiowego

Nierównomierność odkształcenia plastycznego w mikro objętościach ma istotny wpływ na proces płynięcia plastycznego i na kryterium wytrzymałości, jednak nie udaje się ocenić w sposób ilościowy wpływu mikro niejednorodności na mikro niejednorodność odkształcenia plastycznego. Nierównomierność odkształcenia plastycznego posiada dwie fazy przebiegu: pierwsza – stopniowe odkształcenie plastyczne mikro objętości metalu, druga – jednocześnie lecz nierównomierne odkształcenie mikro objętości metalu mające zasadnicze znaczenie przy ocenie niejednorodności własności plastycznych materiałów.

Kryterium K_{sr} jest czułe na zmianę struktury metalu, jeżeli w wyniku niejakościowej obróbki cieplnej powstały odcinki z ziarnami o różnej wielkości to wartość K_{sr} wyraźnie wzrasta. Równomierne odkształcenie plastyczne jest uzyskiwane w wyniku prze-mieszczenia ogniska odkształceń wzdłuż rozciąganej próbki od odcinka bardziej umocnionego do mniej umocnionego. Proces odkształcenia równomiernego zachodzi pod warunkiem, że $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, natomiast kontrola lokalizacji odkształceń na określonym odcinku wału (na przykład w przeciwwęzłach wyższych harmonik) przy nagrzewaniu jest możliwa tylko w przekroju poprzecznym, ponieważ pomiar względnego osiowego (wzdłużnego) odkształcenia przy obróbce cieplno-mechanicznej nie jest możliwy z powodu barku odpowiednich technicznych środków pomiarowych.

Zgodnie z opracowaną technologią obróbki cieplno-mechanicznej wyrób jest rozciągany (na przykład przy temperaturze, przy której sprężystość w niewielkim stopniu zależy od temperatury) do wymaganego stopnia odkształcenia, zatem jeżeli równomierność odkształcenia plastycznego nie jest zadawalająca to odcinki o wysokim stopniu odkształcenia są chłodzone z wysoką prędkością, a odcinki o odkształceniu niewielkim są nagrzewane i po uzyskaniu wymaganego odkształcenia temperatura znowu jest podwyższana do poprzedniej wartości. Proces ten jest powtarzany aż do uzyskania równomiernego odkształcenia w całej objętości metalu po całej długości wyrobu, przy tym prędkość odkształcenia w czasie ochładzania i nagrzewania ulega zmniejszeniu 2–3 krotnie. Przedstawiony etap obróbki cieplno-mechanicznej umożliwia więc usunięcie dziedziczności technologicznej od operacji poprzedzających, ustabilizowanie poziomu naprężeń szczątkowych w przekroju i wzdłuż wyrobu, powstałe przy tym naprężenia szczątkowe są jednego znaku, oraz przeprowadzenie prostowania długich części w tym przypadku, kiedy w trakcie poprzednich operacji uległy one paczeniu.

3.2. Specyfika przebudowy strukturalnej materiału części przy regulowanym procesie cieplno-mechanicznym

W procesie obciążania cieplno-mechanicznego zmianie ulegają również naprężenia drugiego rzędu.

Osiowe naprężenia zewnętrzne przyspieszają relaksację naprężeń drugiego rzędu ale ich główna rola polega na wyrównywaniu naprężeń pierwszego rzędu, a więc stabilizacji kształtu wału.

Należy odnotować, że obciążenia osiowe można łączyć także z wibracyjnymi metodami obróbki, ale to zagadnienie będzie omówione odrębnie.

Przy realizacji opracowanej technologii obróbki cieplno-mechanicznej problem stanowi sam obiekt sterowania (układ dynamiczny), obrabiana część i jej model matematyczny. W tym przypadku należy rozwiązać zagadnienie kontroli i sterowania przebudową strukturalną materiału części, ponieważ umocnienie materiałów krystalicznych poprzez obróbkę na zimno – zgmiot rośnie w wyniku zwiększenia gęstości dyslokacji. Powstają przy tym siatki dyslokacji i przemieszczenie dyslokacji w płaszczyźnie, przenikniętej innymi dyslokacjami, jest bardzo utrudnione.

Ocena sił działających na dyslokacje główne w ściance pokazuje, że powstają naprężenia wyższe od granicy sprężystości:

$$\sigma = (2\pi \cdot (1 - \nu)h)^{-1} \cdot Gb \cdot \ln N, \quad (3.1)$$

gdzie: N – liczba dyslokacji w ściance,
 h – średnia odległość między nimi,
 G – moduł sprężystości porzecznej,
 ν – współczynnik Poissona.

Z mikrostruktur wynika, że: $N \approx 2 \cdot 10^2$, $h \approx 2 \cdot 10^{-7}$, $\sigma \approx 3 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$. Przy nagrzewaniu, kiedy temperatura osiąga wielkość przy, której istotnymi stają się procesy dyfuzji, cząstki fazy o niewielkiej dyspersji rozpuszczają się i przy wymianie rozpuszczonych atomów w wyniku dyfuzji ulegają przemieszczeniu razem z dyslokacjami. Przepędzanie dyslokacji i wyżarzanie prowadzą do zmniejszenia gęstości dyslokacji.

W wyniku niejednorodnego odkształcenia plastycznego – zgmiotu powierzchniowego powstają naprężenia szczątkowe. Warstwy zewnętrzne są ściskane, a warstwy wewnętrzne rozciągane. Ponieważ warstwa zewnętrzna zwykle ma niewielką grubość, naprężenia ściskające w niej są znacząco większe od naprężeń rozciągających w warstwach wewnętrznych. Typowe wykresy takich naprężeń są przedstawione na przykład w pracach [76, 94]. Według wartości bezwzględnej naprężenia promieniowe są od 8 do 10 razy mniejsze od osiowych

naprężeń szczątkowych. Zadaniem obróbki cieplno-mechanicznej jest zwiększenie jednorodności własności materiału, to znaczy zmniejszenie rozrzutu wartości naprężeń kołowych σ_0 i, głównie, osiowych σ_z w warstwie powierzchniowej. Wywołanie dyfuzji wymaga przyłożenia zewnętrznej siły rozciągającej i jednoczesnego nagrzania półfabrykatu w piecu.

Naprężenie rozciągające zewnętrzne wpływa na zmniejszenie naprężenia ściskającego wewnętrznego, co powoduje dyfuzję defektów i przebudowę strukturalną. Podwyższenie temperatury obniża naprężenie odkształcenia plastycznego. W wyniku nierównomiernego nagrzewania (warstwa zewnętrzna nagrzewa się szybciej, a środek pozostaje zimny) powstają naprężenia ciepłne, które naruszają równowagę między naprężeniami koncentracji i sprężystymi, co zwiększa dyfuzję defektów. Zależność empiryczna współczynnika dyfuzji od temperatury przedstawiona jest w pracach [87, 88]:

$$D = D_0 \exp - A / RT . \quad (3.2)$$

Dyfuzja przy tym zachodzi na granicach ziaren. Niejednorodność w rozkładzie naprężeń wynika z różnicy wielkości ziaren, różnego odkształcenia plastycznego i ich wzajemnej orientacji. Przeprowadzenie pomiarów wszystkich czynników jest bardzo skomplikowane.

W celu uproszczenia można przyjąć, że niejednorodność jest uwarunkowana różnymi kątami zorientowania granic między ziarnami.

Energię granicy dyslokacyjnej można przedstawić w postaci zależności:

$$A / A_m = \theta / \theta_m \cdot (1 - \ln \theta / \theta_m) , \quad (3.3)$$

gdzie: A – energia granic ziaren,

A_m – maksymalna energia granic ziaren,

θ – kąt orientacji ziarna,

θ_m – kąt orientacji, przy którym energia granicy jest maksymalna.

Gęstość dyslokacji i naprężenia w pobliżu granicy jest proporcjonalna do kąta θ . Dyfuzja dyslokacji prowadzi więc do wyrównywania kąta θ .

Rozpatrzono w jak sposób zewnętrzne naprężenia osiowe wpływają na teksturę półfabrykatu (części), co ostatecznie przyczynia się do zmniejszenia niejednorodności naprężeń. Jeżeli kryształy posiadają anizotropię to ich energię w zależności od orientacji ziarna w stosunku do naprężenia zewnętrznego można zapisać jako:

$$A = K_1 \cdot \alpha_1^2 \cdot \alpha_2^2 - K_2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta , \quad (3.4)$$

gdzie: θ – kąt między σ i kierunkiem „lekkiej” osi,

α_1, α_2 – cosinusy kierunkowe dwóch pozostałych osi.

Zgodnie z przedstawionym w pracy [91] można zapisać:

$$\alpha_1 = (\cos \theta + \sin \theta) / \sqrt{2}, \quad \alpha_2 = (\cos \theta - \sin \theta) / \sqrt{2}, \quad (3.5)$$

$$W = \frac{1}{4} K_1 \cdot (2y^2 - 1) - K_2 \cdot y \cdot \sigma, \quad y = \cos \theta.$$

Z warunku stabilności $dA / dy = 0$ otrzymano zależność:

$$\cos \theta = K_1^{-1} \cdot K_2 \cdot \sigma.$$

Przebudowie strukturalnej zachodzącej w warstwie powierzchniowej towarzyszy wydzielanie energii, zgromadzonej w wyniku odkształcenia plastycznego. Energię tę w postaci drgań dźwiękowych można określić za pomocą przetwornika piezoelektrycznego zamocowanego na powierzchni części.

Przy założeniu, że w wyniku niejednorodności rozkład naprężeń przebiega według określonego prawa, na przykład rozkładu normalnego:

$$P(\sigma) = 2(\alpha / \pi)^{1/2} \cdot \exp[-\alpha(\sigma - \tilde{\sigma})^2], \quad 0 \leq \sigma \leq \infty, \quad (3.6)$$

przy średnim $\tilde{\sigma}$ i dyspersji $(2\alpha)^{-1}$.

Jeżeli do wału są przyłożone zewnętrzne naprężenia rozciągające σ_0 , to przebudowa strukturalna zachodzi w tej części ziaren, w której naprężenie ściskające $|\sigma| < \sigma_0$. Względna liczba takich ziaren, a więc intensywność sygnału jest równa:

$$I \approx \int_0^{\sigma_0} P(\sigma) d\sigma = 2 \cdot [\Phi(\alpha\tilde{\sigma}) - \Phi(\alpha(\tilde{\sigma} - \sigma))], \quad (3.7)$$

gdzie: $\Phi(x)$ – zakres prawdopodobieństwa, funkcja Laplace'a.

Ponieważ σ w trakcie obróbki cieplno-mechanicznej ulega wyraźnemu zmniejszeniu to w procesie nagrzewania przy zadanym naprężeniu σ_{02} ma miejsce przebudowa strukturalna w zakresie zwiększenia mocy przyjmowanej przez przetwornik piezoelektryczny.

Analiza modelu matematycznego pokazuje, że przyłożenie naprężeń rozciągających prowadzi do zmniejszenia niejednorodności w rozkładzie naprężeń szczytkowych. Rejestracja i sterowanie przebudową struktury materiału jest celowa w zakresie wyodrębnienia energii drgań wysokoczęstotliwościowych towarzyszących tej przebudowie.

Przy oddziaływaniu naprężeń osiowych równych lub większych od granicy plastyczności ustala się struktura, którą charakteryzuje duży stopień jednorodności i głównie orientacja ziaren wzdłuż osi. Wynika to z tego, że dyslokacja powoduje zmniejszenie kątów dezorientacji granic. Ponieważ kąt dezorientacji jest związany z koncentracją dyslokacji to podstawowym mechanizmem jest

ruch dyslokacji. Rozmnożenie i poślizg dyslokacji można wyjaśnić w oparciu o model Franka i Rida, zgodnie z tym modelem mogą być generowane pętle dyslokacyjne, jeżeli naprężenie:

$$\sigma > \sigma_{prz} \frac{b}{\zeta}, \quad (3.8)$$

gdzie: σ_{prz} – naprężenie przemieszczenia,
 b – wektor Burgera o wielkości rzędu stałej siatki,
 ζ – odległość między dyslokacjami.

Najbardziej bezpośrednim mechanizmem hamowania dyslokacji jest występowanie w krystalicze cząstek fazy martenzytycznej. Przy obróbce stali austenitycznej taką fazą będą cząstki dyspersyjne fazy martenzytycznej. Dużą rolę w stabilizacji dyslokacji odgrywają także atomy rozpuszczone, a więc, czym większe jest umocnienie tym mniej ruchome są dyslokacje.

Przy wystarczająco dużym naprężeniu osiowym wewnątrz ziaren następuje generacja dyslokacji. Ponieważ dyslokacja wewnątrz ziarna ma znak przeciwny znakowi dyslokacji na granicach, to kąt dezorientacji granic ulega zmniejszeniu. Przy tym koncentracja dyslokacji wewnątrz ziarna może praktycznie nie ulegać zmianie, to znaczy, zgniot i wytrzymałość również nie ulegają zmianie. Twierdzenie to jest spełnione w przypadku ziaren o mniejszym umocnieniu i kącie $\theta < \theta_m$. Energia przy tym ulega zmniejszeniu i stan staje się bardziej zrównoważony. Jeżeli $\theta < \theta_m$ to zmniejszenie kąta dezorientacji jest związane ze wzrostem energii granic; jest to możliwe tylko w tym przypadku, jeżeli długość granicy ulega zmniejszeniu. W takich ziarnach ma miejsce przemieszczenie granic – mniejsze ziarna rosną kosztem większych. W tym przypadku również jest uzyskiwana duża jednorodność. Prędkość odkształcenia jest określana ciągliwością:

$$\Delta\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}, \quad (3.9)$$

gdzie: η – współczynnik ciągliwości przemieszczeniowej,
 $\Delta\sigma$ – przekroczenie obciążenia równego granicy plastyczności (przemieszczeniowej).

Relaksacja naprężeń jest określana równaniem:

$$d\sigma_{ik} / dt = -\sigma_{ik} / \tau, \quad (3.10)$$

tj. przebiega według funkcji eksponencjalnej, gdzie τ – czas relaksacji, który można ocenić z zależności:

$$\tau = \eta / \sigma_{prz}. \quad (3.11)$$

Relaksacja naprężeń drugiego rzędu powoduje relaksację naprężeń pierwszego rzędu. Związek ten jest dosyć skomplikowany i można mówić tylko

o zależnościach przybliżonych. Przyjmując, że zmiany naprężeń są opisywane równaniem kinetycznym, analogicznym do znanych równań przewodności cieplnej lub dyfuzji, to drugie równanie Ficka przyjmuje postać:

$$\partial \sigma^* / \partial t = -B \cdot \Delta \cdot \sigma^*, \quad (3.12)$$

gdzie: σ^* – naprężenie pierwszego rzędu,
 Δ – operator Laplace'a,
 B – parametr kinetyczny, analogiczny do współczynnika dyfuzji.

Można uzyskać zależność:

$$B \cdot \tau = R^2, \quad (3.13)$$

gdzie: R – wymiar ziarna.

Przy jednym wymiarze dla granicy między dwoma blokami ziaren o naprężeniach różniących się o $\Delta \cdot \sigma^*$, można zapisać zależność od czasu [91]:

$$\Delta \sigma^*(x, t) = 0,5 \Delta \cdot \sigma^*(erfz), \quad (3.14)$$

gdzie: Δ – odległość od granicy podziału,
 $(erfz)$ – całka prawdopodobieństwa Gaussa – wartości tej funkcji są zamieszczone w odpowiednich tablicach matematycznych [15]:

$$erfz = 2 / \pi^{1/2} \cdot \int_0^z e^{-y^2} dy, \quad z = (0,5x / R)(t / \tau)^{-1/2}. \quad (3.15)$$

Zależność dla z uzyskano przy uwzględnieniu zależności (3.13), (3.14) i (3.15), z których wynika, że relaksacja naprężeń pierwszego rzędu jest określana wymiarami ziaren i czasem relaksacji naprężeń drugiego rzędu. Zgodnie z (3.9) i (3.11) τ jest wyrażane przez charakterystyki materiału η i ζ . Rola naprężeń osiowych polega nie tylko na tym, aby stworzyć warunki do poślizgu dyslokacji [75], lecz również na tym żeby ustalić równoważny rozkład symetryczny względem osi wału. Po relaksacji naprężeń w związku z symetrią osiową naprężenia osiowe, promieniowe i styczne nie zależą od γ i Z (w cylindrycznym układzie współrzędnych).

Celowe jest wykorzystanie trybu cyklicznego osiowego obciążenia wału. Przy powtórnym obciążeniu odkształconej plastycznie próbki jej odporność na odkształcenie plastycznie ulega zmniejszeniu, jest to związane z przebudową strukturalną i relaksacją naprężeń.

W związku z tym obciążenie cykliczne można wykorzystać jako metodę kontroli. Obróbka mechaniczna w obniżonej temperaturze umożliwia zmniejszenie naprężeń krytycznych, niezbędnych do relaksacji naprężeń drugiego rzędu. Poślizg dyslokacji jest uzależniony od ruchomych defektów punktowych i rozpuszczonych atomów zanieczyszczeń, a także od koncentracji fazy meta-

stabilnej (w danym przypadku cząsteczek martenzytu), które są zaporą dla dyslokacji. Jeżeli więc nagrzać część do temperatury około $T^{\circ} = 300^{\circ}\text{C}$, to czas relaksacji naprężeń drugiego rzędu, a więc i czas relaksacji naprężeń pierwszego rzędu ulega zmniejszeniu.

Drugi rodzaj obróbki cieplno-mechanicznej to wygrzewanie przy stałej temperaturze i oddziaływanie vibracyjne w celu minimalizacji czasu relaksacji i poziomu naprężeń szczątkowych. Przy tym stabilizacji ulega odkształcenie osiowe, obciążenie zewnętrzne i temperatura wzdłuż i w przekroju półfabrykatu.

Oddziaływanie vibracyjne na półfabrykat w celu uzyskania równomiernego rozkładu naprężeń, to znaczy, spowodowania „szybkiego” starzenia części posiada wiele zalet w porównaniu z innymi sposobami uzyskania stabilnego kształtu części. Zastosowanie rezonansowego pochłaniania energii umożliwia, z jednej strony, skoncentrowane pochłanianie energii przez defekty, a z drugiej, jak będzie to pokazane niżej, może być zastosowane jako sygnał do sterowania procesem. Niezależnie od fizycznego charakteru pochłaniania energii, zewnętrznym obserwowanym jej przejawem w materiale lub konstrukcji jest pętla histerezy, powstająca przy drganiach wymuszonych.

Kształt pętli zależy od wielu czynników, ale wystarczy się ograniczyć tylko do określenia jej powierzchni, ponieważ właśnie powierzchnia pętli histerezy charakteryzuje energię rozpraszaną w materiale, która ogranicza wielkość amplitudy drgań rezonansowych, co dosyć dokładnie zostało przedstawione w pracach [70, 91]. Dekrement logarytmiczny tłumienia można określić w sposób eksperymentalny według znanej zależności:

$$2\lambda = \Delta A / A,$$

gdzie: ΔA i A – energia rozproszona i jej wartość amplitudowa w cyklu drgań.

Oddziaływanie vibracyjne może spowodować restrukturyzację, to znaczy, zmianę naprężeń pierwszego rzędu w obszarze plastyczności – w tym obszarze pochłanianie będzie maksymalne. Niezbędne parametry robocze zostaną ukształtowane w wyniku działania zewnętrznego naprężenia rozciągającego. W celu określenia parametrów pętli histerezy należy zbadać drgania układu o jednym stopniu swobody przy jednorodnym rozkładzie naprężeń po objętości elementu sprężystego:

$$\ddot{x} + \omega^2 \dot{x} + 2\beta x = \frac{P}{m} \cdot \cos pt \quad (3.16)$$

gdzie: $\omega = \omega_0 + \xi^* \cdot C_1$, $\beta = \xi^* \cdot D_1$,

ω_0 – częstość własna układu bez uwzględnienia oporu niesprężystego,

C_1, D_1 – poprawki nieliniowe, które można wyrazić przez parametry pętli histerezy, jak to zrobiono w (3.21),

ξ – mały parametr,

p – częstość siły zewnętrznej F ,

m – masa.

Zjawisko rezonansu jest rozpatrywane w zależności od dekrementu logarytmicznego, własności materiału i parametrów oddziaływania zewnętrznego σ , W/m .

Rozwiązanie (3.16) umożliwia określenie wartości amplitudy:

$$X_0 = \frac{P}{m} [(\omega^2 - p^2)^2 + 4\beta^2 p^2]^{1/2}, \quad (3.17)$$

$$x_{skr} = F / (2\beta m \omega).$$

Energia i gęstość energii przy rezonansie są równe:

$$U = m \cdot \omega^2 \cdot x_{pe3}^2 / 2 = P^2 / 8\beta^2 \cdot m, \quad q = P^2 / 8\beta^2 \cdot m \cdot \nu, \quad (3.18)$$

gdzie: ν – objętość rozpatrywanego elementu.

Ustalono, że przemieszczenia niesprężyste powstają w wyniku generacji i przemieszczenia dyslokacji. Źródłem dyslokacji mogą być hamowane dyslokacje, które przy dostatecznie dużych naprężeniach $\sigma = \sigma_{sz} + \sigma_{skr}$ (σ_{sz} – naprężenia szczałkowe) powodują powstawanie pętli dyslokacji. Drgania cieplne nie mogą spowodować powstawania pętli dyslokacji, ponieważ energia drgań cieplnych jest o wiele mniejsza od energii niezbędnej do powstania pętli. Rolę drgań cieplnych, to znaczy rolę czynnika ruchu chaotycznego, w danym przypadku spełniają drgania wysokoczęstotliwościowe drugiej, trzeciej i wyższych wartości modalnych.

Jeżeli powstaje pętla dyslokacyjna, to zmiana energii jest określana zależnością:

$$\Delta U = \frac{1}{4} \pi \cdot L^2 \cdot b \cdot [2E \cdot b / (L - \sigma)], \quad (3.19)$$

gdzie: b – wektor Burgersa,

L_1 – długość odcinka zahamowanej dyslokacji.

Energia ruchu chaotycznego przypadająca na pętlę dyslokacyjną może być określona z zależności (3.19) jako:

$$U_{ch} = q \pi \cdot L_1^2 \cdot b / 4 = P^2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot L^2 \cdot b / 32 m^2 \cdot \beta^2, \quad (3.20)$$

gdzie: ρ – gęstość materiału.

„Czas życia”, to jest częstość powstawania pętli dyslokacyjnych jest określana według zależności Boltzmana:

$$\tau^{-1} = \tau^{-1} \cdot \exp(-\Delta U / U_{ch}). \quad (3.21)$$

A więc z zależności (3.19–3.21) uzyskuje się $\beta = \tau^{-1}, \lambda = \beta T$:

$$\lambda \cdot (2\pi / \tau_0 \omega) - 1 = \exp[-B(\beta \cdot P^2 \cdot m^2) \cdot (2Eb / (L - \sigma)) \cdot (\lambda \tau_0 \omega / 2\pi)^{-1}].$$

Należy odnotować, że jeżeli $\sigma_{02} = 2E \cdot b / L_1$, to $\tau = \tau_0$ jest niezależne od oddziaływania wibracyjnego, a τ_0 jest określane prędkością odkształcenia ε :

$$(2\pi)^{-1} \cdot \tau_0 = \dot{\varepsilon}^{-1} \cdot \varepsilon_{pl}, \quad (3.22)$$

gdzie: ε_{pl} – odkształcenie plastyczne lub zmiana odkształcenia w zakresie plastyczności przy stałym σ .

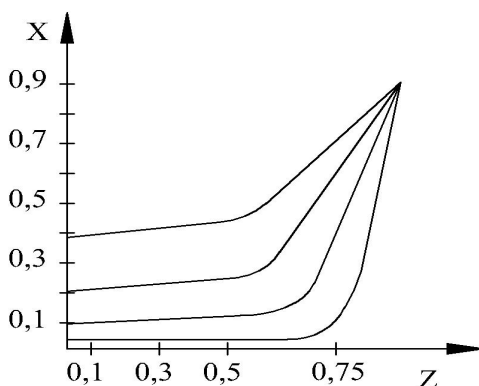
Ostatecznie uzyskuje się równanie transcendentne określające zależność λ od parametrów oddziaływania zewnętrznego i od początkowego stanu materiału:

$$x = \exp-(x/y)^2 \cdot (1-z), \quad (3.23)$$

$$x = \lambda \cdot \dot{\varepsilon} / \omega \cdot \varepsilon_{plast}, \quad y = P / m \cdot (\beta / \sigma_{02})^{1/2}, \quad z = \sigma / \sigma_{02}.$$

Zależności $x = f(z)$ pochłaniania rezonansowego od amplitudy drgań wymuszonych przy stałym naprężeniu przedstawiono na wykresie 3.6.

Pochłanianie rezonansowe zależy od amplitudy drgań wymuszonych i stałego naprężenia. Obserwowany jest wyraźny wzrost dekrementu logarytmicznego przy naprężeniach $\sigma \geq 0,75\sigma_{02}$. Oddziaływanie wibracyjne powoduje przemieszczenie dyslokacji i związanych z nimi naprężeń drugiego rzędu w zakresie obciążeń mniejszych od granicy sprężystości.



Wykres 3.6. Zależność $x = f(z)$ pochłaniania rezonansowego od amplitudy drgań wymuszonych przy stałych wartościach σ

Ponieważ redystrybucja naprężeń jest związana z wyraźnym wzrostem pochłaniania drgań to sygnał wibroakustyczny można wykorzystać nie tylko jako oddziaływanie zewnętrzne ale także jako cechę diagnostyczną.

Zwykle w przypadku stali konstrukcyjnych istotne obniżenie charakterystyk wytrzymałościowych, niepożądane przy eksploatacji, ma miejsce po nagraniu do $T^{\circ} = 330\text{--}350^{\circ}\text{C}$, to znaczy powyżej wartości $0,25T_{pl}^{\circ}$, dlatego aby zachować charakterystyki wytrzymałościowe materiału wała po obróbce wibracyjnej i ochładzaniu, nagrzewanie powyżej 350°C jest niepożądane. Zakres efektywny jest zakreskowany na wykresie 3.4. Oprócz tego, obróbka wibracyjna przy wysokiej temperaturze może doprowadzić do lokalnych odkształceń wyrobu pod wpływem przyłożonych naprężeń dynamicznych, co przy chłodzeniu prowadzi do powstania lokalnych obszarów naprężonych. Wiadomo także [26, 27, 45, 123], że obróbka wibracyjna kilkakrotnie skraca czas relaksacji naprężeń, a więc odpowiednio zwiększa wydajność obróbki cieplno-mechanicznej.

Celem przedstawionych dwóch etapów obróbki cieplno-mechanicznej jest usunięcie dziedziczności technologicznej (stabilizacji i minimalizacji naprężeń szczątkowych w przekroju i po długości półfabrykatu). Jeżeli materiał wyrobu (półfabrykatu) ma strefę plastyczności na wykresie $\sigma - \varepsilon$, to odkształcenie równomierne (rzędu $\varepsilon = 3\%\text{--}5\%$) całego obiektu po długości półfabrykatu w pełni usuwa naprężenia szczątkowe ukształtowane na poprzednich operacjach [56, 154, 155]. W przypadku kiedy materiał półfabrykatu (wyrobu) przedstawiony na wykresie $\sigma - \varepsilon$ jako umacniający się w procesie cyklu technologicznego ma w przekrojach poprzecznych różne odkształcenia plastyczne i równe według znaku naprężenia (na przykład przy prostowaniu na zimno) to w trakcie obróbki cieplnej należy usunąć te nierównomierności, wyrównując naprężenia szczątkowe w przekrojach poprzecznych na całej długości półfabrykatu. Opracowana operacja technologiczna obróbki cieplnej w urządzeniu przy wykorzystaniu odkształcenia osiowego w wielu przypadkach nie umożliwia całkowitego rozwiązania tego problemu. W procesie obróbki cieplno-mechanicznej przy zastosowaniu opracowanego urządzenia, w przypadku, kiedy temperatura nagrzania półfabrykatu nie przekracza temperatury odpuszczania, jest celowe wytworzenie naprężeń szczątkowych o jednym znaku w przekroju poprzecznym i obniżenie ich poziomu oraz wyrównanie przy tym właściwości mechanicznych materiału wzdłuż półfabrykatu.

Na etapie trzecim obróbki cieplno-mechanicznej – odciażaniu mogą pojawić się nowe naprężenia szczątkowe w wyniku niezgodności odkształceń sprężystych i plastycznych. Granice plastyczności wraz z obniżeniem temperatury ulegają wyraźnemu podwyższeniu, szczególnie w zakresie temperatur $T^{\circ} = 250\text{--}20^{\circ}\text{C}$, a więc jedynie możliwym oddziaływaniem technologicznym jest automatyczne sterowanie obróbką cieplno-mechaniczną, kiedy to są kontrolowane i sterowane obciążenie zewnętrzne związane z ochładzaniem półfabrykatu oraz prędkość ochładzania. Zbudowane zostały modele obróbki cieplno-mechanicznej w postaci schematu strukturalnego, który umożliwia, przy pomocy metod częstotliwościowych, z uwzględnieniem obwodów sterowania, określenie parametrów dynamicznych procesu. Nastąpił dalszy rozwój wiedzy o przy-

czynach utraty kształtu przez gotowe wyroby przy uwzględnieniu nierównomierności odkształceń plastycznych w przekrojach poprzecznych półfabrykatów, naprężeń szczątkowych i procesów relaksacyjnych.

Zastosowano nowe podejście do uzyskania stabilności długich części o małej sztywności – wytworzenie równomiernego minimalnego stanu naprężonego przy obróbce cieplno-mechanicznej w wyniku regulowania przebiegu procesu technologicznego. Na podstawie systematyzacji wyników badań wybrano racjonalne, z punktu widzenia charakterystyk wytrzymałościowych, materiały oraz parametry temperaturowe obróbki w przypadku wielu materiałów. Opracowano podstawy technologii obróbki cieplno-mechanicznej. Określono i uzasadniono w sposób teoretyczny zakresy oddziaływania dynamicznego przy obróbce cieplno-mechanicznej na etapie stabilizacji oddziaływania temperaturowo-mechanicznego. Obróbka wibracyjna przy temperaturach odpuszczania prowadzi do obniżenia poziomu naprężeń szczątkowych i kilkakrotnego skrócenia czasu ich relaksacji.

4. ŚRODKI TECHNOLOGICZNE DO ZWIĘKSZENIA STABILNOŚCI KSZTAŁTU I DOKŁADNOŚCI CZĘŚCI O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

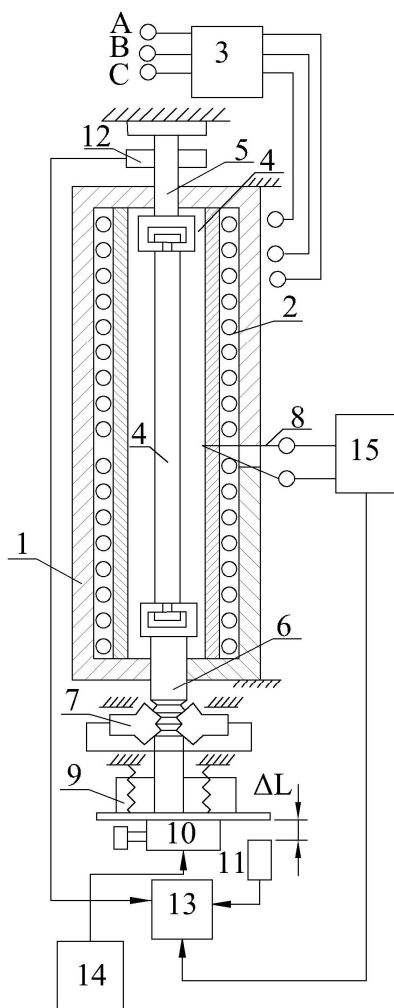
4.1. Urządzenie do osiowego odkształcania plastycznego

Jak pokazano w rozdziałach 2 i 3, w celu minimalizacji dziedziczności technologicznej od poprzedniej operacji należy obniżać poziom naprężeń szczątkowych i doprowadzić do równomiernego stanu naprężonego wzdłuż całego półfabrykatu, co umożliwi równomierną relaksację naprężeń i minimalne paczanie wyrobów w trakcie ich eksploatacji.

W tym celu do procesu technologicznego wprowadzono operację obróbki cieplno-mechanicznej. Trudność sterowania takim procesem wynika z tego, że własności fizyko-mechaniczne materiału, z którego wykonuje się części, są dosyć różne oraz, że istotny wpływ wywierają również warunki zewnętrzne przy ich eksploatacji – powoduje to, że znalezienie jednej zasady sterowania po prostu nie jest możliwe. W pierwszym przybliżeniu zadanie polega na znalezieniu materiału o jednolitej odporności, to znaczy, takiego we wszystkich punktach, którego powstają jednakowe naprężenia mikroskopowe. Analiza charakterystyk statycznych naprężenie – odkształcenie $\sigma = f(\varepsilon)$ pokazała, że we wszystkich materiałach można wyodrębnić trzy obszary: sprężysty, plastyczności i umocnienia. Jeżeli odkształcenie plastyczne jest niewielkie, w granicach od 0,2 do 2%, to krzywe odkształcenia można, w pierwszym przybliżeniu, aproksymować krzywą łamaną. W danym opracowaniu po raz pierwszy jest rozpatrywane zagadnienie kontroli aktywnej stanu materiału w procesie nagrzewania, odkształcenia i automatycznego sterowania naprężeniami szczątkowymi w przeciągu całego czasu obróbki, niezależnie od fizyko-mechanicznych właściwości materiału i parametrów geometrycznych półfabrykatów. Zaprojektowane urządzenie wyposażone w układ sterowania i kanały diagnostyki jest przeznaczone do materiałów posiadających odcinek plastyczności (badania prowadzono w przypadku stali C40). Algorytm pracy takiego urządzenia jest następujący [38].

Piec szybowy 1 z elementem grzewczym 2 jest umiejscowiony w urządzeniu (rys. 4.1, pokazanym umownie). Elementy grzewcze 2 są podłączane do faz *ABC* sieci prądu trójfazowego przez rozrusznik tyrystorowy 3. Część 4 o małej sztywności jest ustawiana pionowo; jej położenie ustala się przy pomocy tulei sprężynujących górnej 5 i dolnej 6 części mechanizmu osiowego obciążenia statycznego i dynamicznego, zawierającego elementy (wytarowaną masę lub

sprężyny) umożliwiające obciążenie quasi-statyczne półfabrykatu w kierunku osiowym oraz wibrator elektrodynamiczny 10 (silnik prądu stałego) zapewniający składową dynamiczną siłę obciążenia osiowego na częstotliwości równej własnej częstotliwości rezonansowej drgań półfabrykatu (części 4) z masą sprowadzoną mechanizmu obciążenia osiowego.



Rys. 4.1. Urządzenie do osiowego odkształcenia plastycznego

Po ustaleniu na sztywno górnej części półfabrykatu 4 przy pomocy tulei sprężynującej 5 mechanizmu mocującego i uzyskaniu osiowego obciążenia quasi-statycznego przez elementy 9 przy pomocy osiowego dolnego mechanizmu mocującego (tulei sprężynującej 6), są podłączane nagrzewnice elektry-

czne 2 do sieci trójfazowej przy pomocy rozrusznika 3 do nagrzewania w piecu szybowym. Wartość bieżąca temperatury jest określana przy pomocy termopar 8 rozmieszczonych wzdłuż pieca (na rys. 4.1 dla uproszczenia jest pokazana tylko jedna termopara). Bieżące wydłużenie liniowe półfabrykatu 4, w wyniku działania osiowego obciążenia quasi-statycznego oraz czynników temperaturowych, jest rejestrowane przy pomocy przetworników bezkontaktowych 11 umiejscowionych względem podstawy platformy mechanizmu 6 dolnego zamocowania. Sterowanie oddziaływaniem dynamicznym obciążenia osiowego i czynnikami temperaturowymi działającymi na półfabrykat, a także rejestracja momentu wystąpienia naruszenia odcinka proporcjonalności wydłużenia liniowego (odkształcenia względnego) półfabrykatu 4 w wyniku działania temperatury i sił zewnętrznych oraz ustalenie położenia dolnego mechanizmu zamocowania, jest wykonywane przez operatora przy wykorzystaniu kanałów diagnostycznych kontroli temperatury i wydłużenia półfabrykatu.

Zmiana bieżącej wartości temperatury jest realizowana przy pomocy termopary 8 i odnotowywana przez przyrząd rejestrujący 13. Po osiągnięciu przez półfabrykat 4 odpowiedniej temperatury, na przykład, w przypadku stali X10CrNi18-8 równej 300–350°C, włącza się napęd elektryczny 14, zasilający silnik elektryczny 10 osiowego oddziaływania dynamicznego w kierunku osiowym (wzdłużnym) półfabrykatu 4. Wielkość i zasada zmiany zmiennej składowej prądu wirnika, pośrednio pokazujących charakter zmiany obciążenia cyklicznego półfabrykatu na własnej częstotliwości rezonansowej, powiązanych funkcjonalnie z procesami fizycznymi kształtowania właściwości fizyko-mechanicznych półfabrykatu, znajdują odzwierciedlenie w cechach diagnostycznych.

Składowa zmienna siły oddziaływania diagnostycznego jest rejestrowana przez przetwornik 12 rejestracji składowej kinematycznej siły (składowej zmiennej) oddziaływania dynamicznego ustalony na tulei sprężynującej 5 mechanizmu zamocowania górnej części półfabrykatu. Zmienna ruchów (drgań) półfabrykatu jest wyodrębniana z sygnału kompleksowego, zdejmowanego z wyjścia przetwornika 11 rejestracji wydłużenia liniowego (odkształcenia) półfabrykatu 4, ustawionego w korpusie urządzenia odnośnie podstawy platformy obciążenia statycznego i dynamicznego

W przypadku, kiedy wartość bieżąca zużywanej mocy aktywnej oddziaływania dynamicznego, na własnej częstotliwości rezonansowej półfabrykatu 4, stanie się mniejsza lub równa od wartości dopuszczalnej to napęd elektryczny 10 oddziaływania dynamicznego jest odłączany. Odpowiada to warunkowi przyspieszonego starzenia, umożliwiającemu usunięcie naprężeń szczątkowych i wyjście – rozkład koncentracji w wyniku działania zakłóceń statycznych oraz dynamicznych przy jednoczesnym wpływie czynników temperaturowych i charakteru ich oddziaływania.

W celu uzyskania pełnej informacji oraz jednoczesnej rejestracji i analizy procesu kształtowania charakterystyk fizyko-mechanicznych półfabrykatu 4,

charakterystyki diagnostyczne prądu wirnika 10 są uzupełniane o dane z rejestratora 13: wielkość bieżącą i zasadę zmiany sygnału – funkcjonalnie powiązanego z mocą aktywną oddziaływania dynamicznego w szerokim zakresie częstotliwościowym.

Ponieważ właściwości fizyko-mechaniczne i warunki ich kształtowania, w przypadku różnych marek stali są różne to, przy rozciąganiu półfabrykatów z różnych materiałów zgodnie z teorią plastyczności, wykresy zależności naprężeń wewnętrznych i odkształceń względnych (wydłużeń) są różne. Złożoność kształtowania charakterystyk diagnostycznych jest uwarunkowana tym, że dla niektórych gatunków stali, na przykład miękkich stali niestopowych (o małej zawartości węgla) obszar plastyczności na wykresie zależności naprężeń odkształceń przy rozciąganiu czasami jest nawet większy od 2–3%, a więc w ich przypadku strefa umocnienia praktycznie nie występuje. Natomiast w przypadku stali niestopowych (o wysokiej zawartości węgla) i stali stopowych jest odwrotnie obszar plastyczności ulega zmniejszeniu do części procenta lub nawet może nie występować – na wykresie rozciągania jest tylko odcinek proporcjonalności naprężeń i odcinek umocnienia.

Złożoność kształtowania cech diagnostycznych i sygnału sterującego powiązanego funkcjonalnie z zasadą zmiany krzywej zależności naprężenia od odkształcenia, wynika ze względnie małej prędkości przyrostu wydłużenia półfabrykatu w funkcji przyrostu temperatury oraz zewnętrznych czynników mechanicznych – różniczkowanie powoli zmieniających się sygnałów jest zadaniem skomplikowanym.

Rejestracja przyrostu wydłużenia osiowego półfabrykatu pod wpływem temperatury i czynników zewnętrznych jest realizowana metodą bezkontaktową przetwornikiem 11 rejestracji wydłużenia statycznego, spowodowanego działaniem osiowej siły rozciągającej i wydłużeniem półfabrykatu, a także wzdlużnymi drganiami półfabrykatu wywołanymi oddziaływaniem dynamicznym napędu elektromechanicznego 10.

Półfabrykat zamocowany na sztywno stygnie razem z piecem elektrycznym do minimalnej wcześniej określonej wartości temperatury. Stwarzane są przy tym warunki uzyskania równomiernego po całej długości części stanu naprężonego jako efektu jej skrócenia, sprzyjającego uzyskaniu równomiernego rozkładu naprężeń szcztątkowych, a zatem zachowaniu prostoliniowości jej osi.

Półfabrykat jest wykonany z materiału mającego odcinek umocnienia na charakterystyce statycznej naprężenie – odkształcenie. Do takich materiałów zalicza się stale nierdzewne (badania były wykonywane na wałach wykonanych ze stali X10CrNi18-8).

Obróbka cieplno-mechaniczna przebiega według następującego algorytmu: półfabrykat jest umieszczany w piecu wielosekcyjnym na podporach, czyli przymach z wbudowanymi w nich miernikami pneumatycznymi i nagrzewany do średniej, wcześniej określonej temperatury. Temperatura jest wyrównywana po

długości części i jest przykładana osiowa siła rozciągająca wywołująca poprzeczne odkształcenie plastyczne. Jednocześnie jest kontrolowany, przy pomocy mierników pneumatycznych, bieżący wymiar – zmniejszenie średnicy półfabrykatu w strefach lokalnego nagrzewania równych długości elementów grzewczych. Usunięcie nierównomiernych zmian – zmniejszenie średnicy półfabrykatu wzdłuż elementu – jest realizowane w oparciu o sterownię w określonym zakresie temperaturą.

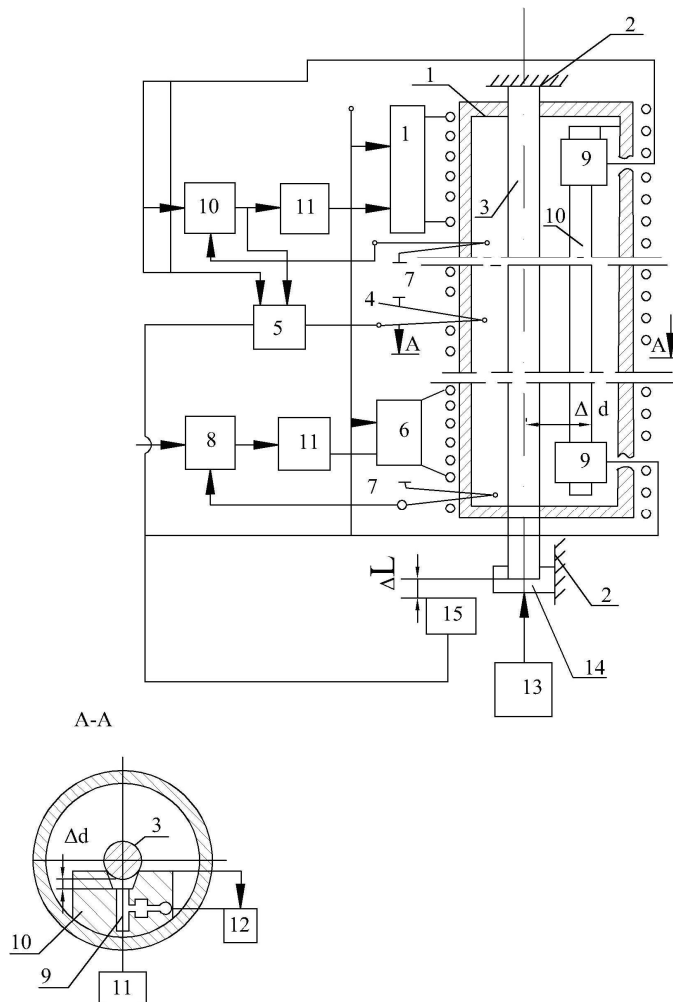
Po uzyskaniu jednakowych lokalnych średnic, ich zmniejszeniu na całej długości półfabrykatu w granicach określonego odkształcenia osiowego, odkształcenie osiowe nie jest dalej realizowane. Półfabrykat w trakcie realizacji procesu technologicznego jest na sztywno ustalony względem urządzenia. Kontrolowana jest również stabilność temperatury wzdłuż półfabrykatu. Piec jest przełączany w tryb stygnięcia z określoną prędkością.

4.2. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej materiałów umacniających się

Układ automatycznego kształtowania wymaganych parametrów technologicznych części osiowosymetrycznych o małej sztywności przy obróbce cieplno – mechanicznej zawiera dwa wzajemnie powiązane obwody: pierwszy – temperaturowy, drugi – obciążeniowy.

W skład pierwszego obwodu sterowania wchodzi poziomy wielosekcyjny piec elektryczny 1 umiejscowiony w urządzeniu 2 (rys. 4.2, urządzenie pokazano umownie). Półfabrykat 3 jest umieszczany w piecu 1 i mocowany na sztywno w urządzeniu 2. Piec elektryczny 1 zawiera autonomiczne, identyczne kanały nagrzewania. Długość sekcji jest określana parametrami geometrycznymi, fizyko-mechanicznymi oraz własnościami materiału półfabrykatu i nie powinna być większa niż $L / d < 8$ (stosunek długości półfabrykatu do jego średnicy). Początkowo operator włącza obwód pierwszy regulacji temperatury, przy tym temperatura w piecu 1 jest kontrolowana przy pomocy termopary, której sygnał wyjściowy jest wejściem rejestratora 5. Wartość liczbowa temperatury średniej i czas wygrzewania w tej temperaturze po odkształceniu plastycznym wynika z właściwości fizyko-mechanicznych materiału półfabrykatu. Reżim temperaturowy nagrzewania – chłodzenia jest określany zgodnie z technologią obróbki: odpuszczanie, normalizacja, itd. Następnie do pracy są włączane wszystkie sekcje nagrzewania – jednocześnie lub według określonej zasady regulacji (wszystkie sekcje są wykonane w sposób identyczny i na rys. 4.2 jednakowo oznaczone). Zasadę pracy kanału nagrzewania temperaturowego pieca przedstawiono na przykładzie kanału regulowania jednej sekcji. Operator analizując stan pracy wszystkich sekcji pieca włącza, zgodnie z algorytmem przebiegu obróbki cieplno-mechanicznej, elementy grzewcze 6, zwiększa lub zmniejsza ich zasilanie. Odchylenie od temperatury średniej

wzdłuż półfabrykatu począwszy od jego środka, odpowiada przebiegowi procesu ciepłno-mechanicznego. Przy nagrzewaniu lub chłodzeniu temperatura w środku półfabrykatu zawsze jest większa niż na jego skraju i zmniejsza się monotonicznie od środka.



Rys. 4.2. Urządzenie do obróbki ciepłno-mechanicznej materiałów umacniających się

Aby było możliwe wyrównywanie wzdłuż półfabrykatu temperatury w każdej sekcji umieszczono termoparę 7 umożliwiającą kontrolowanie lokalnej strefy nagrzewania, której wyjście jest podłączone do drugiego wejścia wzmacniacza różnicowego 10. Powoduje to powstanie sprzężenia zwrotnego w kanale sterowania nagrzewaniem elementu grzewczego 6 i umożliwia uzyskanie wysokiej dokładności podtrzymywania temperatury nagrzewania,

wygrzewania oraz ochładzania. Uzyskanie wymaganej średniej temperatury nagrzewania pieca 1 wymaga podłączenia przez operatora do kanałów grzewczych bezkontaktowego miernika pneumatycznego przemieszczeń liniowych 9, przy tym tworzone jest drugie sprzężenie zwrotne w kanałach sterowania nagrzewaniem w celu zmniejszenia średnic półfabrykatu 3. Liczba mierników pneumatycznych 9 jest określana liczbą elementów grzewczych 6. Miernik pneumatyczny 9 jest wmontowany w podporę – pryzmę i spełnia rolę bazy pomiarowej oraz przewodnicy przy załadunku półfabrykatu. Długość pryzmy jest określana sumaryczną długością elementów grzewczych 6. Podpora – pryzma 10 jest umieszczana wewnątrz pieca 1 i zawiera w swoim korpusie ogólną magistralę 11 zasilania gorącym powietrzem podawanym pod określonym ciśnieniem przez pompę 12 oraz mierniki pneumatyczne 9. W zależności od zmiany luzu Δd (między czołem bezkontaktowego miernika pneumatycznego 9 i zewnętrzną powierzchnią części 3) zmianie ulega wydatek powietrza w kanale miernika pneumatycznego 9. Wraz ze zmianą luzu liniowo zmienia się wydatek powietrza. Zmiana wydatku powietrza jest kontrolowana przez blok wzmacniania 13, który jest włączony w sprzężenie zwrotne kanału sterowania elementu grzewczego 6, co umożliwia sprawdzanie przyrostu średnicy na kontrolowanym odcinku. Kontrola zmiany wartości liczbowych zmniejszenia średnic półfabrykatu i kanałka, przy siłowym osiowym obciążeniu, jest realizowana przy pomocy rejestratora 5. W oparciu o analizę stanu półfabrykatu i parametrów pieca operator steruje wszystkimi kanałami regulowania elementów grzewczych. Odlączy nagrzewanie w przypadku zmniejszenia średnicy kontrolowanego odcinka i podtrzymuje temperaturę nagrzewania tych odcinków, których odkształcenie plastyczne materiału nie osiągnęło wymaganej głębokości (do czasu gdy średnice wszystkich kontrolowanych odcinków ulegną zmniejszeniu do jednakowej wartości), a zatem odlączy obwód siłowego osiowego odkształcania. Odlączenie elementu grzewczego 6 obniża temperaturę nagrzewania kontrolowanego odcinka półfabrykatu, co prowadzi do zwiększenia charakterystyk fizyko-mechanicznych i wytrzymałościowych materiałów, takich jak: moduł sprężystości podłużnej, granica plastyczności oraz zmniejszenia prędkości dyslokacji. Przy takich samych zewnętrznych oddziaływaniach siłowych odkształcenie plastyczne ochładzającego się odcinka jest mniejsze, a odcinków o podwyższonej temperaturze nagrzewania większe, to znaczy, nagrzewając i chłodząc, z określoną prędkością, odcinki półfabrykatu przy stałym obciążeniu osiowym uzyskuje się równomierne odkształcenie plastyczne w całej objętości półfabrykatu, a więc w półfabrykacie powstają równomierne osiowe naprężenia szcztkowe.

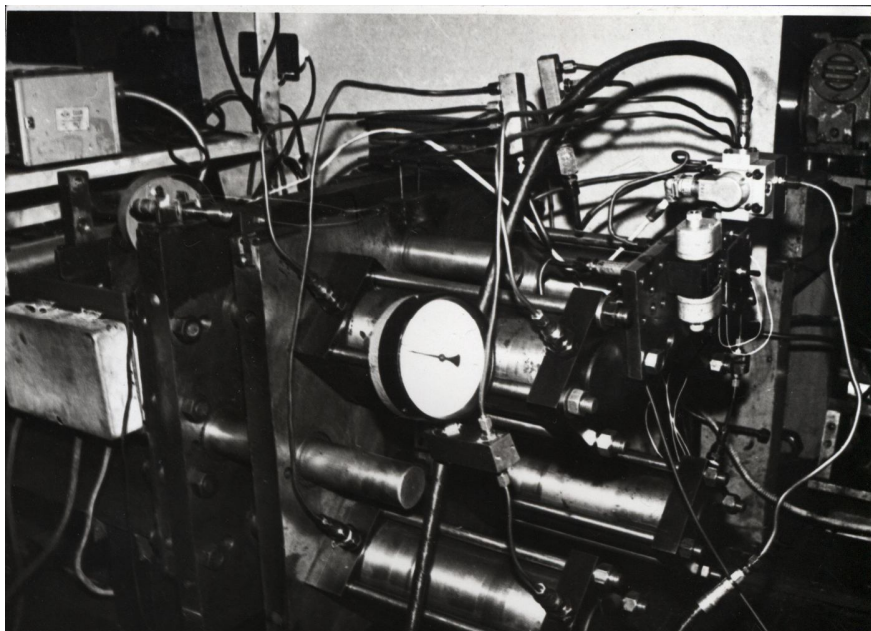
Obwód sterowania odkształcaniem osiowym pracuje w następujący sposób. Po nagrzeniu pieca do zadanej temperatury średniej oraz odpowiednim wygrzewaniu, zgodnie z procesem technologicznym, operator włącza kanał regulacji osiowego obciążenia. Przy włączeniu napędu siłowego obciążenia

osiowego 13 miernik pneumatyczny 9 generuje sygnał roboczy o wystąpieniu odkształcenia plastycznego. Sygnał z przetwornika pneumatycznego 9 jest analizowany, przy uwzględnieniu parametrów geometrycznych półfabrykatu, według względnej prędkości odkształcenia plastycznego. Wielkość osiowego odkształcenia plastycznego półfabrykatu względem urządzenia 2 jest kontrolowana przy pomocy miernika liniowych przemieszczeń osiowych 15, który naszytywno jest przymocowany do urządzenia 2. Osiowe odkształcenie plastyczne Δl , przekształcone w sygnał elektryczny w mierniku 15, postępuje na rejestrator 5. Przy osiągnięciu zadanej wielkości odkształcenia plastycznego operator odłącza napęd siłowy 13. Ostateczna wielkość osiowego odkształcenia plastycznego półfabrykatu jest określana według informacji a priori i zależy od właściwości fizyko-mechanicznych materiału półfabrykatu 3.

Przy odłączeniu obwodu odkształcenia osiowego napęd siłowy 13 przechodzi w tryb hamowania, zamykając mechanizm zacisku 14 na urządzeniu 2. W tym trybie jest uzyskiwana równa temperatura nagrzewania fabrykatu po całej jego długości w ciągu zadanego czasu wygrzewania, co umożliwia osiową dyslokację w materiale oraz orientację ziaren w kierunku pola siłowego. Po zakończeniu wygrzewania operator, zgodnie z algorytmem przebiegu obróbki cieplno-mechanicznej, formułuje sygnał regulujący prędkość ochładzania źródła zasilania 6. Równolegle do obniżania temperatury operator regulując źródła nagrzewania stabilizuje temperaturę wzdłuż półfabrykatu, co umożliwia ukształtowanie naprężeń szczątkowych równomiernie rozłożonych w całym półfabrykacie. Po osiągnięciu granicy zadanej temperatury minimalnej układ regulacji wyłącza się, półfabrykat jest zwalniany i wyjmowany z pieca.

W procesie obróbki cieplno-mechanicznej, przy zastosowaniu układu sterowania według proponowanej metody, w półfabrykacie są kształtowane wymagane właściwości fizyko-mechaniczne oraz równomiernie naprężony stan materiału w przekroju i wzdłuż fabrykatu. Jednocześnie proces odkształcenia plastycznego zachodzący w trakcie obróbki cieplnej umożliwia usunięcie paczenia powstałego w półfabrykacie w trakcie poprzednich operacji, to znaczy, usuwana jest dziedziczność technologiczną.

Fotografia stanowiska, na której jest widoczny napęd hydrauliczny odkształcenia osiowego półfabrykatu jest przedstawiona na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Widok ogólny stanowiska do obróbki cieplno-mechanicznej materiałów umacniających się

4.3. Układ sterowania automatycznego odkształceniami w warunkach przemiany fazowej materiału półfabrykatu

W pracach [24, 83] pokazano, że przy odkształceniu metali w warunkach rozwoju przekształcenia fazowego ma miejsce wyraźne zwiększenie plastyczności. Efekt ten jest obserwowany zarówno przy przemianach dyfuzyjnych jak i martenzytycznych. Fakty te pokazują, że moment przemiany fazowej niezależnie od jego mechanizmu sprzyja rozwojowi procesów płynięcia plastycznego. Efekt nadplastyczności przy przemianie fazowej zależy od wytrzymałości faz uczestniczących w przemianie fazowej [56]. Nadplastyczność jest spowodowana naprężeniami wewnętrznymi, powstającymi w wyniku różnicy objętości względnych faz ulegających przekształceniu oraz powstających. Jak pokazano w pracy [56] między nadplastycznym płynięciem i naprężeniami istnieje liniowy związek. W oparciu o rozdz. 2 i analizę literatury zaproponowano metodologię wykorzystania efektu nadplastyczności do usuwania dziedziczności technologicznej oraz obniżenia poziomu naprężeń szczątkowych powstałych przy prostowaniu półfabrykatu na zimno. Specyfika proponowanego podejścia polega na tym, że przy obróbce cieplno-mechanicznej jest przykładane naprężenie statyczne, którego wielkość ulega zmniejszeniu w funkcji wydłużenia temperaturowego, przy tym przed osiągnięciem zadanej

temperatury stosunek przyłożonych naprężeń rozciągania do naprężenia odpowiadającego granicy plastyczności pozostawał stały do chwili nastąpienia przemian fazowych. Oprócz tego, w półfabrykacie są dodatkowo wzbudzane drgania zginające o częstotliwości własnej. Rejestrując oraz kontrolując zmiany i nieregularność częstości oraz amplitudy, a także aktywną składową energii generatora samowzbudnych drgań zginających w funkcji minimalnej wartości energetycznej, można kształtować sygnały sterowania odpowiadające początkowi przekształceń fazowych oraz dopuszczalnej wartości σ_{02} z uwzględnieniem oddziaływania czynników siłowo-temperaturowych.

Jednocześnie jest ustalana nowa wartość częstotliwości i amplitudy drgań zginających oraz kształtowane kryterium oceny K_f – uzyskania określonych własności fizyko-mechanicznych materiału względem stosunku częstości własnych półfabrykatu w trybie nagrzewania f_n do częstości drgań własnych przy odpuszczaniu f_o , $K_f = f_n / f_o \leq 1$ – przy czym im jest mniejszy stosunek częstości tym są lepsze właściwości fizyko-mechaniczne półfabrykatu. Kontrola aktywna stanu materiału w procesie nagrzewania i odkształcenia umożliwia sterowanie naprężeniami szcztątkowymi w trakcie całego czasu obróbki, niezależnie od marki stali i parametrów geometrycznych półfabrykatu.

Istotę metodologii przedstawiono na schemacie – rysunek 4.4, gdzie pokazano specyfikę konstrukcyjną obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności [38].

Sterowanie procesem obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności jest realizowane w sposób następujący. W piecu elektrycznym 1 jest umieszczany półfabrykat 2 względem urządzenia 3, przy czym jeden koniec półfabrykatu jest mocowany do płyty 4 mechanizmu obciążenia quasi-statycznego. Płyta 4 może być przemieszczana do góry po prowadnicach 6, w wyniku działania obciążonych sprężyn 5. Osiowa siła rozciągająca jest określana z warunku:

$$F = K \cdot X ,$$

gdzie: K – współczynnik sztywności sprężyn,

X – przemieszczenie sprężyn.

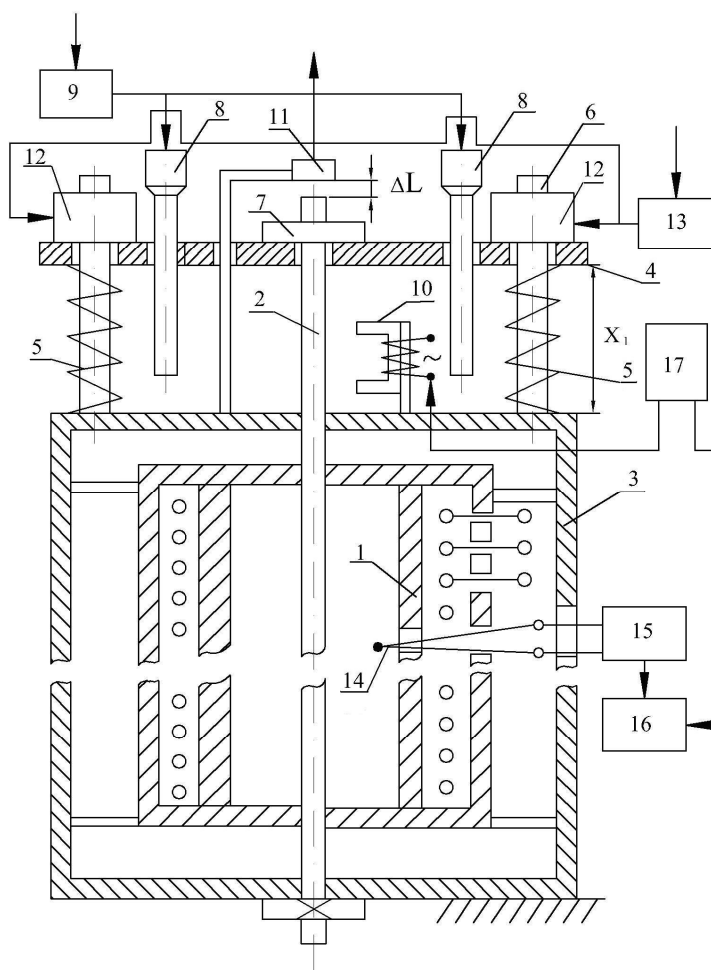
Sprężyny mogą pracować równolegle i szeregowo. Ustalenie na sztywno półfabrykatu względem płyty 4 jest realizowane przez zderzak oporowy 7. Przy stygnięciu półfabrykat przemieszcza się do dołu, a jego przesuw jest regulowany elektromechanicznym ogranicznikiem przemieszczenia półfabrykatu 8, sterowanym od pierwszego przekaźnika regulacyjnego sterowania 9. Na urządzeniu 3 jest mocowany vibrator elektromagnetyczny 10, powodujący drgania półfabrykatu 2 na pierwszej częstotliwości rezonansowej w trybie odpuszczania. Wydłużenie półfabrykatu 2 w procesie nagrzewania jest kontrolowane czujnikiem 11 przemieszczeń liniowych, a jego sygnał przekształcony na elektryczny jest przesyłany do kanału diagnostyki.

W początkowym położeniu po zamocowaniu półfabrykatu 2 w dolnej części urządzenia, sprężyny 5 są ściskane w wyniku działania napędu elektromechanicznego 12 od drugiego przekaźnika regulacyjnego 13, przy tym półfabrykat 2 ma możliwość swobodnego przejścia przez otwór centralny płyty 4.

Zatem półfabrykat 2 jest ustalany względem płyty 4 przez zderzak oporowy 7. Następnie są zwalniane wstępnie ściśnięte sprężyny 5, w wyniku sterowania mechanizmem naciągu 12 od napędu elektrycznego 13, przy tym półfabrykat 2 jest obciążany siłą osiową $F_r = K_1 \cdot X_1$, gdzie: K_1 – współczynnik sztywności sprężyn, X_1 – ściśnięcie sprężyn pod działaniem obciążenia roboczego, w danym przypadku maksymalnego, które jest określane w oparciu o parametry geometryczne i właściwości fizyko-mechaniczne półfabrykatu. W położeniu początkowym półfabrykat 2 jest obciążony osiową siłą rozciągającą F_r od sprężyn 5 (liczba sprężyn jest określana w oparciu o wymaganą siłę osiową) przez płytę 4. Włączany jest piec elektryczny 1 i kontrolowany przyrost temperatury nagrzewania pieca przy pomocy przetwornika rejestracji temperatury 14 podłączonego do wejścia wzmacniacza potencjometrycznego 15. Sygnał wyjściowy wzmacniacza 15 proporcjonalny do temperatury pieca jest rejestrowany za pomocą rejestratora wielowejściowego 16. Jednocześnie jest rejestrowana wielkość wydłużenia temperaturowego półfabrykatu 2 czujnikiem 11 przemieszczeń liniowych przetwornika rejestracji wydłużeń temperaturowych, którego wyjście również jest podłączone do rejestratora wielowejściowego 16.

W celu rejestracji przyrostu temperatury i wydłużeń temperaturowych półfabrykatu – parametrów niezbędnych do wstępnego nastawienia i oceny dynamiki zmiany temperatury pieca i wydłużenia półfabrykatu do wielowejściowego rejestratora zamontowano przyrząd rejestrujący.

Przy nagrzewaniu, odpuszczaniu przy własnej częstotliwości rezonansowej, półfabrykat 2 jest poddawany działaniu drgań zginających z uwzględnieniem masy sprowadzonej mechanizmu obciążenia statycznego i zastosowaniu wibratora elektromagnetycznego 19, umiejscowionego na górnej części urządzenia 3. Pobudzenie półfabrykatu jest realizowane na odcinku poza strefą nagrzewania. Wibrator elektromagnetyczny jest podłączony do wyjścia generatora samowzbudnego 17. W celu uzyskania możliwości oceny odbieranej aktywnej energii składowej od generatora wibrator elektromagnetyczny 10 jest podłączony do jednej z gałęzi mostka do pomiaru impedancji.



Rys. 4.4. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej materiałów z przemianami fazowymi

W wyniku działania czynników temperaturowo-siłowych zwiększeniu ulega wydłużenie liniowe półfabrykatu 2 prowadzące do zmiany (zwiększenia) wielkości przemieszczenia X_1 sprężyn 5, czemu towarzyszy zmniejszenie osiowych sił rozciągających działających na półfabrykat. Wielkość naprężenia statycznego półfabrykatu 2 jest określana w taki sposób, aby począwszy od określonej temperatury, stosunek przyłożonych naprężeń rozciągania σ_r do granicy plastyczności σ_{02} pozostawał stały do momentu wystąpienia przekształceń fazowych (pojawienia się nadplastyczności). Taka stabilizacja jest uzyskiwana automatycznie w wyniku zmniejszenia sił osiowego obciążenia statycznego pod działaniem zmieniającej się wielkości przemieszczenia sprężyny i zmiany naprężenia pod wpływem oddziaływania temperatury. Przy stałej wartości sto-

sunku σ_r / σ_{02} ; gdzie: σ_r – normalne naprężenie robocze wytwarzane sprężynami, σ_{02} – granica plastyczności, pod warunkiem, że nieodwracalne odkształcenia szczytkowe są równe 0,2%; mimo zwiększenia długości półfabrykatu częstość własna podukładu „wał-podpory” pozostaje, w wyniku stabilizacji sztywności tego podukładu, niezmienna. Przy nie spełnieniu tego warunku zmiana ulega sztywność podukładu „wał-podpory”, a więc zmienia się (zmniejsza) jego własna częstotliwość rezonansowa. Zmiany częstości w takim przypadku niosą informację o naruszeniu stosunku σ_r / σ_{02} , to znaczy, o nie zachowaniu zadanych temperaturowo-mechanicznych czynników oddziaływania. Rejestracja zmiany częstości, amplitudy i aktywnej składowej mocy oddziaływania dynamicznego jest realizowana za pomocą dwóch wzajemnie powiązanych kanałów.

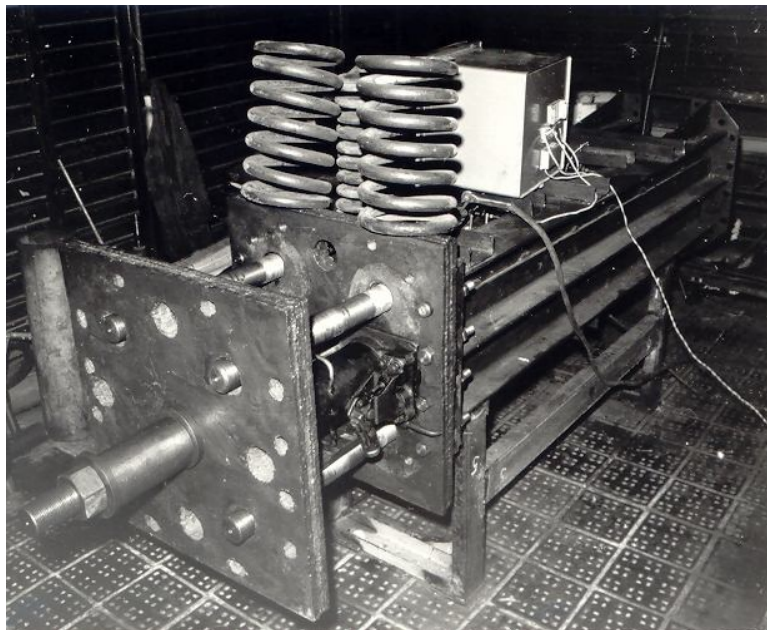
Wartość początkowa własnej częstotliwości rezonansowej f_p podukładu „wał – podpory” odpowiada nagrzewaniu, a zmiana częstotliwości f_0 odpowiada odpuszczaniu i jest rejestrowana przez kanał diagnostyczny. Kształtowanie sygnału regulującego i realizacja kryterium oceny zadanych właściwości materiału obrabianego według stosunku częstotliwości własnych półfabrykatu $K_f = f_p / f_0$ jest realizowana przez drugi kanał diagnostyczny w sposób następujący. Naprężenie wyjściowe generatora samowzbudnego 17 o częstotliwości f_p jest zamieniane w trybie nagrzewania, w bloku przekształcania częstotliwości drgań na sygnał analogowy, w naprężenie analogowe, które jest podawane na drugi kanał rejestratora 16. W momencie nastąpienia przekształceń fazowych operator rejestruje wielkość f_0 w trybie odpuszczania. Przy czym jako częstotliwość f_0 jest przyjmowana częstotliwość odpowiadająca sztywności podukładu „wał – podpory” w stanie sprężysto-naprężonym oraz temperaturze zakończenia odpuszczania. Znając częstotliwość f_p i f_0 , można ocenić ich stosunek jako kryterium $K_f = f_p / f_0$, przy czym, im mniejsza jest wielkość tego stosunku, tym lepsze są właściwości fizyko-mechaniczne półfabrykatu

Występowanie dwóch obwodów kształtowania czynników diagnostycznych i regulowania parametrów obróbki cieplno-mechanicznej, a także stabilizacji mechanicznej stosunku σ_p / σ_{02} przy automatycznym napędzie mechanizmu ustalania półfabrykatu, umożliwia pełną automatyzację procesu technologicznego i otrzymanie części o zadanej jakości. Obróbka cieplno-mechaniczna umożliwia uzyskanie odpowiednich właściwości fizyko-mechanicznych, równomiernych naprężeń wzdłuż półfabrykatu oraz realizację procesu prostowania w granicach naddatku na obróbkę, jak również wyeliminowanie dziedziczności technologicznej półfabrykatu.

Przy obróbce cieplno-mechanicznej nowych materiałów konstrukcyjnych, przy braku wyraźnie wyodrębnionej strefy nadciekłości regulowanie temperaturą nagrzewania, przy maksymalnej wielkości odpuszczania, jest realizowane w oparciu o analizę zapisanych danych o proporcjonalności wydłużenia tempe-

raturowego półfabrykatu, uzyskanych z czujników 11 przemieszczeń liniowych, a także kanału utworzonego przez blok 16.

Fotografia stanowiska do obróbki cieplno-mechanicznej materiałów, w których występują przemieszczenia fazowe jest przedstawiona na rysunku 4.5.

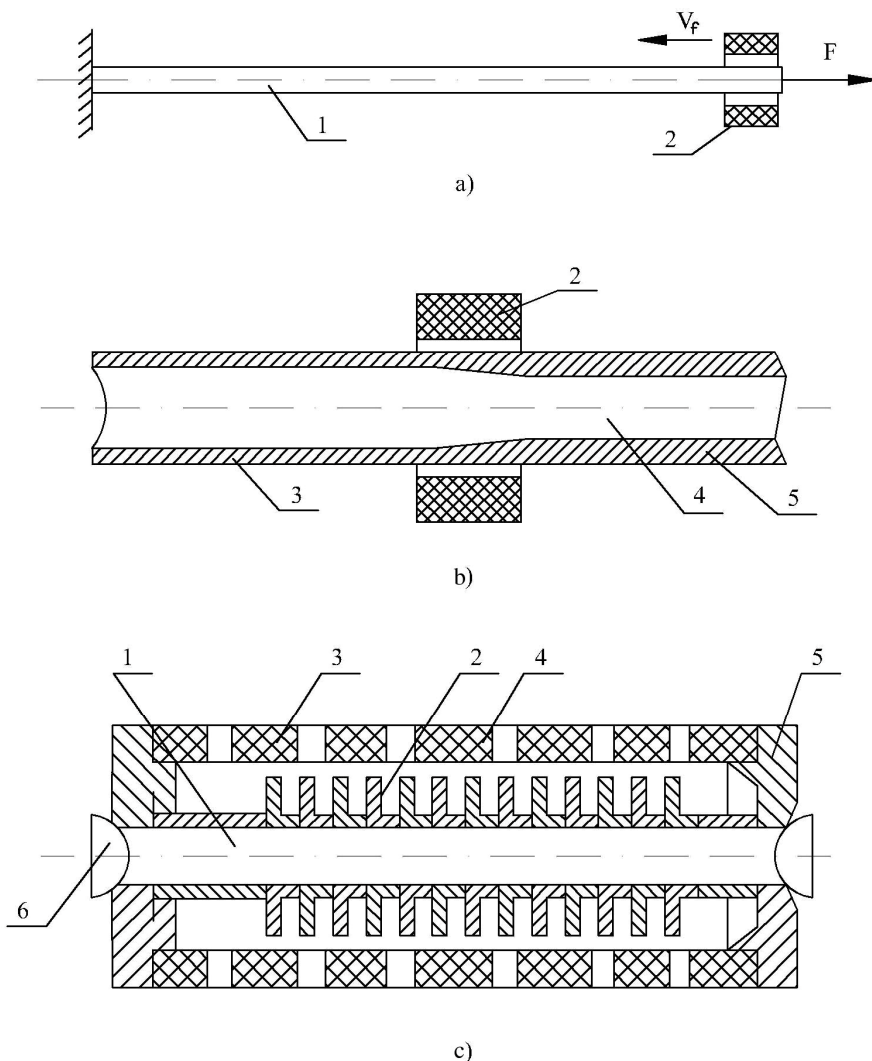


Rys. 4.5. Widok zewnętrzny stanowiska laboratoryjnego do obróbki cieplno-mechanicznej materiałów z przemieszczeniami fazowymi

4.4. Metody technologiczne odkształcania osiowego przy powierzchniowym nagrzewaniu i hartowaniu

Proces technologiczny obróbki wałów o małej sztywności powinien zawierać operację hartowania, która kształtuje dziedziczność technologiczną kształtu wzdłużnego. Przy opracowywaniu nowych sposobów hartowania nie stosowano systemów sterowania automatycznego, a ta operacja technologiczna w istocie odnosi się do obróbki cieplno-mechanicznej. Należy wyodrębnić operacje technologiczne związane z nagrzewaniem warstwy powierzchniowej w celu nadania jej regularnego stanu naprężonego. Opracowana metoda obróbki jest przeznaczona do części osiowosymetrycznych o małej sztywności o niewielkiej średnicy $d \leq 10$ mm i stosunku $L / d \geq 50$ – jej istotę przedstawiono w pracach [26, 32]. Przed ostateczną obróbką mechaniczną do części jest przykładane rozciągające obciążenie osiowe o wielkości umożliwiającej powstanie normalnych naprężeń rozciągających w części równych granicy plastyczności

materiału części przy temperaturze odpuszczania. Powierzchnia części jest nagrzewana do temperatury odpuszczania na głębokość większą od głębokości zalegania naprężeń szczątkowych spowodowanych obróbką mechaniczną lecz mniejszą od potrójnej głębokości ich zalegania. Część jest wygrzewana przy danej temperaturze do osiągnięcia przez nagrzewaną warstwę dolnej granicy temperatury odpuszczania, a po ostygnięciu warstwy powierzchniowej na powietrzu do temperatury otoczenia siła rozciągająca jest zdejmowana.



Rys. 4.6. Schemat osiowego plastycznego odkształcenia

Strona fizyczna procesu jest przedstawiona na rys. 4.6 a i b. Do części 1 jest przykładana siła rozciągająca F . Element grzewczy 2 przemieszcza się z prawa

na lewo z prędkością v_f , a powierzchniowy 3, do chwili przejścia elementu grzewczego, jest w stanie naprężonym charakteryzującym się sumaryczną wielkością naprężeń szcztątkowych po obróbce mechanicznej oraz normalnych naprężeń rozciągających równych granicy plastyczności materiału przy temperaturze odpuszczania (σ_T odpuszczania), powstałych w wyniku działania siły F . W rdzeniu 4 są normalne naprężenia rozciągania, równe granicy plastyczności materiału przy temperaturze odpuszczania, powstałe w wyniku działania siły F . Po przejściu elementu grzewczego 2 w warstwie powierzchniowej 5 jest stan naprężony σ_{02} , charakteryzujący się minimalnymi naprężeniami szcztątkowymi znacznie mniejszymi od normalnych naprężeń rozciągania występujących w rdzeniu 4 z powodu „płynięcia” nagrzanego materiału w warstwie powierzchniowej. Prędkość v_f elementu grzewczego 2 powinna być taka, aby dolna granica nagrzewanej warstwy osiągnęła temperaturę odpuszczania. Stan naprężony 4 po przejściu elementu grzewczego nie ulega zmianie. Przy ochłodzeniu elementu na powietrzu i zdjęciu siły rozciągającej F , w rdzeniu części występuje naprężony stan ściskania, a w warstwie powierzchniowej stan naprężony przeciwdziałający ściskaniu rdzenia. Wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych pokazały, że takie technologiczne podejście można zastosować do małych średnic, ale sama istota uzyskania regularnych naprężeń szcztątkowych stabilizujących kształt może być wykorzystana i w innych przypadkach.

Przeprowadzone badania eksperymentalne i teoretyczne doprowadziły do opracowania rozwiązania technologicznego [28], którego istota polega na tym, że w czasie nagrzewania ma miejsce, w wyniku różnicy współczynników rozszerzenia liniowego urządzenia i półfabrykatu, osiowe odkształcenie plastyczne. Przy stygnięciu do określonej temperatury półfabrykat, w wyniku różnej prędkości odprowadzania ciepła przez urządzenie i część, jest naciągnięty. Urządzenie pracuje w następujący sposób (rys. 4.6 c).

Na półfabrykacie są umieszczone radiatory 2 z rowkami promieniowymi. Liczba radiatorów 2 i ich powierzchnia jest określana w oparciu o niezbędną moc odprowadzania ciepła. Wielkość powierzchni radiatorów jest regulowana liczbą rowków, przy czym komplet radiatorów o różnych powierzchniach odprowadzania ciepła umożliwia równomierne stygnięcie części na całej jej długości. Część przy tym może mieć złożony kształt w przekroju wzdłużnym i poprzecznym. Na pozostałe miejsce na półfabrykacie, przy uwzględnieniu odprowadzanego ciepła, są nakładane z obu stron tulejki redukcyjne, jedna z ich powinna się oprzeć o czoło radiatora 2. Półfabrykat razem z radiatorami 2 i tulejkami redukcyjnymi jest umieszczany w wielowarstwowym urządzeniu sekcyjnym 3 z napełniaczem 4, który w zależności od niezbędnej prędkości chłodzenia urządzenia może mieć różny współczynnik przewodności cieplnej (na przykład piasek rzeczny z drobnymi wiórkami żeliwnymi) oraz ustalany odnośnie czoł urządzenia 3 pokrywam – oporami 5. Zatem w otworach

pokryw – opór 5 są umieszczane kuliste łożyska oporowe 6, które są nakręcane na końce półfabrykatu 1 do czasu, aż kuliste łożyska oporowe 6 wejdą w kontakt z pokrywami – oporami 5, tworząc tym samym zamknięty obwód siłowy półfabrykatu z kulistymi łożyskami oporowymi – oporami – urządzeniem.

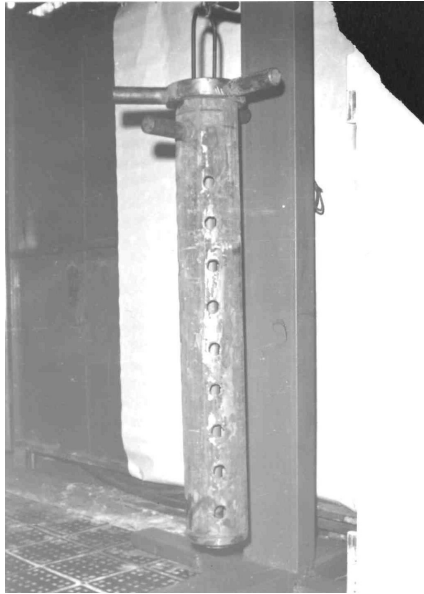
Otwór w pokrywie – oporze 5 jest wykonywany z luzem tak, aby skrzywienie półfabrykatu mogło być w granicach do 3° , co umożliwi skompensowanie niedokładności technologicznej wykonania stanowiska. Zmontowana konstrukcja jest umieszczana w piecu szybowym i nagrzewana zgodnie z technologią obróbki cieplnej do temperatury hartowania (lub odpuszczania). Przy nagrzewaniu urządzenie wydłuża się bardziej niż półfabrykat, ponieważ jego współczynnik rozszerzalności liniowej jest większy od współczynnika rozszerzalności liniowej półfabrykatu. Dobierając wartości liczbowe dodatniej różnicy współczynników rozszerzalności liniowej urządzenia i półfabrykatu otrzymuje się wielkość odkształcenia plastycznego półfabrykatu, przekraczającego granicę proporcjonalności, to znaczy granicę prawa Hooke'a. Przy konieczności zwiększenia osiowego odkształcenia plastycznego półfabrykatu, na przykład przy prostowaniu należy zwiększyć długość urządzenia, a więc i długość części cylindrycznej kulistego łożyska oporowego, pozostawiając niezmienioną długość półfabrykatu. Ogólny widok urządzenia do osiowego odkształcenia przy hartowaniu pokazano na rysunku 4.7.

Wykres zależności $T^\circ = f(\varepsilon)$ przedstawiono na rys. 4.8, gdzie: urządzenie – krzywa 1, wał – krzywa 2.

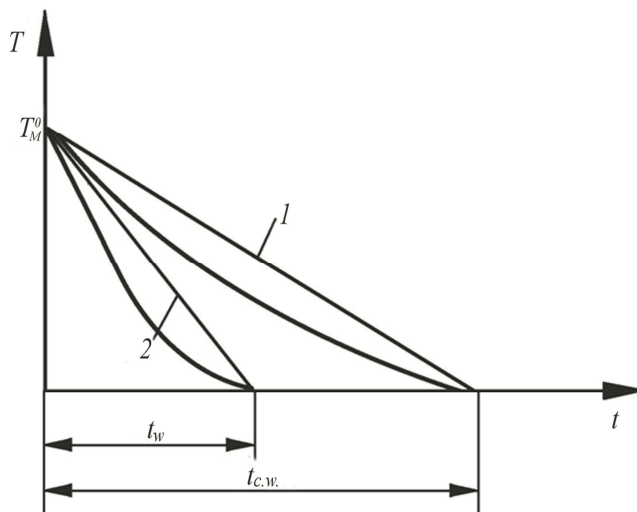
Opracowany sposób obróbki cieplno-mechanicznej umożliwia minimalizację wielkości ugięcia wyrobu i stabilizację poziomu naprężeń szczątkowych po jego długości, co zwiększa dokładność eksploatacyjną, na przykład długich wałów o małej sztywności, i jakość wyrobów gotowych.

Osiowe odkształcenie plastyczne za granicą proporcjonalności przy nagrzewaniu elementu usuwa dziedziczność technologiczną od poprzedniej operacji i jednocześnie powoduje prostowanie półfabrykatu. Jednak nierównomierne stygnięcie w stanie swobodnym jest przyczyną naprężeń szczątkowych. W celu wykluczenia tego ujemnego zjawiska technologicznego urządzenie 4 musi stygnąć wolniej od półfabrykatu 1 (półfabrykat powinien stygnąć z minimum pięciokrotnie większą prędkością niż urządzenie) w zależności od chłodzenia (olej, woda, powietrze).

Zmontowane urządzenie z półfabrykatem jest przedstawione na rysunku 4.9. Proces (operacje technologiczne) przebiega następująco. Półfabrykat w celu uzyskania odpowiedniego kształtu roboczego jest obrabiany toczeniem przy zastosowaniu podtrzymek [43].

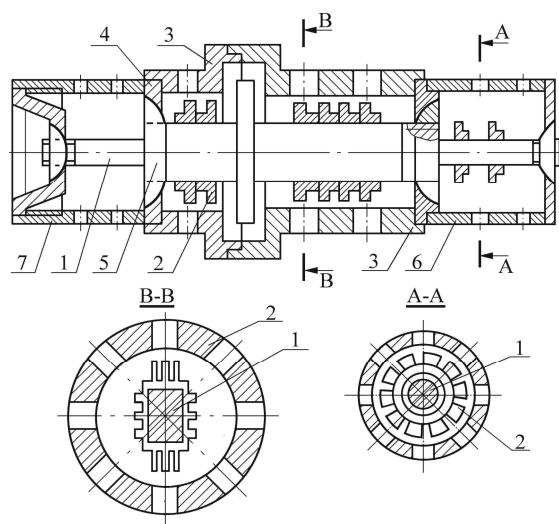


Rys. 4.7. Widok ogólny urządzenia do odkształcania osiowego przy hartowaniu



Wykres 4.1. Wykres zależności temperatury od czasu chłodzenia

Na końcu każdego stopnia jest nacinany gwint, przy czym głębokość nacięcia gwintu (jego średnica wewnętrzna) nie powinna być większa od nadatku na obróbkę wykańczającą (toczenie lub szlifowanie).



Rys. 4.8. Urządzenie z ustawionym w nim półfabrykatem

Na stopień centralny, o maksymalnym przekroju poprzecznym półfabrykatu 1, są zakładane i mocowane, w odległościach równych skokowi obliczeniowemu, radiatory 2 z rowkami promieniowymi. Liczba radiatorów 2 oraz ich powierzchnia użyteczna jest określana według powierzchni niezbędnej do odprowadzenia ciepła. Wielkość powierzchni radiatorów jest regulowana liczbą rowków, proporcjonalnie do powierzchni roboczej półfabrykatu. Zestaw radiatorów, o różnych powierzchniach odprowadzania ciepła, umożliwia równomierne stygnięcie półfabrykatu 1.

Półfabrykat może mieć kształt złożony w przekrojach wzdłużnym i poprzecznym (rys. 4. 8). Półfabrykat 1 z radiatorami 2 jest ustawiany w zmontowanym cylindrze wielowarstwowym 3 z otworami wzdłuż jego długości i średnicy. Każda warstwa cylindra 3 jest wypełniana wypełniaczem, który w zależności od niezbędnej prędkości chłodzenia cylindra może mieć różny współczynnik przewodności cieplnej (np. wiór żeliwny, piasek rzeczny). Stopień centralny półfabrykatu 1 (o maksymalnym przekroju poprzecznym) jest ustalany względem czoł sekcji centralnej cylindra 3 pokrywami – łożyskami wzdłużnymi 4 i czopami sferycznymi 5. Nakręcane są one na końce stopnia centralnego do oparcia o pokrywę – łożyska wzdłużne 4 i tym samym powstaje zamknięty kontur siłowy: półfabrykat – czopy sferyczne – pokrywki – łożyska wzdłużne – cylinder. Jeżeli półfabrykat ma piastę o średnicy znacznie większej od średnicy maksymalnej półfabrykatu to sekcja cylindra, gdzie znajduje się piasta, jest montowana z elementów. Na lewą i prawą część półfabrykatu – na jego stopnie – są kolejno zakładane i montowane radiatory 2 (ich liczba i powierzchnia odprowadzania ciepła jest obliczana na podstawie środkowego stopnia

półfabrykatu, co umożliwia równomiernie ochładzanie wzdłużne półfabrykatu oraz w przekroju poprzecznym), sekcje 6 oraz pokrywy – łożyska wzdłużne 4 i zakręcane czopy sferyczne 5. Analogicznie jest przeprowadzany montaż pozostałych stopni półfabrykatu. W przypadku wyodrębnionych stopni półfabrykatu są określane powierzchnie przekrojów poprzecznych sekcji cylindra w taki sposób aby stosunki powierzchni przekrojów poprzecznych sekcji cylindra do odpowiednich powierzchni przekrojów poprzecznych półfabrykatu były stałe i wzajemnie równe na wszystkich stopniach półfabrykatu wału.

Umożliwia to, w trakcie nagrzewania i chłodzenia, uzyskanie stałych naprężeń przy rozciąganiu i ściskaniu półfabrykatu – powstawanie równych i stałych naprężeń szczątkowych wzdłuż półfabrykatu oraz w jego przekroju poprzecznym. Ze zmniejszeniem sztywności stopni półfabrykatu zwiększa się ich paczenie, w porównaniu z odcinkami sztywnymi półfabrykatu, w związku z tym są one powiększane. Umożliwia to wybór strzałek ugięcia i przeprowadzenie osiowego odkształcenia plastycznego. W tym celu w pokrywach – łożyskach wzdłużnych 4 lub 7 (wykonywanych w kształcie czaszy w celu regulowania wielkości odkształceń plastycznych) na ich średnicach zewnętrznych oraz w sekcjach cylindra są nacinane odpowiednio gwinty zewnętrzne i wewnętrzne. Pokrywa – łożysko wzdłużne 7 jest wkręcana w sekcję cylindra na określoną wielkość (głębokość), umożliwia to usunięcie ugięcia i uzyskanie odpowiedniej wielkości odkształcenia plastycznego danego stopnia półfabrykatu. Zmontowane urządzenie jest umieszczane w piecu szybowym i nagrzewane, zgodnie z technologią obróbki cieplnej, do temperatury hartowania lub odpuszczania, wygrzewane w tej temperaturze aż do nagrzania półfabrykatu w całej jego objętości.

Przy nagrzewaniu cylinder ulega większemu wydłużeniu niż półfabrykat – jego współczynnik rozszerzalności cieplnej jest większy od współczynnika rozszerzalności cieplnej półfabrykatu. Dobierając wartości liczbowe dodatnich różnic współczynników rozszerzalności liniowej cylindra i półfabrykatu, uzyskuje się wielkość odkształcenia plastycznego półfabrykatu przekraczającą granicę proporcjonalności, to znaczy, granicę prawa Hooke’a.

Plastyczne odkształcenie osiowe za granicami proporcjonalności (prawo Hooke’a) przy nagrzewaniu usuwa dziedziczność technologiczną od poprzednich operacji obróbki mechanicznej, jednocześnie półfabrykat jest prostowany. Nierównomierność stygnięcia w stanie swobodnym prowadzi jednak do powstawania nierównomiernych naprężeń szczątkowych. W celu likwidacji tego negatywnego zjawiska technologicznego cylinder 3 powinien stygnąć wolniej od półfabrykatu 1 (półfabrykat powinien stygnąć minimum pięciokrotnie szybciej niż cylinder), w zależności od czynnika chłodzącego: olej, woda, powietrze. W półfabrykacie obciążonym osiowo, przy stygnięciu, są kształtowane równomierne naprężenia szczątkowe wzdłużne oraz w przekroju poprzecznym, co

wyklucza paczenie gotowych wyrobów w trakcie eksploatacji. Polepszeniu ulegają również charakterystyki wytrzymałościowe półfabrykatu.

4.5. Sposoby sterowania procesem obróbki cieplno-mechanicznej części o małej sztywności

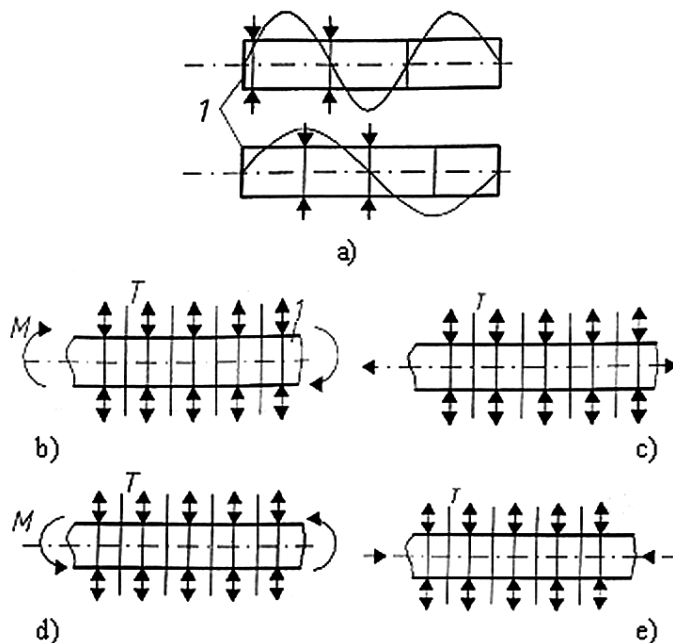
Proponowany sposób obróbki cieplno-mechanicznej umożliwia zwiększenie jakości półfabrykatów przy uzyskaniu następujących rezultatów technicznych: zwiększenie stabilności wymiarów i kształtu długich części osiowosymetrycznych o małej sztywności w wyniku usunięcia nierównomierności osiowych naprężeń szczątkowych i ukierunkowanej tekstury materiału półfabrykatu, pozostałej po operacji przygotowawczej lub operacji poprzedzających obróbkę mechaniczną; zmniejszenie siły odkształcania w wyniku wykorzystania efektu Bauschingera; usunięcie dziedziczności technologicznej w wyniku pełnej przebudowy tekstury materiału przy ściskaniu i skręcaniu półfabrykatu w wyniku ukształtowania w materiale obrabianego półfabrykatu drobno-dispersyjnej różnie ukierunkowanej tekstury, co prowadzi do bardziej pełnego jednorodnego rozkładu osiowych naprężeń szczątkowych wzdłuż części. Ponieważ przy relaksacji podstawowy wpływ na paczenie okazują osiowe naprężenia szczątkowe to określony charakter ich rozkładu powoduje zmniejszenie odkształcenia części w trakcie jej eksploatacji.

W sposobie obróbki cieplno-mechanicznej długich wałów osiowosymetrycznych o małej sztywności, w którym jest zastosowane statyczne oddziaływanie siłowe na półfabrykat w procesie pełnego cyklu obróbki cieplnej, cykl jest dzielony na podcykle – w każdym z nich statyczne oddziaływanie siłowe jest realizowane w granicach wybranego odcinka półfabrykatu początkowo w wyniku skręcania w jedną stronę danego odcinka i następnie rozciągania, a potem skręcania w drugą stronę i ściśnięcia za granicę sprężystości. Sterowanie granicą plastyczności przy statycznym oddziaływaniu siłowym jest realizowane drogą oddziaływania temperaturowego na odcinek półfabrykatu. Długość odcinka jest określana z uwzględnieniem harmonik drgań części. Jednocześnie w procesie pełnego cyklu obróbki cieplnej można ustalać miejsce położenia odcinków z odchyleniem od zadanej wielkości odkształcenia, określić te odchylenia, przy tym, odcinki o niewystarczającym odkształceniu są nagrzewane, a odcinki o odkształceniach większych – chłodzone.

Schemat kolejności realizacji obróbki cieplno-mechanicznej długich osiowosymetrycznych wałów o małej sztywności jest przedstawiony na rysunku 4.9 [123].

Półfabrykat wału 1 jest ustalany w urządzeniu (rys. 4.9a). Wybiera się odcinek półfabrykatu, który jest nagrzewany i poddawany statycznemu oddziaływaniu siłowemu początkowo w wyniku skręcania w jedną stronę

(rys. 4.9b) następnie rozciągania (rys. 4.9c), a potem skręcania w drugą stronę (rys. 4.9d) i ściskania (rys. 4.9e).



Rys. 4.9. Schemat kolejności realizacji sposobu obróbki cieplno – mechanicznej długich części osiowosymetrycznych o małej sztywności: rozmieszczenie i ustalenie półfabrykatu wału 1, nagrzewanie – a), skręcanie półfabrykatu w jedną stronę – b), rozciąganie półfabrykatu – c), skręcanie półfabrykatu w drugą stronę – d), ściśnięcie półfabrykatu – e)

W procesie statycznego oddziaływania siłowego steruje się granicą plastyczności poprzez regulowanie oddziaływania temperaturowego na odcinek półfabrykatu. Ustalane jest miejsce położenia odcinków z odchyleniem od zadanej wielkości odkształcenia. Określane są te odchylenia i jest realizowane regulacyjne oddziaływanie temperaturowe: na odcinkach o niewystarczającym odkształceniu jest realizowane nagrzewanie, natomiast na odcinkach z odkształceniem nadmiarowym – chłodzenie. Po zakończeniu obróbki danego odcinka jest wykonywana analogiczna obróbka w przypadku pozostałych odcinków.

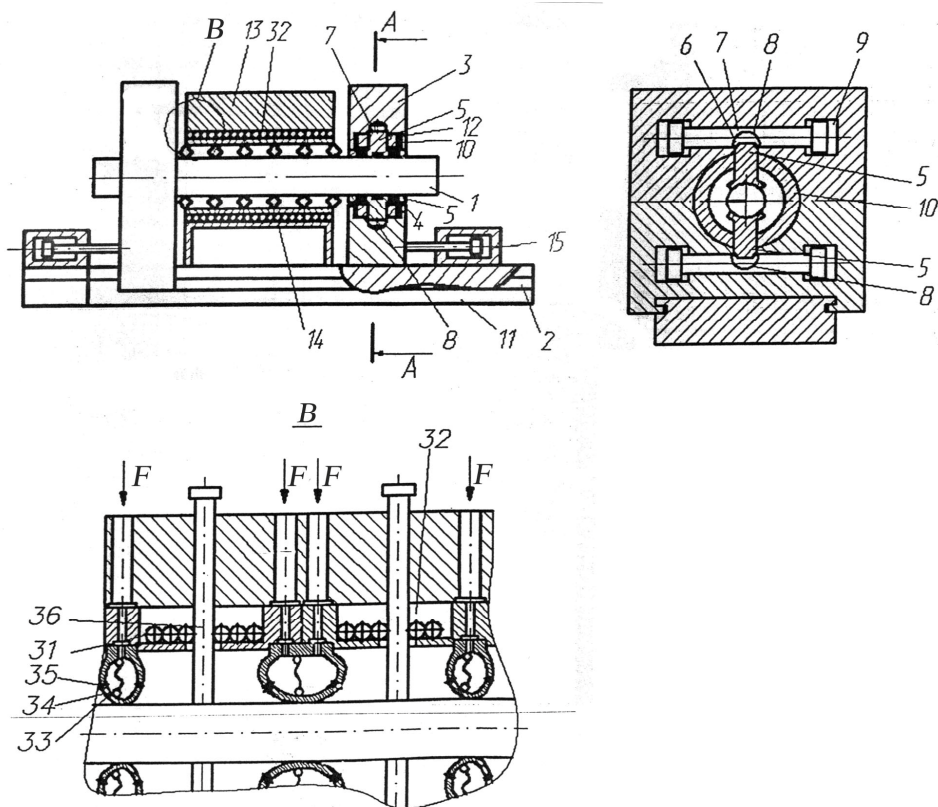
Na pierwszym stadium po nagrzaniu półfabrykatu do określonej temperatury jest zdejmowany sygnał o odkształceniu skrętnym. Skręcanie zachodzi do osiągnięcia wartości zero przez pochodną $\partial F / \partial \varphi$, co odpowiada osiągnięciu strefy plastyczności. Włączany jest napęd przemieszczeń osiowych do osiągnięcia stadium płynięcia plastycznego w kierunku wzdłużnym. Zatem cykl odkształ-

cania jest powtarzany przy skręcaniu w przeciwną stronę i ściskaniu osiowym. Na obu stadiach jest kontrolowana zmiana średnicy szyjek na odcinkach wału. Dla odcinka wału w przypadku, którego po rozpoczęciu płynięcia plastycznego miało miejsce odkształcenie maksymalne, jest wyłączane nagrzewanie odpowiedniej sekcji elementu grzewczego i jest podawany strumień powietrza chłodzącego, co zwiększa granicę plastyczności materiału na danym odcinku półfabrykatu wału. Wyłączając nagrzewanie i chłodząc odcinki wału, które osiągnęły wielkość odkształcenia pierwszego odcinka uzyskuje się równomierne odkształcenie całego półfabrykatu. Niejednorodność naprężeń uwarunkowana niejednorodnością położenia ziaren i ich kształtem ulega zmniejszeniu przy wyrównywaniu i powstawaniu tekstury odkształcenia, co obniża ogólną wewnętrzną energię półfabrykatu. Bardziej zrównoważona struktura sprzyja stabilności kształtu i wymiarów części.

Zagadnienie zwiększenia stabilności wymiarów i kształtu długich osiowo-symetrycznych części o małej sztywności jest rozwiązywane w ten sposób, że w urządzeniu do obróbki cieplno-mechanicznej zawierającym element do ustalania półfabrykatu i element grzewczy, każdy z ustalaczy jest wykonany z otworem do umieszczenia w nim półfabrykatu i zawiera kliny umożliwiające średnicowe ściśnięcie półfabrykatu oraz kontakt ze trzpieniami na końcach których znajdują się cylindry hydrauliczne i pierścień kierunkowy mający możliwość swobodnego obrotu w otworze ustalacza. Pierścień posiada wkładki antyścierne (jest dociskany do czół). Element grzewczy jest rozdzielony materiałem termoizolacyjnym na sekcje. Element grzewczy może być wykonany jako indukcyjny o pierścieniowym kształcie i rozmieszczony współosiowo względem półfabrykatu. Każda sekcja może zawierać cztery zgłębniki i może być izolowana wstawkami cieplno-izolacyjnymi, rozmieszczonymi wewnątrz pierścieni w postaci tulei karbowanych. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej zawiera układ sterowania automatycznego (UAS), zawierający czujniki przemieszczenia liniowego i położenia kąтового, umieszczone w ustalaczach i włączone do obwodu sterowania. UAS może zawierać trzy obwody sterowania: jeden z nich jest wykonany w taki sposób, że ma możliwość sterowania wielkością i prędkością odkształcenia wzdłużnego, drugi – wielkością i prędkością odkształceń skrętnych, a trzeci – oddziaływaniem temperaturowym. Przy czym każdy obwód sterowania zawiera czujnik, wzmacniacz, sumator, zadajnik wielkości parametru kontrolowanego i blok sterowania.

Widok ogólny urządzenia do obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności jest przedstawiony na rys. 4.10. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej części długich osiowo-symetrycznych o małej sztywności zawiera element 2 zawierający ustalacze 3 z otworem 4, w których są umieszczane półfabrykaty 1. Półfabrykat wału 1 jest ściskany klinami 5 ze skosami 6 przez wahliwą wstawkę 7 z trzpieniem 8, który ma na przeciwległych końcach cylindry siłowe 9. Kliny 5 są wstawione, według pasowania luźnego, do pierścienia kierunkowego 10, który może się obracać w otworze 4 ustalacza 3.

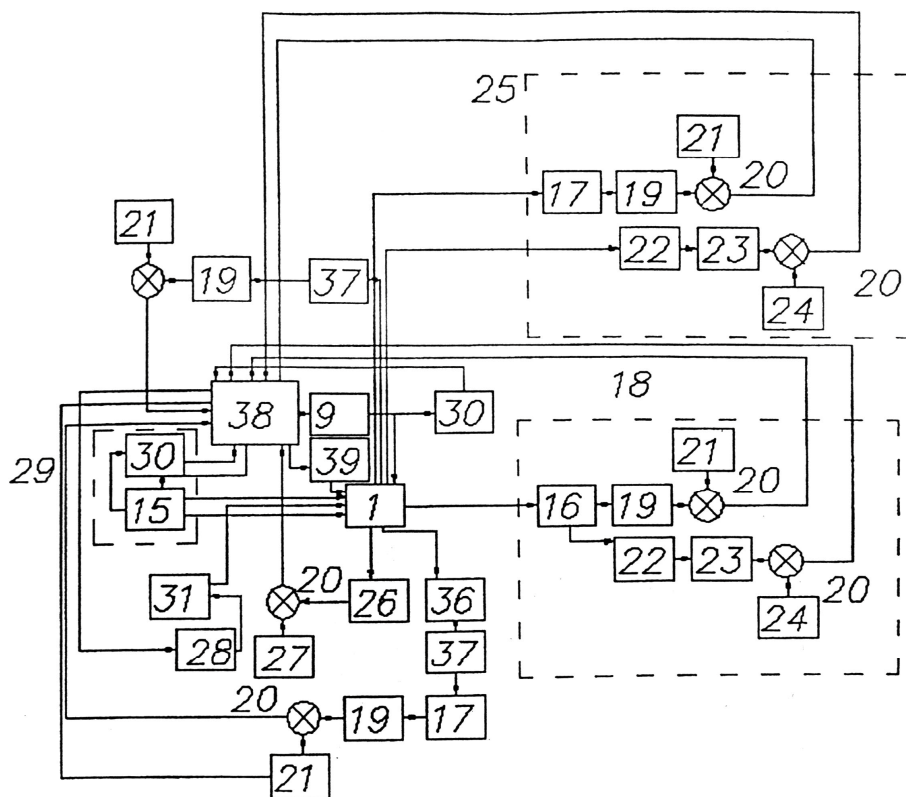
Pierścień jest od czół przyciskany wstawkami antyfrukcyjnymi 12. Między ustalaczami 3 w korpusie 13 znajduje się element grzewczy 14, pracujący według zasady nagrzewania indukcyjnego. Na końcach elementu 1 znajdują się cylindry hydrauliczne 15. W ustalaczach 3 są rozmieszczone czujniki przemieszczenia liniowego 16, a w pierścieniu kierunkowym 10 – czujniki położenia kąтового 17.



Rys. 4.10. Widok ogólny urządzenia do obróbki cieplno-mechanicznej długich wałów o małej sztywności

W układzie sterowania automatycznego można wyróżnić trzy obwody (rys. 4.11). Pierwszy obwód sterowania przemieszczeniami liniowymi 18 zawiera: łańcuch sterowania wielkością odkształcenia liniowego w skład którego wchodzi: czujnik przemieszczenia liniowego 16, wzmacniacz 19, sumator 20, zadajnik wielkości odkształcenia osiowego 21; łańcuch sterowania prędkością odkształcenia osiowego zawierający czujnik położenia kąтового 17, wzmacniacz 22, człon różniczkujący 23 i zadajnik prędkości odkształcenia liniowego 24. Analogiczne dwa łańcuchy wchodzi do obwodu sterowania odkształceniami skrętnymi 25. W obwód sterowania temperaturą wchodzi:

termopara 26, zadajnik temperatury 27, blok sterowania temperaturą 28. W obwodzie siłowym 29 znajdują się czujniki ciśnienia 30 cylindrów hydraulicznych 9 i 15. Element grzewczy jest wykonany w postaci cewki 31 podzielonej na sekcje 32 wstawkami termoizolacyjnymi 33 umieszczonymi wewnątrz karbowanych pierścieni 34. Pierścienie karbowane 34 mają otwory podawania powietrza 35. W każdej sekcji są cztery sondy 36, których wyjścia są podłączone do czujników położenia 37. Sumatory 20 są połączone z przełącznikiem 38, który jest po-łączany z obwodem siłowym 29 cewką 31, układem podawania powietrza 39 w sekcji 32.



Rys. 4.11. Schemat funkcjonalny układu sterowania automatycznego obróbką cieplno-mechaniczną

Urządzenie układu sterowania automatycznego pracuje w sposób następujący. Półfabrykat wału 1 jest przeciągany przez pierwszy ustalacz 3 i element grzewczy 14 do drugiego ustalacza 3, nagrzewając się na odcinku między ustalaczami 3, przy tym do uzwojenia cewki 31 elementu grzewczego 14 jest doprowadzany prąd elektryczny. Temperatura nagrzewania i czas wygrzewania są określane w oparciu o materiał półfabrykatu 1 i niezbędną głębokość warstwy

odkształcanej plastycznie. Po nagrzeniu odcinka wału 1 jest podawane ciśnienie robocze do cylindrów hydraulicznych 9 ustalaczy 3, przy tym przemieszczają się trzpienie 8, które prze skosy 6 naciskają na kliny 5. Po cylindrze kierunkowym 10, kliny 5 przemieszczają się do półfabrykatu wału 1 i zaciskają go. Przy tym cylindry hydrauliczne 9 wytwarzają moment skręcający względem osi półfabrykatu 1. Skręcanie jest początkowo przeprowadzane w jedną stronę na określony kąt, a zatem po rozciągnięciu w drugą. Przemieszczając się o zadany kąt kliny 5 obracają pływającą wstawkę 7, w wyniku czego jest uzyskiwany niezawodny kontakt na całej powierzchni skosu 6 klina 5. Po uzyskaniu określonej siły zacisku ustalaczy 3 ciśnienie robocze jest podawane do bocznych cylindrów hydraulicznych 15. Przy tym ustalacze 3 przemieszczają się po elemencie 2 w celu wytworzenia odkształcenia rozciągania lub ściskania. Odcinek półfabrykatu 1 między ustalaczami 3 jest poddawany kompleksowemu odkształceniu: skręcaniu – ściskaniu (rozciąganiu) według zadanego cyklu pracy. Wszystkie sygnały z sumatorów 20 są przesyłane do przełącznika 38, gdzie jest kształtowane oddziaływanie sterownicze na cylindry hydrauliczne 9, 15, cewkę 31 i układ podawania powietrza 39 do odpowiednich sekcji 32.

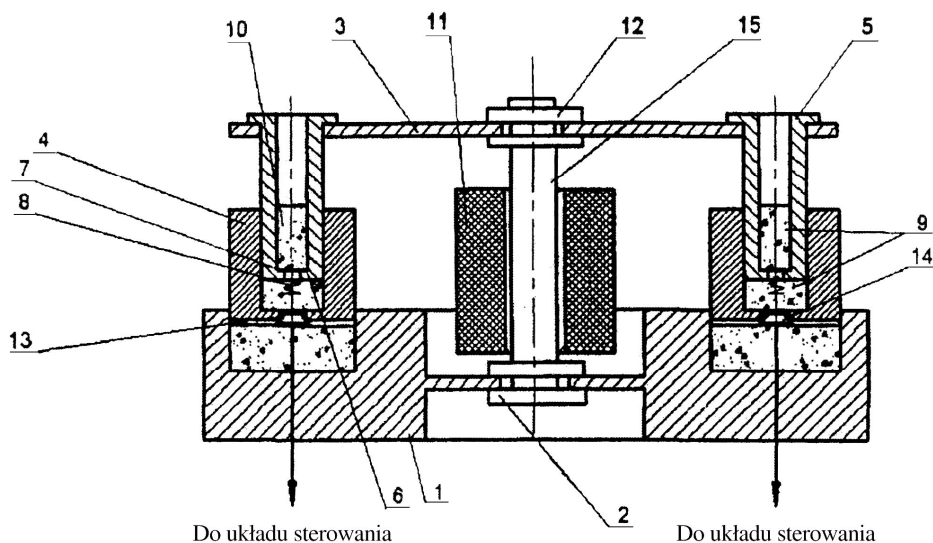
4.6. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności

Opracowane urządzenie umożliwia zwiększenie niezawodności i efektywności obróbki cieplno-mechanicznej, co uzyskuje się w wyniku uproszczenia konstrukcji, lepszego wykorzystania jego możliwości, zwiększenia stabilności struktury materiału i naprężeń szcztątkowych poprzez sterowanie wielkością przykładanej siły w trakcie obróbki cieplno-mechanicznej [33].

Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej długich wałów o małej sztywności zawiera element z chwytakami ruchomymi i nieruchomymi, piec oraz węzeł siłowy wykonany w postaci rozmieszczonych pionowo i połączonych teleskopowo między sobą rur, których wnętrza są wypełnione czynnikiem roboczym, a w częściach dennych są otwory. Rury wewnętrzne są ruchome i mają zawory zwrotne do otwierania otworów przy przemieszczeniu rur w górę. Rury zewnętrzne natomiast są nieruchome i posiadają zawory wylotowe do otwierania otworów przy ruchu rur wewnętrznych do dołu. Jako czynnik roboczy jest stosowany materiał sypki. W zaworach wylotowych może być przewidziana możliwość regulacji siły ich docisku do otworów w dennych częściach rur. Opracowane urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej części o małej sztywności jest przedstawione na rys. 4.12.

Urządzenie zawiera element 1, do którego jest przymocowany nieruchomy chwyt i węzeł siłowy 3 w postaci rur zewnętrznych 4 i wewnętrznych 5 z denną częścią 6 z otworami 7 i zaworem zwrotnym 8. Przestrzenie 9 rur zewnętrznych 4 i wewnętrznych 5 są wypełnione sypką mieszaniną 10 (piasek, grafit, wióry

żeliwne). Koncentrycznie do osi jest umiejscowiony piec 11 i chwytak ruchomy 12. W części dennej rur zewnętrznych 4 są otwory 13 z regulowanymi zaworami spustowymi 14, połączone z układem sterowania (na rys. 4.12 niepokazane).



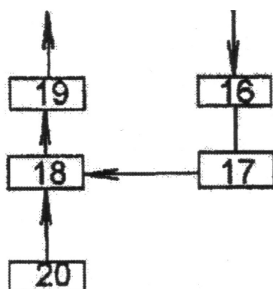
Rys. 4.12. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej długich wałów o małej sztywności

Układ sterowania jest pokazany na rysunku 4.13 i może zawierać urządzenie pomiarowe połączone ze wzmacniaczem 17 przez urządzenie porównujące 18 z napędem 19 regulacji zaworu spustowego 14. Do urządzenia porównującego również jest podłączony zadajnik 20 wielkości przykładanej siły. Urządzenie pracuje w następujący sposób.

Wał 15 umieszczany w piecu 11 jest zaciskany w chwytakach ruchomym 12 i nieruchomym 2, a następnie nagrzewany. W trakcie nagrzewania w wyniku wydłużenia cieplnego wału 15 ruchomy chwytak 12 przemieszcza się, przy tym, rury wewnętrzne wysuwają się z węzła siłowego 3. Zawór zwrotny 8 otwiera się i przez otwór 7 syпка mieszanina 10 przesypuje się z wewnętrznej rury 5 do zewnętrznej rury 4 zapelniając pod zakrytą denną przestrzenią 6 przestrzeń 9. W trakcie stygnięcia wału ma miejsce jego cieplne ściśnięcie, a w wyniku działania chwytaków 2 i 12 przy chłodzeniu jest rozciągany i utrzymywany w stanie prostoliniowym, co prowadzi do kształtowania równoważnej struktury w wyniku odkształcenia plastycznego.

Praca urządzenia przy zastosowaniu układu sterowania przebiega w następujący sposób. Do wytworzenia stałej siły rozciągającej wstępnie jest ustawiany zadajnik 20 wartość przykładanej siły. Przy zmianie obciążenia

w procesie obróbki cieplno-mechanicznej jej wartość z urządzenia pomiarowego siły odkształcenia 16 jest przekazywana przez wzmacniacz 17 do urządzenia porównującego 18. Sygnał niezgodności z urządzenia pomiarowego 16 i zadajnika 20 jest przesyłany do napędu 19 regulacji otwarcia zaworu wylotowego 14, który zmieniając wielkość otworu 13 steruje prędkością wypływu materiału sypkiego 11 w wyniku czego stabilizuje się lub zmienia według określonej zasady wielkość przykładanej siły.



Rys. 4.13. Warianty układu sterowania

Cykl obróbki jest powtarzany, aż do pełnego opróżnienia przestrzeni wewnętrznej, po czym, syпка mieszanina z nieruchomej części urządzenia jest przesypywana ponownie do ruchomych rur.

Wykonanie węzła siłowego w postaci połączonych teleskopowo między sobą rur umożliwia regulowanie długości strefy roboczej urządzenia, co umożliwia obróbkę części o różnej długości, a także adaptację do odkształceń temperaturowych części w procesie obróbki cieplno-mechanicznej, zmniejsza się przy tym zużycie energii, ponieważ podgrzewany jest tylko półfabrykat, a nie całe urządzenie.

Pionowe położenie rur pozwala na wykorzystanie sił grawitacyjnych do regulowania ich wysunięcia w wyniku przesypywania czynnika roboczego. Wykonanie rur z wewnętrznymi wnękami daje możliwość zbudowania bardziej kompaktowego urządzenia, gdyż można je także wykorzystać jako prowadnice do chwytaka ruchomego oraz do umieszczenia mechanizmu obciążania.

Zapełnienie wnęk wewnętrznych rur mieszaniną roboczą zwiększa niezawodność pracy urządzenia w wyniku większej odporności na działanie sił ściskających przy obróbce cieplno-mechanicznej, nie jest przy tym konieczna skomplikowana aparatura sterująca, prostsze stają się warunki eksploatacji, ponieważ prędkość wypływu materiału sypkiego zależy nie od ciśnienia a od wielkości otworu wyjściowego

Wykonanie rur wewnętrznych z częścią denną umożliwia połączenie funkcji obciążania siłowego i sterowania ruchu chwytaka, a wykonanie rur zewnętrznych z częścią denną daje możliwość ukształtowanie pod nimi wnęki na mieszaninę roboczą.

Umieszczenie w częściach dennych rur zaworów pozwala na połączenie nośnej konstrukcji urządzenia z urządzeniami sterowania obciążeniem siłowym wału w procesie obróbki cieplno-mechanicznej.

Usytuowanie w otworach części dennej rur wewnętrznych zaworów zwrotnych wykonanych tak, aby mogły otwierać otwory przy wysunięciu rur pozwala na regulowanie położenia ruchomego chwytaka w trybie adaptacyjnym bez dodatkowego regulowania przy odkształceniu plastycznym, przy tym, jest rejestrowane wydłużenie cieplne półfabrykatu.

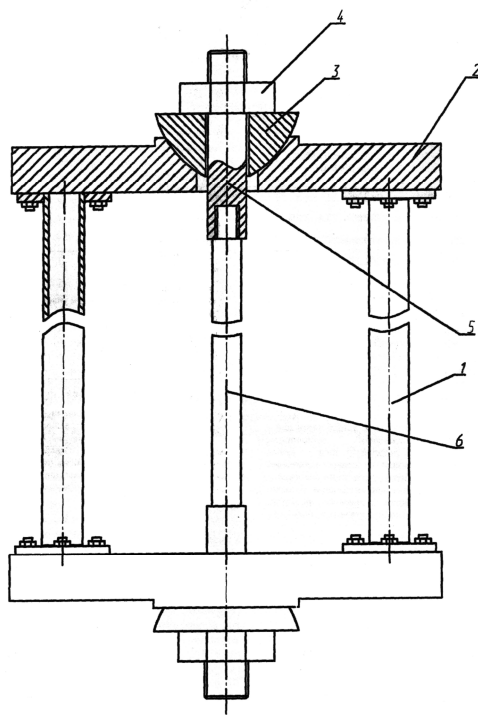
Wykonanie ruchomych rur wewnętrznych daje możliwość wyciągania rur wewnętrznych po wysypaniu mieszaniny roboczej do wnęki, znajdującej się pod rurami wewnętrznymi. Rozmieszczenie w części dennej zewnętrznych rur zaworów zwrotnych pozwala na wytworzenie i regulację obciążenia siłowego wyrobu przy jego ochładzaniu poprzez kompensację odkształceń temperaturowych w procesie chłodzenia półfabrykatu oraz zamykanie siłowe i ukształtowanie w półfabrykacie ukierunkowanych struktur odkształcalnych plastycznie. Zastosowanie jako czynnika roboczego sypkiej mieszaniny umożliwia adaptacyjnie regulowanie wysunięcia rur z określoną siłą bez konieczności zastosowania skomplikowanych układów sterowania. Wykonanie zaworów z regulatorem siły daje możliwość wstępnego zadawania wymaganej siły rozciągającej przy obróbce cieplnej oraz uwzględnienia warunków obróbki (wymiarów części i jej materiału).

Zastosowanie urządzenia pozwala na zwiększenie niezawodności realizacji obróbki cieplno-mechanicznej, podwyższenie stabilności struktury materiału i naprężeń szczątkowych wzdłuż części oraz uproszczenie konstrukcji urządzenia.

4.7. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej wałów

Specyfika urządzenia polega na tym, że element roboczy jest wykonany z dwóch rur. Pokrywy mechanizmu ustalania są wykonane z możliwością połączenia nierozłącznego z rurami elementu roboczego z zastosowaniem naciągu z gwintem na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej, przy czym gwint wewnętrzny umożliwia ustalenie półfabrykatu, a zewnętrzny – nakrętki do zamykania siłowego [123].

Konstrukcja urządzenia do obróbki cieplno-mechanicznej wałów osiowo-symetrycznych o małej sztywności jest przedstawiona na rysunku 4.14.



Rys. 4.14. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej osiowosymetrycznych wałów o małej sztywności

Urządzenie zawiera element wykonawczy 1 w postaci dwóch rur bez napelnacza z obu końców nierozłącznie połączonych z skrzynkowymi pokrywami 2 z otworem w środku, przechodzącym w otwór z wewnętrzną powierzchnią sferyczną. Połączone z nim podkładki sferyczne 3 ustalone nakrętkami 4 są rozmieszczone na powierzchni zewnętrznej dwóch ściągów 5 – górnego i dolnego, wykonanych w postaci cylindra z naciętym gwintem na powierzchni zewnętrznej i w otworze wewnętrznym i nakręcanych z obu końców na część typu wał 6. Część powinna mieć gwint na obydwóch końcach. Współczynnik rozszerzalności liniowej materiału, z którego jest wykonany wał 6 jest mniejszy od współczynnika rozszerzalności liniowej materiału rur 1. Gwint na ściągach 5 i na wale 6 ma mały skok. Liczba rur 1 może być większa od dwóch pod warunkiem symetrycznego rozmieszczenia względem nich wału 6.

Przy nagrzewaniu urządzenia w piecu szybowym (niepokazany) powstaje osiowa siła rozciągająca spowodowana różnicą współczynników rozszerzalności liniowej rur 1 i wału 6, która poprzez zamknięty łańcuch siłowy: element wykonawczy urządzenia – 1, pokrywy – 2, podkładki sferyczne – 3, nakrętki – 4, ściąg – 5 jest przekazywana na wał 6. Przy stygnięciu urządzenia siła osiowa nie jest usuwana, ponieważ wyrób – wał 6 stygnie szybciej niż rury 1, które

poprzez opisany wyżej łańcuch siłowy przekazują siłę osiową o wymaganej wielkości, aż do pełnego ostygnięcia wyrobu – wału 6.

Wykonanie elementu wykonawczego w postaci dwóch rur upraszcza konstrukcję. Chłodzenie wału jest pięciokrotnie szybsze niż elementu urządzenia (z powodu różnicy współczynników rozszerzalności liniowej materiałów urządzenia i obrabianego wału), co powoduje, że wał jest w stanie naprężonym do pełnego ostygnięcia, co jest niezbędne do uzyskania wymaganej jakości obróbki. Brak napełniacza w rurach uniemożliwia pozostawianie w nich oleju stosowanego do chłodzenia, a więc nie zachodzi proces jego wypalania, co umożliwia polepszenie warunków pracy.

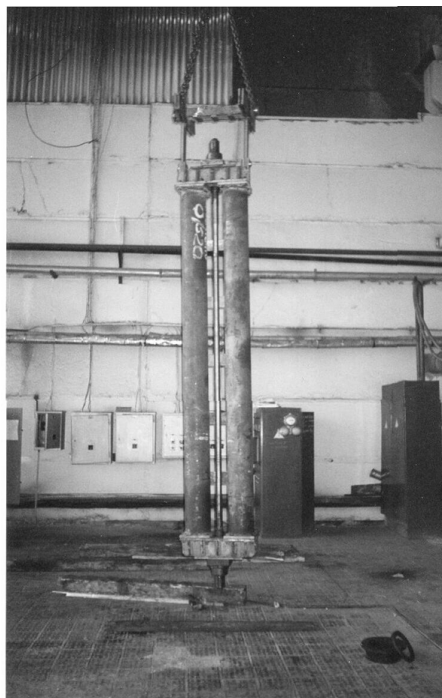
Wykonanie pokryw mechanizmu ustalania o kształcie skrzynkowym umożliwia połączenie ze sobą dwóch rur elementu wykonawczego z wymaganą dokładnością i przydanie urządzeniu niezbędnej sztywności w kierunku działania siły roboczej, a nierozłączne połączenie między urządzeniem wykonawczym i pokrywami przeciwdziała przemieszczeniu rur przy obróbce, transporcie oraz montażu – demontażu urządzenia.

Wykonanie ściągów z gwintem na powierzchni zewnętrznej i we wnętrzu wewnętrznej umożliwia ustalanie części typu wał odnośnie pokryw i rur urządzenia, przy czym, ustalenie według gwintu wewnętrznego jest technologiczne – w tym przypadku nie zachodzi uszkodzenie powierzchni służących do zamocowania, a ustalenie na gwincie zewnętrznym nakrętki zamykania siłowego rozszerza zakres długości obrabianych w urządzeniu wałów. Dokładniej również można zadać wartość osiowej siły roboczej w wyniku nastawienia luzu o określonej wielkości między czołami nakrętki i podkładkami sferycznymi. Fotografia urządzenia jest przedstawiona na rysunku 4.15.

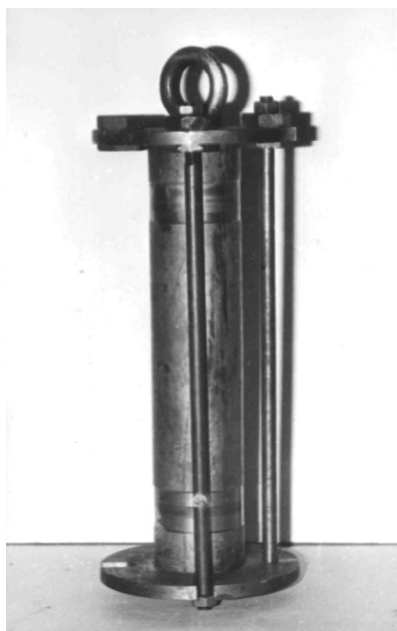
Wykonanie drobnozwojnego gwintu umożliwia bardziej równomiernie rozłożenie obciążenia po powierzchniach kontaktu gwintu, co powoduje, że ciśnienie względne jest mniejsze, a więc gwint lepiej zachowuje swoje parametry.

W oparciu o opracowane metody hartowania skonstruowano i przetestowano urządzenie do wykonywania długich wiertel (rys. 4.16). Ścianki urządzenia są wykonane w postaci „uzwojenia klatkowego”, półfabrykat jest mocowany swoimi końcami do kołnierzy urządzenia. Paczenie wiertel po obróbce cieplno-mechanicznej jest całkowicie wykluczone

Paczenie gotowych wyrobów po zastosowaniu opracowanej metodyki nie przewyższa wymagań dokładnościowych określonych na rysunku.



Rys. 4.15. Widok ogólny urządzenia do hartowania długich wałów



Rys. 4.16. Widok ogólny urządzenia do hartowania długich wiertel

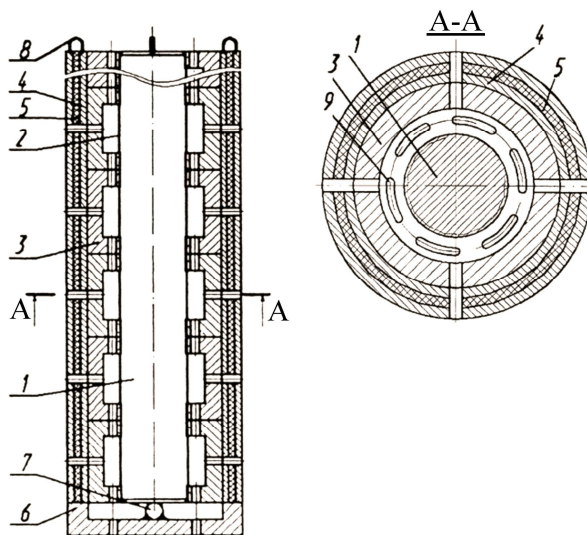
4.8. Nowa technologia obróbki cieplno-mechanicznej długich wałów o małej sztywności

Wynikiem technicznym nowej technologii obróbki cieplno-mechanicznej wałów długowymiarowych o małej sztywności jest zwiększenie dokładności i stabilności parametrów geometrycznych oraz zwiększenie dokładności eksploatacyjnej wyrobów gotowych w wyniku wytworzenia równomiernych zmiennych według znaku naprężeń szczątkowych wzdłuż całego półfabrykatu [28, 31].

Istota nowej metody obróbki cieplno-mechanicznej wałów długowymiarowych o małej sztywności polega na następującym.

Część 1 jest wstępnie obrabiana na tokarce przy zastosowaniu podrzrymek [43]. Kształtowane są następujące zarysy profili roboczych 2 (rys. 4.17):

- a) gwintowy, przy określaniu skoku należy uwzględnić: granicę wytrzymałości materiału, wielkość przekroju poprzecznego półfabrykatu, głębokość nacięcia gwintu (jego średnicę wewnętrzną) – nie powinna być większa od naddatku na obróbkę mechaniczną;
- b) schodkowy, w którym różnica między średnicą zewnętrzną i wewnętrzną, również zależy od granicy wytrzymałości materiału i przekroju poprzecznego półfabrykatu i nie powinna przekraczać naddatku na obróbkę mechaniczną.



Rys. 4.17. Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej długowymiarowych wałów o małej sztywności

Przy obróbce części z gwintem są na nią nakręcane tulejki rozporowe 3, a przy obróbce części stopniowanych tuleje rozporowe 3 są nakładane tak jak panewki w łożyskach ślizgowych (tuleja składa się z dwóch części). Tuleje wykonywane są z materiału, którego współczynnik rozszerzalności liniowej α_l jest mniejszy od współczynnika rozszerzalności liniowej materiału części α_{cz} .

Długość tulei jest określana z warunku równej wytrzymałości tego elementu wyrobu, na którym jest umieszczona tuleja oraz z warunku minimalizacji strzałki ugięcia.

W celu uzyskania równomiernego ściśnięcia części wzdłuż osi oraz wymaganej sztywności ściskanego elementu przyjęto stosunek długości $l_1 = l_2$, $\frac{l}{d} \leq 8$.

W tulejach 3 są wykonane otwory 9 o takim kształcie oraz rozmieszczone w taki sposób aby przy dowolnym wzajemnym położeniu dwóch sąsiednich tulei było możliwe doprowadzenie cieczy chłodzącej.

Część 1 z tulejami rozporowymi 3 (tuleje rozporowe posiadają gwint) jest wstawiana (przy wcześniej określonej wartości luzu) w tuleję wielowarstwową 4 i ustalana odnośnie jej dolnej i górnej powierzchni czołowej. Cylinder specjalny 4 jest wykonany z materiału, którego współczynnik rozszerzalności liniowej jest równy współczynnikowi rozszerzalności liniowej tulei (w celu wyeliminowania zaklinowywania z powodu odkształceń temperaturowych) z wypełniaczem 5. Wypełniacz 5 może mieć różny współczynnik przewodności cieplnej (na przykład piasek rzeczny przemieszany z wiórami żeliwnymi).

Korpus cylindra 4 jest wielowarstwowy, każda warstwa ma dodatkową objętość, zapełnianą materiałem o niższym współczynniku przewodności cieplnej. Na cylinder jest stosowany materiał o współczynniku rozszerzalności liniowej większym od współczynnika rozszerzalności liniowej półfabrykatu.

W korpusie wielowarstwowym są wykonywane otwory przelotowe w kierunkach wzdłużnym i poprzecznym, w których są montowane tuleje, wykonane z takiego samego materiału jak cylinder. Średnica wewnętrzna tulei i ich ilość jest określana z warunku przebiegu procesu technologicznego (hartowanie, odpuszczanie itd.) oraz przy uwzględnieniu parametrów geometrycznych półfabrykatu (na przykład wał gładki lub stopniowany). Ustalenie części może być realizowane według dwóch wariantów:

- a) wał jest ustalany według dolnej powierzchni czołowej za pośrednictwem powierzchni kulistej na sztywno zamocowanej do pokrywy 6 na dolnym czole, a więc półfabrykat opiera się swoim dolnym końcem o powierzchnię sferyczną, co gwarantuje kontakt punktowy z cylindrem;
- b) część jest ustalana według dwóch czół za pośrednictwem dwóch powierzchni sferycznych 7 na sztywno połączonych z pokrywami 6 do powierzchni czołowych dolnej i górnej. Przy takim sposobie zamocowania element jest na sztywno osiowo powiązany z cylindrem.

Do górnej części cylindra 4 są przyspawane cztery uchwyty 8, służące do podwieszania całego urządzenia. W celu uniknięcia ugięcia części 1, spowodowanego działaniem naprężeń powstających w trakcie nagrzewania – ochładzania konstrukcji część – tuleje rozprężne – cylinder, luz między tulejami 3 i cylindrem 4 powinien być minimalny, umożliwiający pracę urządzenia bez zaklinowywania.

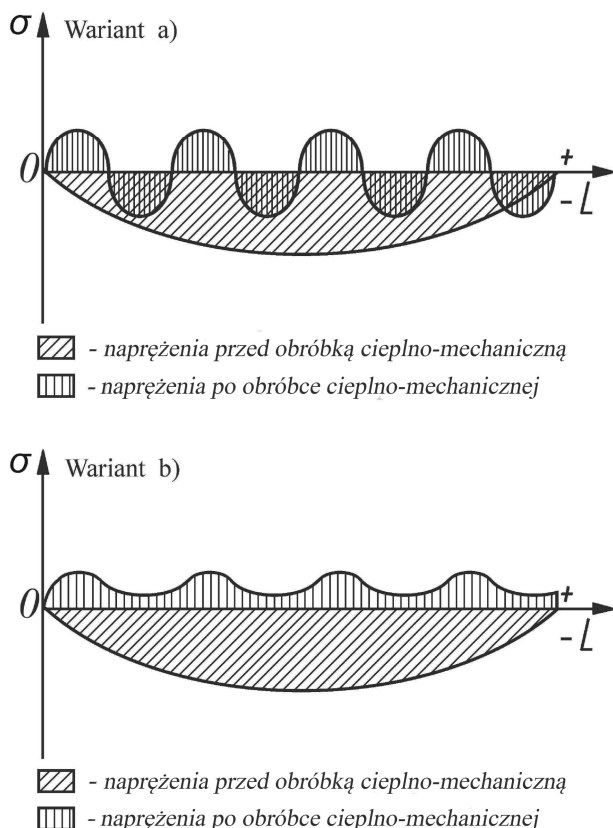
Zmontowane urządzenie jest umieszczane w piecu szybowym i nagrzewane, zgodnie z technologią obróbki cieplnej, do temperatury hartowania lub odpuszczania oraz wygrzewane w tej temperaturze do nagrzania całej części. Przy nagrzewaniu część wydłuża się w stopniu większym od tulei i cylindra, z powodu różnicy współczynników rozszerzalności liniowej. Dobierając wartości liczbowe dodatniej różnicy współczynników liniowej rozszerzalności cieplnej części i tulei, uzyskuje się wielkość odkształcenia plastycznego części przekraczającą granicę proporcjonalności tj. granicę prawa Hooke’a. Osiowe odkształcenie plastyczne, za granicą proporcjonalności (prawo Hooke’a), przy nagrzewaniu usuwa dziedziczność technologiczną od operacji poprzedzających. Oprócz tego, w wyniku działania obciążeń osiowych ma miejsce umocnienie materiału części (zgniot) – wyrównywanie mikropęknięć wewnętrznych.

Cylinder z półfabrykatem jest ochładzany do określonej temperatury, zmieniająca się przy tym różnica czasu ochładzania półfabrykatu i cylindra w celu zachowaniu osiowego stanu naprężeń materiału półfabrykatu aż do pełnego ochłodzenia, jednocześnie półfabrykaty krzywe ulegają prostowaniu. W odróżnieniu od metod znanych, w których odkształcenie plastyczne wyrobu zachodzi przy stygnięciu, cylinder stygnie wcześniej niż wał, a naprężenia szczątkowe mają lokalny charakter. Istota tej technologii polega na zmianie kolejności zabiegów technologicznych.

W technologii przedkładanej odkształcenia plastyczne zachodzą przy nagrzewaniu z określoną prędkością, przy tym cylinder ulega większemu wydłużeniu niż narzędzie, co wynika ze współczynników liniowych rozszerzalności cieplnej oraz różnicy długości cylindra i części. Prędkość stygnięcia cylindra przy ochładzaniu jest przynajmniej pięciokrotnie mniejsza od prędkości stygnięcia półfabrykatu (półfabrykat powinien stygnąć z większą prędkością niż uchwyt minimum pięciokrotnie – w zależności od czynnika chłodzącego: olej, woda, powietrze). W półfabrykacie obciążanym osiowo przy stygnięciu są kształtowane naprężenia szczątkowe, na przemian zmienne według znaku, wzdłuż części i równomierne w jej przekroju poprzecznym, co wyklucza pękanie gotowych części przy ich eksploatacji.

W celu rozszerzenia możliwości technologicznych obróbki cieplno-mechanicznej cylinder wielowarstwowy jest montowany z sekcji, przy czym w razie konieczności zwiększania długości półfabrykatów oraz odkształceń plastycznych, długość cylindra jest zwiększana w wyniku zwiększenia liczby sekcji.

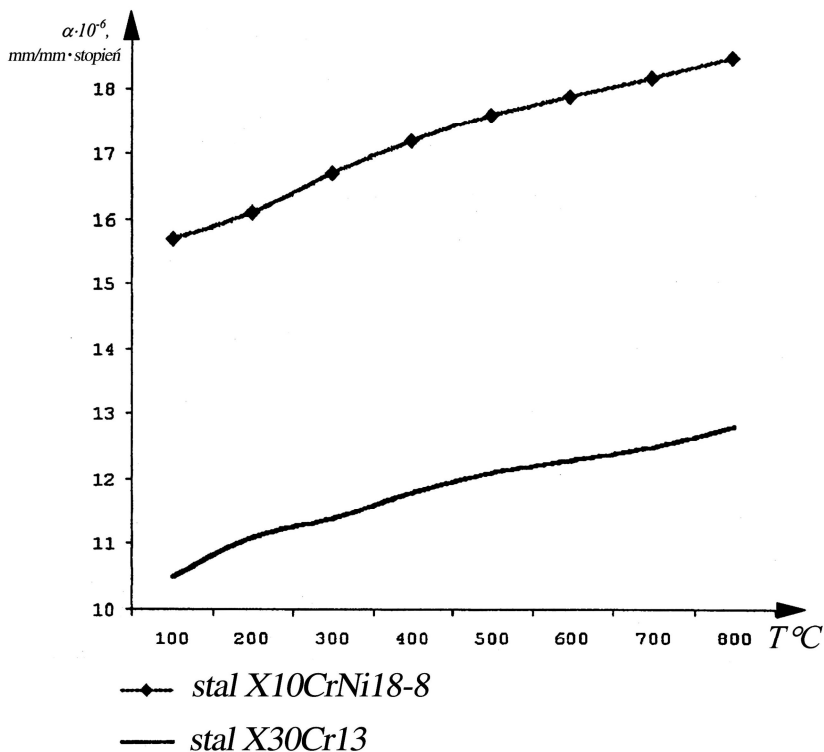
Porównanie naprężeń wewnętrznych w wale do i po zastosowaniu obróbki cieplno-mechanicznej pokazano na wykresie 4.2. Zwiększeniu ulegają również charakterystyki wytrzymałościowe części.



Wykres 4.2. Zależności zmiany naprężeń szczątkowych w wale do i po obróbce cieplno-mechanicznej: a) wariant ustalania i zamocowania według czoła dolnego za pośrednictwem powierzchni kulistej; b) wariant ustalania i zamocowania według dwóch czoł za pośrednictwem dwóch powierzchni kulistych

Zastosowanie nowej technologii obróbki cieplno-mechanicznej umożliwia minimalizację wielkości ugięcia półfabrykatu i stabilizację poziomu naprężeń szczątkowych wzdłużnych, co wpływa na polepszenie jakości i zwiększenie dokładności eksploatacyjnej gotowego elementu, na przykład, wału długiego o małej sztywności. Dobierając w odpowiedni sposób materiał tulei i urządzenia do

materiału wału można uzyskać, w ciągu całego cyklu obróbki cieplnej, dodatnią różnicę współczynników rozszerzalności temperaturowej α_{cz} i α_t (wykres 4.3).



Wykres 4.3. Zależność zmiany współczynników rozszerzalności temperaturowej α_{cz} i α_t w przypadku materiałów części i tulei urządzenia

Opracowana została innowacyjna technologia obróbki cieplno-mechanicznej długich wałów o małej sztywności i metodyka określania prosto-liniowości osi wału długiego przy jego obróbce cieplno-mechanicznej. Opracowano urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej długich części osiowo-symetrycznych, zawierające wielowarstwową część roboczą z kompletem tulei rozporowych wykonanych z materiału, którego współczynnik rozszerzalności liniowej jest mniejszy od współczynnika rozszerzalności liniowej materiału półfabrykatu. Wielowarstwowy element z tulejami umożliwia osiowe odkształcenie półfabrykatu i minimalne ugięcie poprzeczne w wyniku sił ciężkości, a także uzyskanie niezbędnej prędkości chłodzenia. Element wielowarstwowy wypełniony jest napelniaczem i wyposażony w pokrywę z powierzchniami sferycznymi umożliwiającymi ustalenie półfabrykatu w kierunku osiowym.

W celu rozszerzenia możliwości technologicznych obróbki cieplno-mechanicznej wielowarstwowy element wykonawczy jest montowany z sekcji, przy czym jest możliwość zwiększania długości półfabrykatów oraz wielkości odkształcenia plastycznego. Długość elementu wykonawczego urządzenia jest zwiększana w wyniku zwiększenia ilości sekcji. Osiowe odkształcenie plastyczne podczas nagrzewania za granicą proporcjonalności usuwa dziedziczność technologiczną od operacji poprzednich. W wyniku działania obciążeń osiowych ma również miejsce umocnienie odkształceniowe materiału części (zgniot), a także są usuwane mikropęknięcia wewnętrzne.

Zastosowanie nowej technologii obróbki cieplno-mechanicznej umożliwia zminimalizowanie wielkości ugięcia półfabrykatu i stabilizację poziomu naprężeń szczątkowych wzdłuż części, co przekłada się na podniesienie jakości oraz zwiększenie dokładności eksploatacyjnej gotowych wyrobów, na przykład długich wałów o małej sztywności.

W oparciu o przeprowadzone badania eksperymentalne nowej technologii można stwierdzić, że paczenie półfabrykatów o małej sztywności po 600 godzinach wygrzewania nie przekraczało 1,15% w porównaniu z półfabrykatami obrobionymi według technologii standardowej. Zaprezentowane w danym rozdziale opracowania procesu wytwarzania części o małej sztywności mają ukierunkowanie heurystyczne w zakresach: teoretycznym, eksperymentalnym i stosowanym. Opracowano urządzenia do operacji obróbki cieplno-mechanicznej umożliwiające kontrolę stanu przebiegu procesu z możliwością analizy właściwości fizyko-mechanicznych materiału półfabrykatu.

Opracowano algorytmy regulowania, w których uwzględniono oddziaływanie siłowe i temperaturowe umożliwiające prognozowanie procesów relaksacyjnych w okresie eksploatacji. Regulowanie procesu cieplno-mechanicznego umożliwia operatywną ingerencję w proces technologiczny, zmianę algorytmu regulowania bez przezbijania urządzeń. Kontrola bieżących parametrów procesu i przechowywanie ich w pamięci komputera umożliwia budowę układu samouczącego się typu technolog automatyczny.

Przykład. Cylinder wykonano ze stali X17CrNi16-2, wał – ze stali X30Cr13, wydłużenie temperaturowe określano z zależności:

$$\Delta L = \alpha_u (T^\circ) T^\circ L - \alpha_{cz} (T^\circ) T^\circ L ,$$

gdzie: ΔL – różnica wydłużeń cylindra i części,
 α – współczynnik rozszerzalności liniowej,
 T° – temperatura nagrzewania,
 L – długość cylindra i części.

Przy $L = 1000 \text{ mm}$, $T^\circ = 850^\circ \text{C}$, $\alpha_u = 19 \cdot 10^{-6} \text{ 1/stop.}$, $\alpha_{cz} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/stop.}$ uzyskuje się wartość odkształcenia plastycznego $\varepsilon = 0,84\%$.

Czas chłodzenia jest określany przy następujących parametrach: średnica wału 60mm, średnica wewnętrzna cylindra 210mm, średnica zewnętrzna 310mm, wypełniacz – piasek rzeczny zmieszany z wiórami żeliwnymi, środek chłodzący – olej o temperaturze 30°C. Czas chłodzenia jest określany zgodnie z zależnością:

$$t_{ch} = \frac{F_0 \cdot d^2 \cdot \gamma \cdot c}{4\lambda} \text{ s.}$$

Czas chłodzenia cylindra jest określany w wyniku rozwiązania równania:

$$\frac{\theta_0}{\theta'} = \Phi_0(B_i, F_0),$$

gdzie: $F_0 = \frac{\alpha'}{r^2}$ – kryterium Fouriera, które jest funkcją temperatur względnych

$\frac{\theta_0}{\theta'}$ i kryterium Biota:

$$B_i = \frac{B_0}{\lambda_{ekw.}},$$

gdzie: r – promień wału długowymiarowego (w danym przypadku wał jest przedstawiany jako cylinder nieskończenie długi o promieniu r),
 $\lambda_{ekw.}$ – ekwiwalentna przewodność cieplna ścianki cylindra wielowarstwowego,
 B_0 – współczynnik przekazywania ciepła od otoczenia do powierzchni ciała,
 γ – ciężar objętościowy materiału.

Obliczanie półfabrykatów stopniowanych jest prowadzone na podstawie warunku równości powstających na wszystkich stopniach półfabrykatu naprężeń roboczych. Naprężenia na dowolnych stopniach półfabrykatu powinny być równe, to znaczy:

$$\sigma_n = \sigma_{n-1},$$

dla których σ_n , σ_{n-1} – naprężenia robocze w n i $(n-1)$ -tym stopniach półfabrykatu. Siły w poszczególnych sekcjach cylindra można określić na podstawie zależności:

$$F_n^c = S_n^c \cdot E_n^c \cdot \Delta\alpha(T^\circ) \cdot T^\circ,$$

gdzie: S_n^c – powierzchnia przekroju poprzecznego stopnia cylindra,

E_n^c – moduł sprężystości materiału cylindra,

$\Delta\alpha(T^\circ)$ – różnica współczynników rozszerzalności liniowej materiału półfabrykatu i cylindra,

T° – temperatura cylindra i półfabrykatu.

Napężenia rozciągające osiowe w n i $(n-1)$ -tym przekrojach stopni półfabrykatu można określić na podstawie równania:

$$\frac{S_n^c \cdot E_n^c \cdot \Delta\alpha(T^\circ) \cdot T^\circ}{S_n^b} = \frac{S_{n-1}^c \cdot E_{n-1}^c \cdot \Delta\alpha(T^\circ) \cdot T^\circ}{S_{n-1}^b} = const ,$$

gdzie: S_n^b i S_{n-1}^b – powierzchnie przekrojów półfabrykatu na n i $(n-1)$ -tym stopniach.

Zastosowanie opracowanego sposobu obróbki cieplno-mechanicznej stopniowanych części osiowosymetrycznych umożliwia minimalizowanie wielkości ugięcia wyrobu i ustabilizowanie poziomu naprężeń szcztkowych wzdłuż części na wszystkich stopniach, co z kolei umożliwia zwiększenie dokładności eksploatacyjnej gotowych wyrobów, na przykład stopniowanych wałów o małej sztywności oraz jakości wyrobów gotowych.

5. BADANIA EKSPERYMENTALNE NIEZMIENNOŚCI WYMIAROWEJ I DOKŁADNOŚCI WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

5.1. Badania eksperymentalne wpływu obróbki cieplno- mechanicznej przy odpuszczaniu na dokładność geometryczną i niezmiennosc kształtu części o małej sztywności

Analiza badań teoretycznych i eksperymentalnych odnośnie wytwarzania długich wałów, przeprowadzona w danej pracy, pokazuje, że półfabrykaty o początkowym ugięciu 5mm/m nie mogą być wykorzystane na wały o wysokiej dokładności – poniżej 20 μ m/m bez zastosowania dodatkowych operacji stabilizacji cieplnej.

Autorzy opracowali nowe metody obróbki cieplno-mechanicznej wałów długich, których istota polega na przyłożeniu w trakcie obróbki cieplnej sterowanych obciążeń osiowych. Takie podejście technologiczne zakwalifikowano do obróbki cieplno-mechanicznej, której dokładny opis przedstawiono w rozdziałach 3 i 4, a w tym są przedstawione wyniki wybranych badań eksperymentalnych.

Opracowana nowa technologia wytwarzania długich części osiowo-symetrycznych umożliwia wykonanie wyrobów, których materiał jest skłonny do umocnienia (na przykład nierdzewne stale austenityczne typu X10CrNi18-8). Stale austenityczne posiadają pewne specyficzne właściwości. Przekształceniu austenityczno-martenzytycznemu towarzyszy zwiększenie objętości materiału, co może prowadzić do powstania naprężeń wewnętrznych i pękania części. Aby tego uniknąć odkształcanie plastyczne austenitu powinno być niewielkie ($\varepsilon < 10\%$). Problematyka przekształcenia martenzytycznego w procesie odkształcania była już badana, jednak wyniki tych prac nie uzasadniają możliwości obróbki cieplno-mechanicznej bez rozpadu austenitu w stalach o niewystarczającej jego trwałości. Dlatego przed wyborem optymalnych parametrów obróbki cieplno-mechanicznej konieczne było zbadanie warunków powstawania martenzytu, a także właściwości mechanicznych stali nierdzewnych przy różnych temperaturach obróbki.

To, że przeprowadzone wcześniej odkształcenie plastyczne może istotnie zmienić zachowanie metalu w warunkach późniejszego obciążenia wykazał już Boltzmann. Opracowana przez niego teoria opóźnienia sprężystego w ciałach sztywnych nazywana jest także teorią dziedziczności. Należy odnotować, że zakres temperaturowy, w którym spełniona jest teoria liniowa w przypadku

materiałów rzeczywistych jest dosyć wąski. Analiza porównawcza wyników uzyskanych przez różnych badaczy jest utrudniona, ponieważ w różnych pracach stosowano różne schematy, prędkości i temperatury odkształcania. Na wynik badań wpływa przynajmniej siedem czynników: prędkość nagrzewania do temperatury odkształcania, temperatura odkształcania, długotrwałość wygrzewania przy temperaturze odkształcania, stopień odkształcania, prędkość odkształcania, prędkość chłodzenia do temperatury pokojowej oraz parametry odpuszczania końcowego.

Mimo pewnych sprzeczności wyników uzyskanych przez różnych badaczy, ich analiza umożliwia jednak wybranie zakresu parametrów obróbki cieplno-mechanicznej, gwarantującego wpływ odkształcenia plastycznego na zachowanie metalu przy jego obciążeniu w wyniku wprowadzenia funkcji pamięci, a także umożliwiającego uzyskanie stabilnej struktury austenitu o minimalnym, wyrównanym poziomie naprężeń szczątkowych.

W celu potwierdzenia badań teoretycznych i nowych sposobów obróbki cieplno-mechanicznej przeprowadzone zostały badania laboratoryjne.

Postawiono zadanie: w sposób eksperymentalny opracować optymalne metody obróbki cieplno-mechanicznej w funkcji zewnętrznego oddziaływania siłowego i temperatury nagrzewania. Badania były prowadzone na maszynie wytrzymałościowej firmy AMSLER (Szwajcaria) przy maksymalnym obciążeniu statycznym 5t. Próbkę wykonano z nierdzewnej stali austenitycznej klasy X10CrNi18-8. Próbkę były wykonywane według dwóch technologii.

Pierwsza technologia

1. Toczenie.
2. Nacięcie gwintu narzynką. Mocowanie części na średnicy środkowej.
3. Szlifowanie na wymiar o średnicy 10mm ściernicą 24A 500x50x23, $n_s = 2500 \text{ obr/min}$.

Druga technologia.

1. Toczenie specjalnym nożem ze stali szybko tnącej SW18 na wymiar.
2. Nacinanie gwintu nożem. Mocowanie części na średnicy środkowej.
3. Polerowanie na tokarce płótnem szlifierskim.

W celu realizacji postawionego zadania przeprowadzono eksperymenty według zaproponowanej metodyki.

Program – metodyka

Eksperymentu w przypadku stali X10CrNi18-8

1. Półfabrykat z dostawy.
2. Próbkę znormalizowane. Długość badanej części 100mm, długość ogólna 170mm, średnica 10mm.
3. Nanieść znaki 18 szt., co $5 \text{ mm} \pm 0,01$.
4. Cechować na czole nr 000 – 016.

5. Przeprowadzić kontrolę parametrów geometrycznych półfabrykatu przed eksperymentem i po eksperymentie po upływie 220 godzin i 2120 godzin. Dane zapisać w tabeli 5.1 (dokładność pomiaru 0,001mm).
6. Próbkę wstawić do pieca i zamocować w uchwytach maszyny wytrzymałościowej.
7. Nagrzać próbkę do $T^{\circ} = 200^{\circ}\text{C}$, zmierzyć prędkość nagrzewania, wygrzać w ciągu 30min i chłodzić do $T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$. Wydłużenie względne przy tym jest równe:

$$\varepsilon_{200} = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\% = 0,246\%$$

$$\Delta l = \alpha \cdot T^{\circ} \cdot l = 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot 200^{\circ} \cdot 95\text{mm} = 0,234.$$

8. Nagrzać próbkę do $T^{\circ} = 300^{\circ}\text{C}$, zmierzyć prędkość nagrzewania, wygrzać w ciągu 30min i chłodzić do $T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$ razem z piecem

$$\varepsilon_{300} = 0,3693\%$$

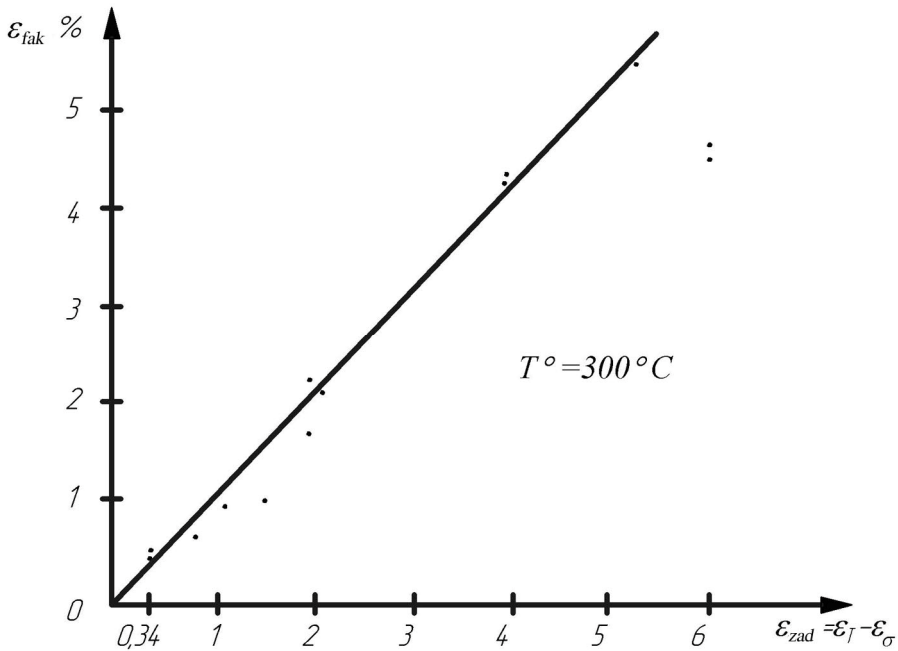
9. Nagrzać próbkę do $T^{\circ} = 300^{\circ}\text{C}$, zmierzyć temperaturę i obciążyć siłą osiową do uzyskania odkształcenia (przy minimalnej prędkości odkształcania) względnego $\varepsilon_l = 0,8\%$ (zgodnie z paszportem urządzenia), wygrzewać 30min i chłodzić do $T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$ razem z piecem.

$$\varepsilon_l = \varepsilon_{300} + \varepsilon_{\text{odk}} = 0,369 + 0,431 = 0,8$$

10. Powtórzyć punkt 9 przy $\varepsilon_l = 1\%, 1,5\%, 2\%$.
11. Powtórzyć punkt 10 przy minimalnej prędkości odkształcania (zgodnie z paszportem urządzenia)
12. Przeprowadzić badania według punktów 9 i 11, dane przesłać do przyrządu rejestrującego wykresu „siła-wydłużenie”.
13. Przeprowadzić mikroanalizę próbek ($\varepsilon = 0, 2\%, 1\%, 2\%, 4\%, 6\%$). Zgłady zdjąć z jednego końca i środka próbek (tj. 6 zgładów).
14. Ustawić $\varepsilon\%$ na obrabiarce przy pomocy śrub – nie można ustawiać na sztywno.
15. Przeprowadzić kontrolę osiowych naprężeń szczątkowych (wytrawianiem lub obróbką wibracyjną)

W procesie realizacji eksperymentu były wykonywane różne pomiary. Pomiary te odnotowane zostały w kartach pomiarów wykonanych dla każdej próbki 003–016. Ogólne wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 5.1.

Według wyników eksperymentów postawiono zadanie określenia odpowiedniości zadanego odkształcenia próbki faktycznemu. Zależność graficzna ε_{zad} przy zmianie ε_{fak} jest przedstawiona na wykresie 5.1.



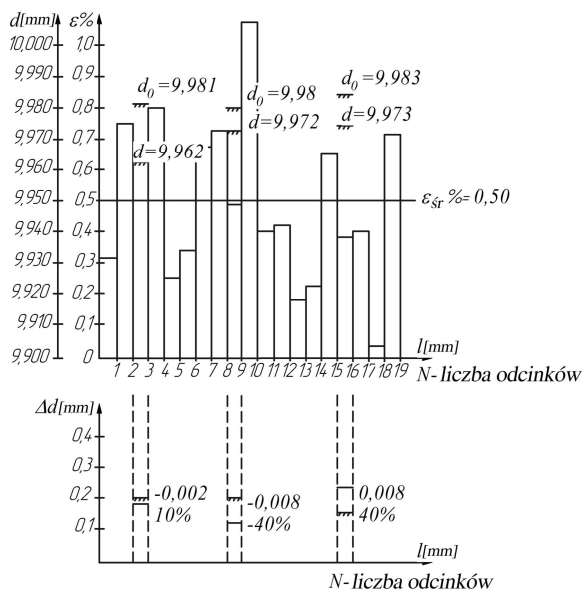
Wykres 5.1. Zmiany faktyczne odkształceń względnych w stosunku do zadanych

Z wykresu widać, że w wyniku eksperymentu otrzymano takie odkształcenie próbki, jakie planowano uzyskać. Ta zgodność jest szczególnie dokładna przy odkształceniach małych – do 4%. Sztywność układu kinematycznego maszyny wytrzymałościowej umożliwia, więc przeprowadzenie planowanych eksperymentów. Podstawowym problemem jest określenie równomierności obciążenia w wyniku pomiaru odległości między ryskami naniesionymi po długości i pomiaru średnicy próbki w różnych przekrojach przed i po eksperymencie.

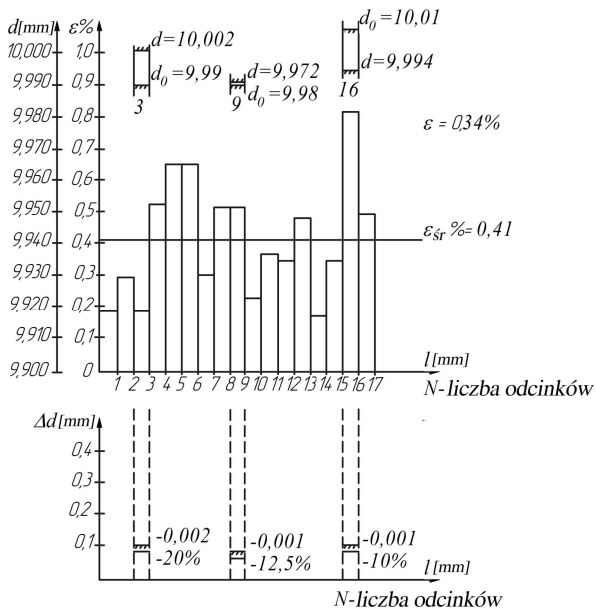
Wykresy rozkładu odkształceń względnych $\varepsilon = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%$ przedstawiono na wykresach 5.2–5.13. Pokazano również na nich średnie średnice i bicie próbek na odcinkach o numerach 3, 9, 16 przed i po eksperymencie.

Tab. 5.1. Wyniki pomiarów

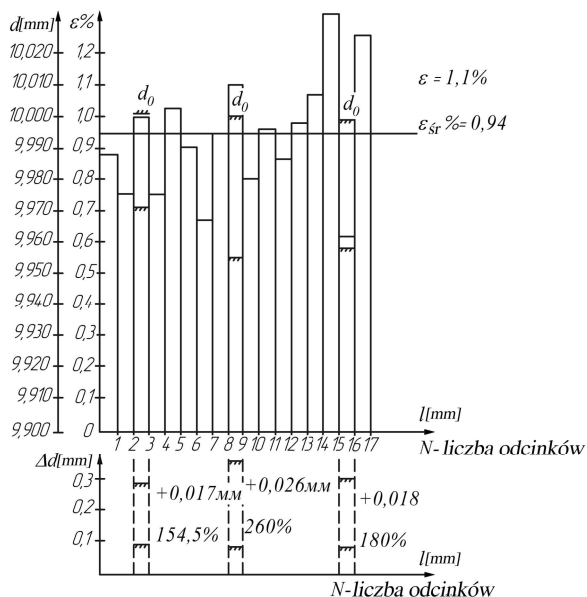
Nr próbki	Technologia wykonania próbki	Temperatura nagrzewania °C	Odształcenie			Prędkość obciążania mm/s	Wskazania dynamometru			ε_{sr}	$l = \varepsilon_{max} / \varepsilon_{sr}$	$l_{max} = \varepsilon_{max} / \varepsilon_{min}$
			Temperaturowe ε_0 , mm	od obciążenia ε_0 , mm	ogólne ε , %		Po obciążeniu, N	Po wygrzewaniu 30 min, N	Po ochłodzeniu do 20°C, N			
001	№1	200	0,234	0	0,25	0,053						
002	№1	200	0,234	0	0,25	0,053						
003	№1	300	0,351	0	0,34	0,053			18000	0,50	2,20	55
004	№1	300	0,351	0	0,34	0,053			17600	0,41	2,0	5,13
005	№1	300	0,351	0,76	1,1	0,053	9750	5750	18000	0,94	1,33	2,12
006	№1	300	0,351	0,41	0,8	0,053	6750	4750	17750	0,79	1,52	2,12
007	№1	300	0,351	0,41	0,8	0,053	6250	4750	21500	0,60	3,77	28,25
008	№1	300	0,351	1,08	1,5	0,053	14500	12000	21000	1,51	1,93	2,98
009	№1	300	0,351	1,08	1,5	0,053	18500	17000	27000	0,99	3,89	16,71
010	№1	390	0,351	1,55	2	0,053	16000	13000	21500	2,23	1,94	11,53
011	№1	300	0,351	1,69	2,15	0,00457	17000	14000	23500	2,12	2,46	74,57
012	№2	300	0,351	1,55	2	0,00457	18000	15000	24000	1,63	1,32	2,15
013	№2	300	0,351	3,45	4	0,00457	23500	17000	29500	4,17	1,54	2,45
014	№2	300	0,351	3,45	4	0,00457	23500	17000	29000	4,09	1,22	2,11
015	№2	300	0,351	5,35	6	0,00457	24000	17000	30000	4,43	1,40	3,39
016	№2	300	0,351	5,35	6	0,00457	25000	23000	31000	4,28	1,54	4,25



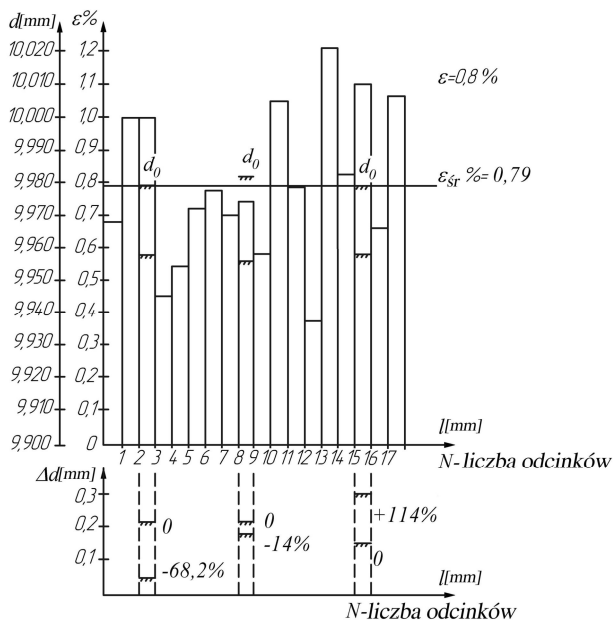
Wykres 5.2. Rozkład odkształcenia względnego wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 003)



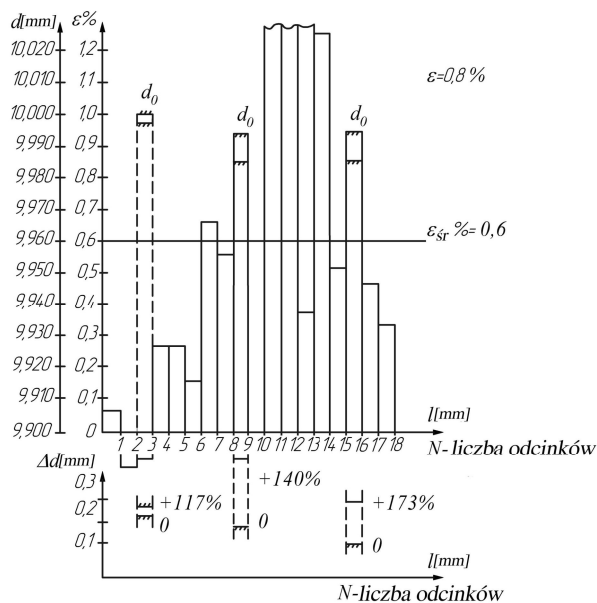
Wykres 5.3. Rozkład odkształcenia względnego wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 004)



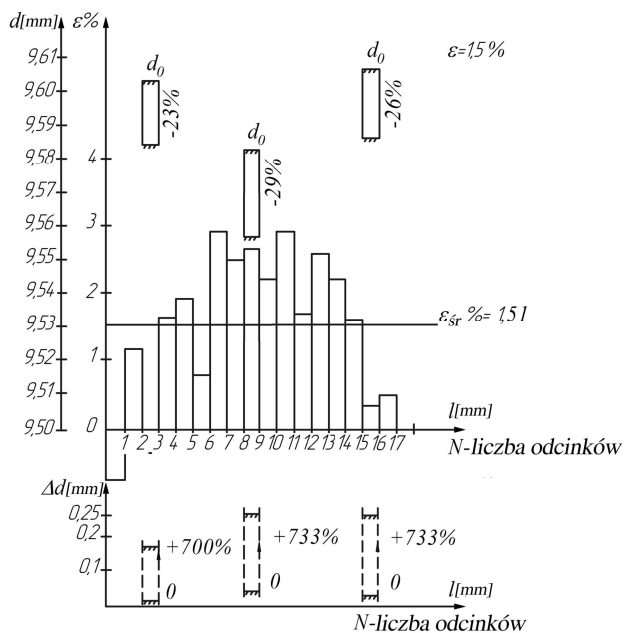
Wykres 5.4. Rozkład odkształcenia względnego wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 005)



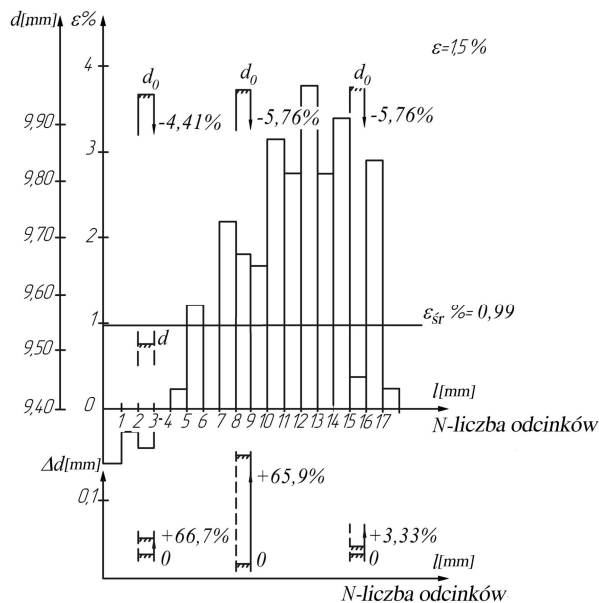
Wykres 5.5. Rozkład odkształcenia względnego wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 006)



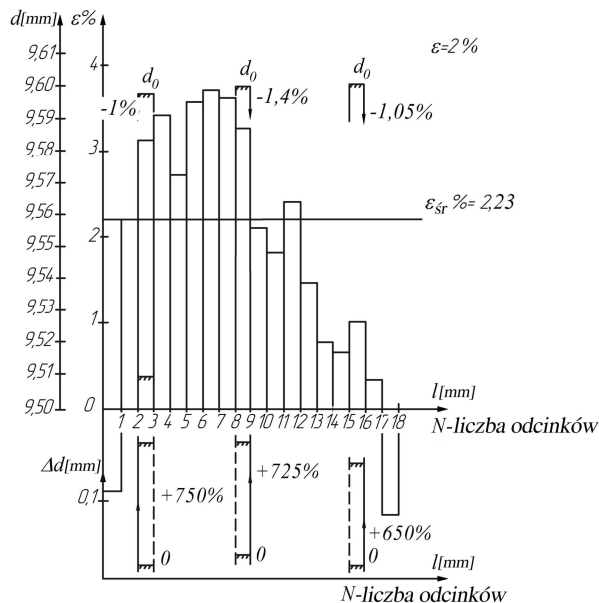
Wykres 5.6. Rozkład odkształcenia względnego wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 007)



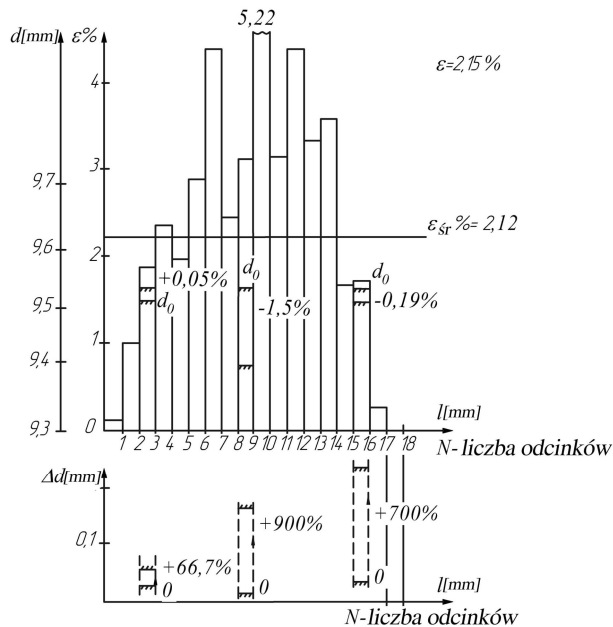
Wykres 5.7. Rozkład odkształcenia względnego wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 008)



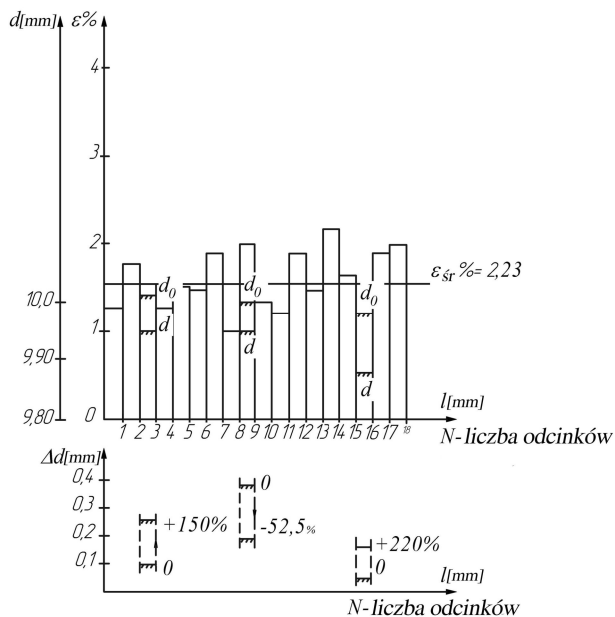
Wykres 5.8. Rozkład odkształcenia względnego wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 009)



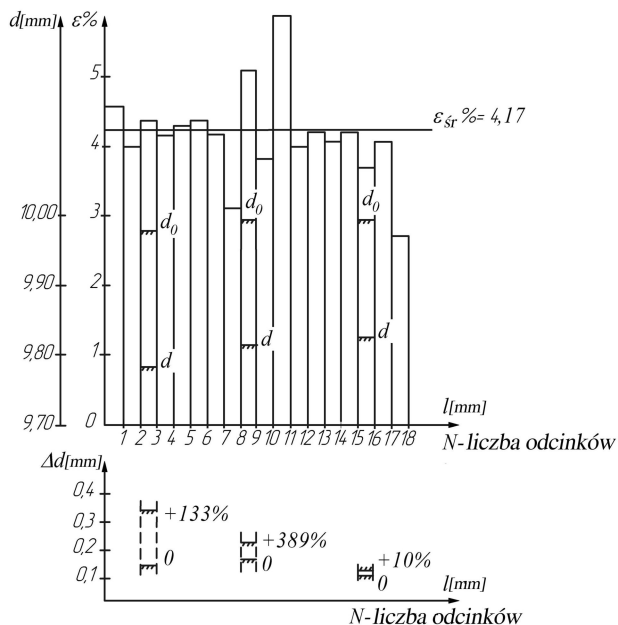
Wykres 5.9. Rozkład odkształcenia względnego wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 010)



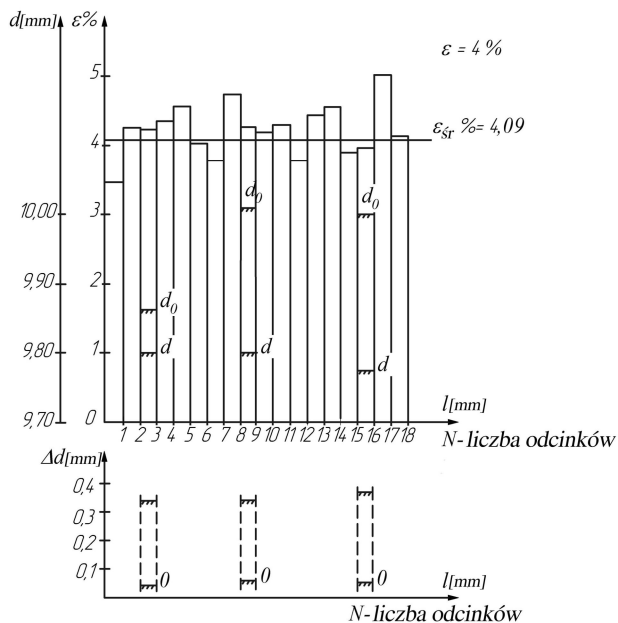
Wykres 5.10. Rozkład odkształcenia wzgl. wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 011)



Wykres 5.11. Rozkład odkształcenia wzgl. wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 012)



Wykres 5.12. Rozkład odkształcenia wzgl. wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 013)



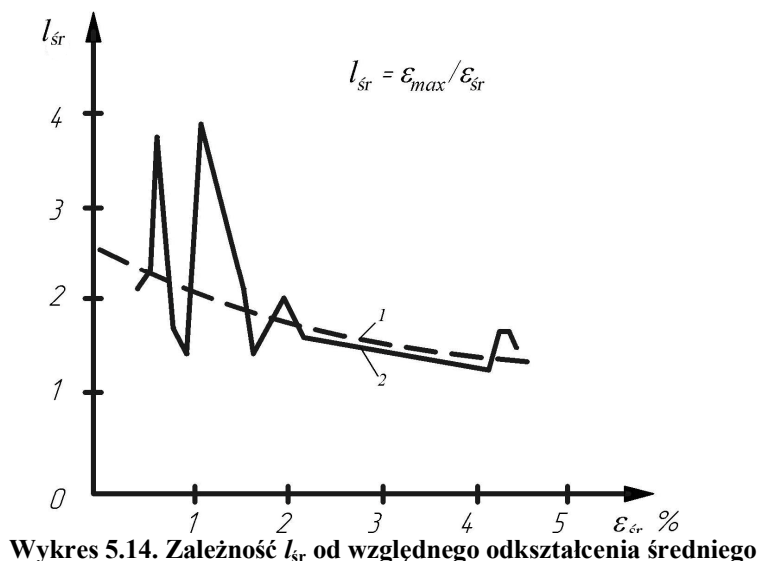
Wykres 5.13. Rozkład odkształcenia wzgl. wzdłuż próbki, średnie średnice i bicie próbek na odcinkach nr 3, 9, 16 przed i po eksperymencie (próbka 014)

Analiza diagramów na wykresach 5.2–5.13 umożliwia wyciągnięcie wniosku, że odkształcenie próbki zachodzi na całej długości próbki, a nie tylko w niektórych jej częściach, przy tym przy większych wielkościach odkształcenia rozciąganie jest bardziej równomierne.

Nie określono żadnej zależności między wydłużeniem poszczególnych części próbki i ich średnicami. Początkowe średnice części są praktycznie jednakowe, w tym celu próbki były szlifowane, a ich wydłużenie charakteryzuje się pewnym rozrzutem związanym z wewnętrznymi właściwościami materiału.

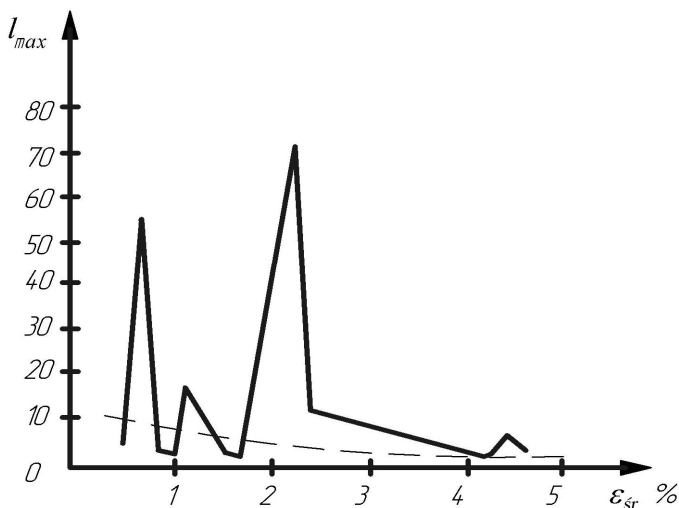
Próbowano również ustalić zależność prostoliniowości osi próbki od wielkości odkształcenia rozciągania $\varepsilon\%$ na podstawie zmiany bicia Δd próbki w trzech punktach po jej długości, jednak takiej zależności nie udało się potwierdzić. Bicie, w zasadzie, stawało się większe, co oczywiście jest związane z relaksacją znacznych naprężeń wewnętrznych. W celu zdjęcia dużych naprężeń wewnętrznych należy przeprowadzić dodatkowe eksperymenty przy większym odkształceniu. Przy tym należy przygotować próbki o większej dokładności.

Równomierność odkształcenia plastycznego określano według metodyki I. A. Odinga. Określano charakterystyki $l_{\max} = \varepsilon_{\max}/\varepsilon_{\min}$, $l_{\text{sr}} = \varepsilon_{\max}/\varepsilon_{\text{sr}}$ w zależności od odkształcenia próbki $\varepsilon\%$. Charakterystyki te przedstawiono graficznie odpowiednio na wykresach 5.14 i 5.15. Analiza tych zależności pokazuje, że równomierność odkształceń plastycznych przy danych warunkach eksperymentu l_{sr} wynosi 1, 5–2. Wyniki optymalne są uzyskiwane przy rozciąganiu próbki o 4%. Oscylogramy eksperymentu przedstawiono na wykresie 5.16, gdzie pokazano zależności siły odkształcenia w funkcji odkształcenia próbki ε w mm.

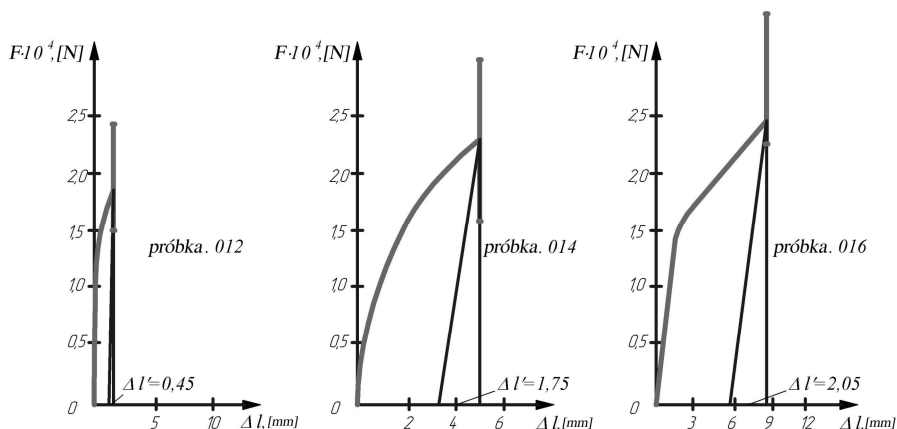


Wyniki opracowania oscylogramów przedstawiono w tabeli 5.1 i w postaci wykresów 5.17 pokazano zależność $F_{\max}$ od odkształcenia $\varepsilon\%$; a na wykresie 5.18 zależność zmniejszenia siły ΔF w wyniku relaksacji naprężeń szczątkowych przy temperaturze 300°C w ciągu 30min wygrzewania.

Analiza wyników przeprowadzonych eksperymentów pokazuje, że należy uszczegółowić zależność temperatury oraz wielkości odkształcenia plastycznego na jej równomierność. W tym celu należy zmniejszyć skok nagrzewania do 50°C w zakresie temperatur od 200°C do 400°C , a zakres zmiany odkształcenia do 1%. Trzeba także sprawdzić równomierność odkształcenia plastycznego przy $\varepsilon = 10\%$ i 15% , co tradycyjnie jest uważane za obszar dużych odkształceń.

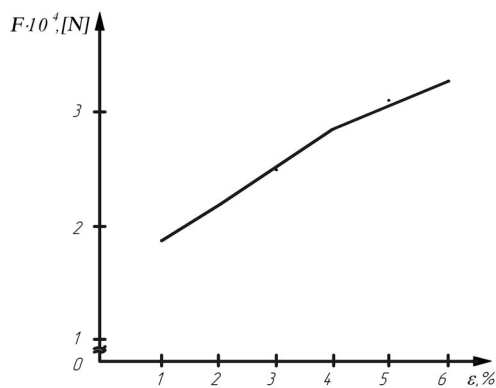


Wykres 5.15. Zależność $l_{\max}$ od średniego odkształcenia względnego

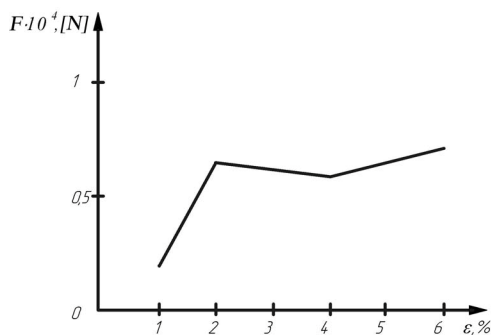


Wykres 5.16. Oscylogramy zależności siły odkształcenia w funkcji od odkształcenia

Badania eksperymentalne pokazują, że właściwości materiału przy różnych temperaturach odkształcenia oraz wartości odkształcenia plastycznego charakteryzują się dużym rozrzutem, a więc zastosowanie technologii tradycyjnej nie prowadzi do oczekiwanego wyniku w przypadku półfabrykatów ze stali nierdzewnych o stosunku $l/d > 10$, ponieważ wzdłuż półfabrykatu wymienione wyżej parametry są zmienne. W tym przypadku jako optymalny można uważać proces technologiczny, w którym jest realizowana diagnostyka wyżej wymienionych parametrów, a sam proces jest sterowany przy uwzględnieniu indywidualnych charakterystyk fizyko-mechanicznych półfabrykatu.



Wykres 5.17. Zależność $F_{\max}$ od odkształcenia względnego



Wykres 5. 18. Zależność siły rozciągania w funkcji zmniejszenia naprężeń szczątkowych przy $T^\circ = 300^\circ\text{C}$ przy wygrzewaniu w ciągu 30min

W celu przeprowadzenia badania metalograficznego wykonało zglądy wzdłuż osi próbek – w miejscu rozerwania i w części cylindrycznej.

Analiza wyników pokazuje, że ziarna kryształów są wyciągnięte (szczególnie wyraźnie to widać w miejscu rozerwania). Analiza mikrostruktury próbek poddanych rozciąganiu na 10% przy temperaturze 300°C pokazuje, że odkształcenie o takiej wielkości nie powoduje znaczących zmian wymiarów i konfigu-

racji ziaren. Jest oczywiste, że wydłużenie próbki i zmniejszenie jej średnicy zachodzi w wyniku poślizgu między ziarnami metalu. Wstępne pomiary twardości pokazały, że twardość próbek po ich rozciąganiu przy temperaturach 200°C, 400°C, 600°C jest jednakowa i wynosi 25–26HRC. W strefie rozrywania twardość jest nieco wyższa i równa 28–32HRC. Najwyższa twardości w strefie rozrywania jest uzyskiwana przy temperaturze 400°C. Przy temperaturze 600°C twardość w strefie rozrywania praktycznie nie wzrasta i wynosi 26–27HRC.

Jednym z zadań badań laboratoryjnych była ocena odkształcenia plastycznego przy obróbce cieplno-mechanicznej wzdłuż próbki:

- wpływu parametrów geometrycznych próbki,
- parametrów temperaturowo-siłowych na wielkość odkształcenia po jej długości.

Wyniki badań eksperymentalnych na próbkach standardowych świadczą o tym, że można uzyskać równoważny i równomierny rozkład naprężeń szczątkowych oraz kumulację odkształceń plastycznych (w przypadku konstrukcji symetrycznych kumulacja odkształceń oznacza ich równość) w wyniku doboru parametrów obróbki, które znajdują się w zakresie $T^{\circ} = 200\text{--}250^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 3\text{--}5\%$, $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-3} \text{--} 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, kryterium lokalności od 1,1 do 1,15.

W związku ze zmniejszeniem efektywności obróbki wraz ze wzrostem początkowego skrzywienia części w procesie technologicznym wytwarzania wałów o małej sztywności, jest konieczne wykonanie wstępnego prostowania obniżającego wielkość bicia chociażby do 0,3mm.

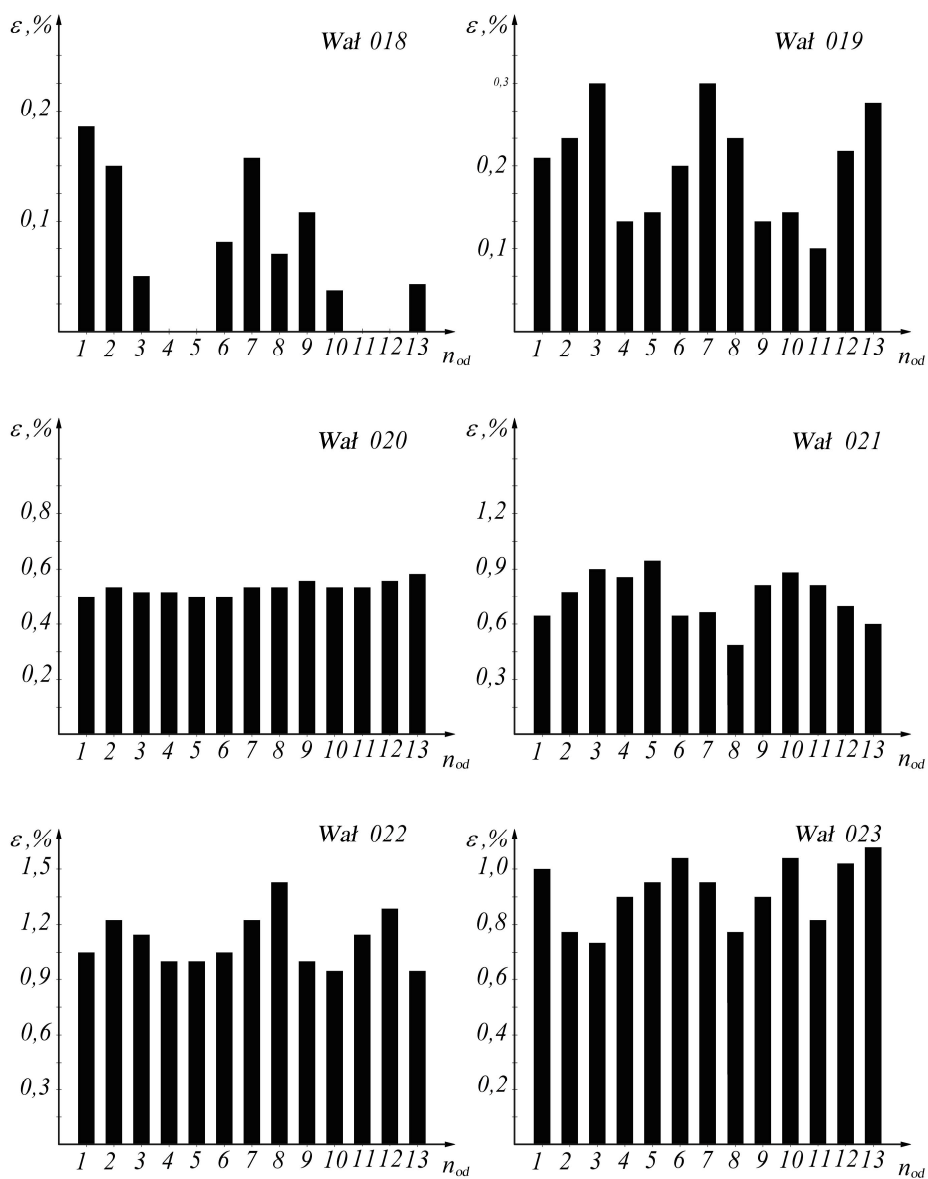
5.2. Badania eksperymentalne wpływu obróbki cieplno-mechanicznej na równomierność odkształcenia plastycznego

Do zakresu badań realizowanych na stanowisku eksperymentalno-przemysłowym wchodziło określenie wpływu obróbki cieplno-mechanicznej na lokalność odkształcenia plastycznego i wielkość bicia obrabianych wałów.

Badania prowadzono na próbkach o średnicy części roboczej 26mm i długości 1300mm. Przy opracowaniu wyników zbudowano wykresy lokalności (wykresy 5.19–5.20) oraz wykresy wpływu obróbki cieplno-mechanicznej na wielkość bicia obrabianych wałów (wykresy 5.21–5.22).

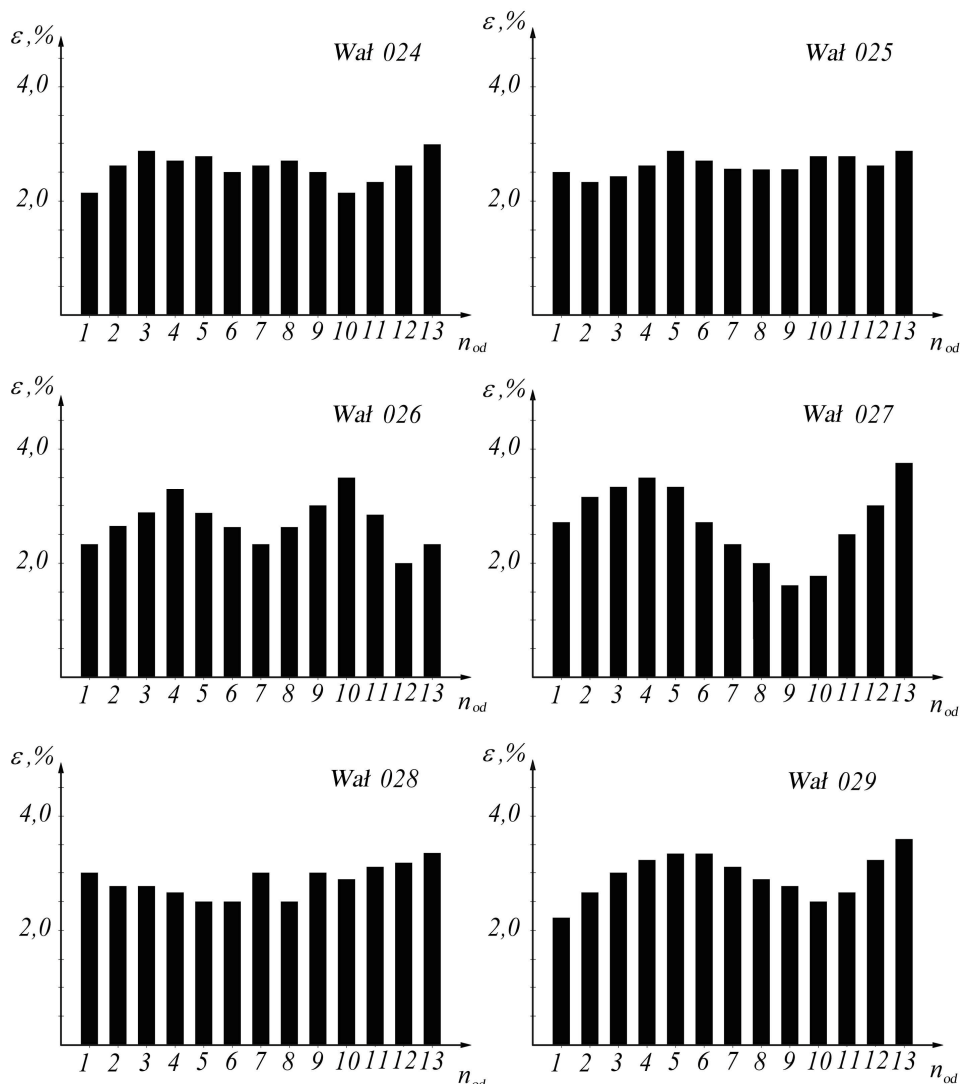
Na stanowisku eksperymentalno-przemysłowym przeprowadzono szereg badań procesu odkształcenia plastycznego zgodnie z metodyką opracowaną przy przeprowadzaniu analogicznych badań na próbkach doświadczalnych. Stopień odkształcenia został określony według znanej metodyki:

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_{oi}} \cdot 100\%$$



Wykres 5.19. Lokalność (obrabiane wały 019–023)

gdzie: ε_i – odkształcenie względne na i -tym odcinku;
 Δl_i – zmiana długości i -go odcinka po obróbce cieplno-mechanicznej;
 l_{oi} – długość początkowa i -go odcinka.



Wykres 5.20. Lokalność (obrabiane wały 024–029)

Według wyników badań zbudowano wykresy lokalności, zestawiono tablice wpływu parametrów obróbki na kryterium lokalności $l_{\max}$. Wielkość wartości kryteriów określa się według zależności:

$$l_{\max} = \frac{\varepsilon_{i\max}}{\varepsilon_{i\min}}$$

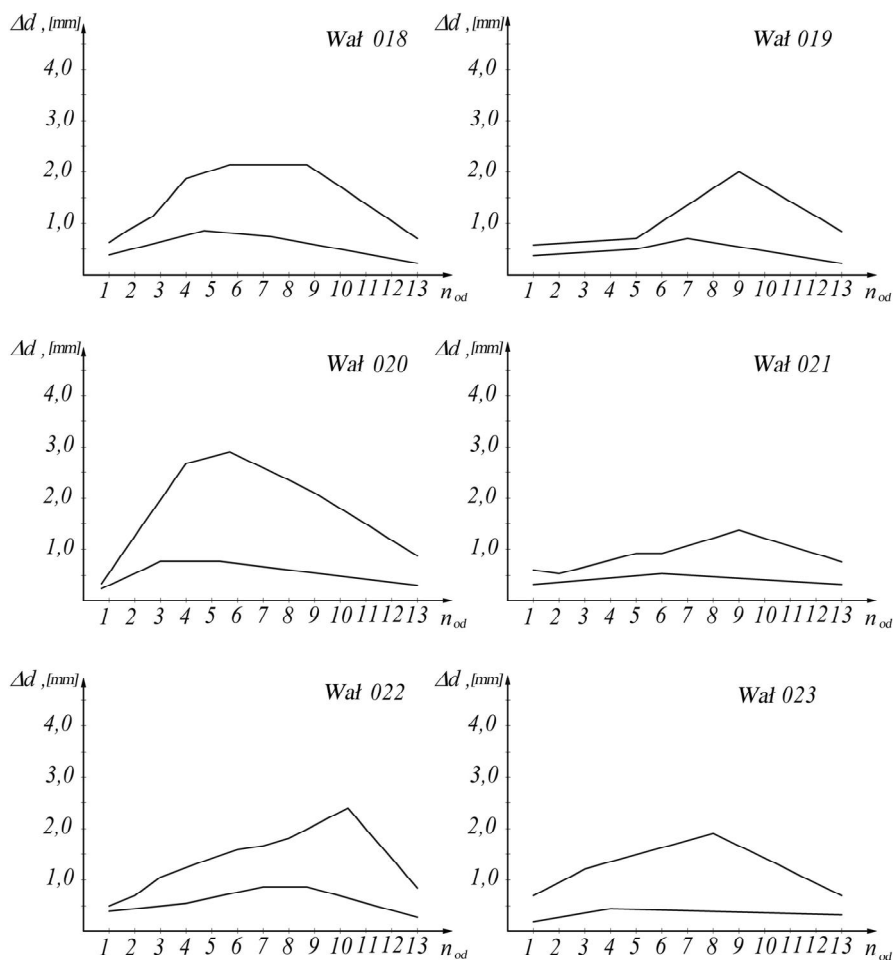
gdzie: $l_{\max}$ – maksymalne kryterium lokalności obrabianego półfabrykatu;

$\varepsilon_{i\max}$ – względne maksymalne odkształcenie odcinka,

$\varepsilon_{i\min}$ – względne minimalne odkształcenie.

W oparciu o otrzymane dane opracowano tabele wpływu temperatury obróbki, prędkości i stopnia odkształcenia na równomierność rozkładu odkształcenia plastycznego wzdłuż obrabianego wału (tab. 5.2 i 5.3).

Mimo pewnej niezgodności wyników w porównaniu z uzyskanymi w trakcie badań laboratoryjnych, można zalecać wybór trybu obróbki cieplno-mechanicznej w następujących zakresach: $T^{\circ} = 20^{\circ}\text{--}400^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 0,8\text{--}6\%$, $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-3}\text{--}1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$



Wykres 5.21. Wpływ parametrów obróbki cieplno-mechanicznej na wielkość bicia (wały obrabiane 019–023)

Tab. 5.2. Wpływ temperatury obróbki i prędkości odkształcenia na wartość kryteriów lokalności przy $\varepsilon = 2,0\%$

Prędkość odkształcenia $\dot{\varepsilon}$, s^{-1}	Kryteria lokalności $L_{\max}$					
	$T = 20$ [°C]	$T = 100$ [°C]	$T = 200$ [°C]	$T = 300$ [°C]	$T = 400$ [°C]	$T = 500$ [°C]
$5 \cdot 10^1$	2,25	2,25	2,30	2,30	2,30	2,65
$1 \cdot 10^{-2}$	1,30	1,25	1,30	1,30	1,30	1,95

Tab. 5.3. Wpływ stopnia odkształcenia na wartość kryteriów lokalności przy $T = 300^\circ C$, $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-3} s^{-1}$

Stopień odkształcenia, ε %	Kryterium lokalności $L_{\max}$	Stopień odkształcenia, ε %	Kryterium lokalności $L_{\max}$
0,1	3,2	1,0	1,35
0,3	2,2	2,0	1,25
0,6	1,80	4,0	1,15
0,8	1,40	6,0	1,10

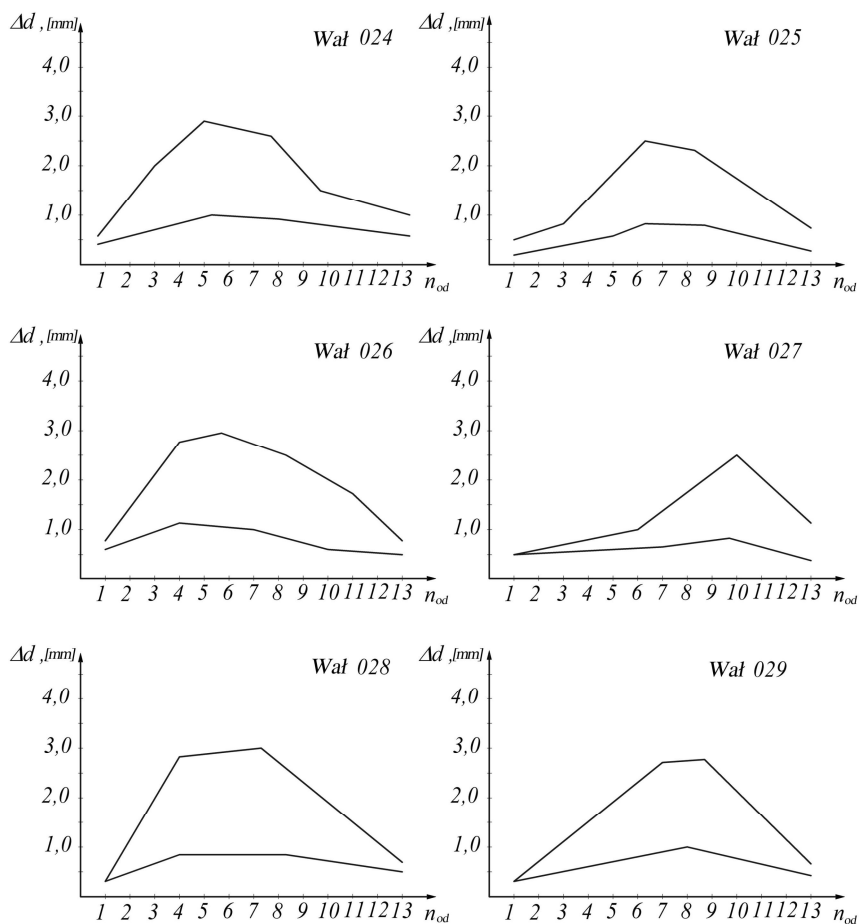
Obróbka w tym zakresie gwarantuje maksymalnie możliwą wymiarowość odkształcenia po objętości metalu z wartościami kryterium lokalności $L_{\max} = 1,10\text{--}1,4$. Praca była wykonywana według specjalnie opracowanej metodyki. Uzyskane dane zostały przedstawione w tab. 5.4–5.7, według nich zbudowano wykresy zmiany wielkości bicia (Δd) wzdłuż półfabrykatu (wykresy 5.19–5.20). Przy określaniu wpływu parametrów obróbki na paczenie jako kryterium przyjęto intensywność zmniejszenia bicia (K), wielkość, którego określono z zależności:

$$K = \frac{\Delta d_3}{\Delta d},$$

gdzie: Δd_3 – maksymalne bicie półfabrykatu przed obróbką cieplno-mechaniczną,
 Δd – maksymalne bicie półfabrykatu po obróbce cieplno-mechanicznej.

Tab.5.4. Wpływ temperatury obróbki (T), prędkości odkształcenia ($\dot{\varepsilon}$) na intensywność zmniejszenia bicia (K) przy $\varepsilon=3,0\%$; $\Delta d_3 = 3mm$

Prędkość odkształcenia $\dot{\varepsilon}$, s^{-1}	Intensywność zmniejszania bicia, K	
	$T = 300^\circ C$	$T = 400^\circ C$
$5 \cdot 10^1$	2,3	2,7
$1 \cdot 10^{-1}$	1,5	2,8
$1 \cdot 10^{-3}$	3,0	3,4



Wykres 5. 22. Wpływ obróbki cieplno-mechanicznej na wielkość bicia (obrabiane wały 024–029)

Tab.5.5. Wpływ odkształcenia (ε) na intensywność zmniejszenia bicia (K) w rezultacie obróbki cieplno-mechanicznej przy $T^\circ = 400^\circ C$, $\dot{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-3} s^{-1}$, $\Delta d_3 = 3 mm$

Stopień odkształcenia, ε %	Intensywność zmniejszenia bicia, K	Stopień odkształcenia, ε %	Intensywność zmniejszenia bicia, K
0,1	1,0	1,0	2,8
0,3	1,2	2,0	3,2
0,6	1,8	4,0	3,8
0,8	2,4	6,0	4,6

Tab.5.6. Wpływ wielkości początkowego skrzywienia próbki (Δd_3) na intensywność zmniejszenia bicia (K) w wyniku obróbki cieplno-mechanicznej przy $T^\circ = 400^\circ C$, $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-3} s^{-1}$, $\epsilon = 3,0\%$

Bicie początkowe, $\Delta d_3, mm$	Intensywność zmniejszenia bicia, K	Bicie początkowe, $\Delta d_3, mm$	Intensywność zmniejszenia bicia, K
0,8	2,0	3,0	3,6
1,5	3,1	4,0	3,0
2,0	3,5	5,0	3,1

Otrzymane dane dobrze odpowiadają wynikom uzyskanych przy przeprowadzaniu badań wpływu dziedziczności na paczenie części wykonanych z metalu z innej partii dostawy [43]. Przeprowadzając ocenę wyników badań należy odnotować, że obróbka cieplno-mechaniczna umożliwia wyrównywanie właściwości fizyko-mechanicznych w całej objętości materiału w wyniku doboru parametrów obróbki, zapewniających wartości kryterium lokalności odkształcenia równe $l_{\max} = 1,10-1,15$ a efektywność obróbki cieplno-mechanicznej z punktu widzenia zmniejszenia wielkości bicia znacznie się zmniejsza wraz ze wzrostem skrzywienia początkowego.

5.3. Badanie charakteru rozkładu temperatury w piecu sekcijnym przy różnych parametrach nagrzewania i ochładzania

Jedną z głównych przyczyn nierównomierności wewnętrznych naprężeń szczątkowych w metalu jest lokalność odkształcenia plastycznego. Częściowe zmniejszenie wielkości kryterium lokalności ($l_{\max}$) można osiągnąć w wyniku wyboru optymalnego trybu pracy przy obróbce cieplno-mechanicznej [43]. Zadawalającego efektu od zmniejszenia kryterium lokalności przy obróbce stali X10CrNi18-8 nie można uzyskać z powodu znacznej niejednorodności właściwości fizyko-mechanicznych materiału wzdłuż półfabrykatu. Wynika to ze skrajnie niejednorodnego rozkładu atomów elementów stopowych w krystalicznej strukturze metalu. Dlatego w celu obniżenia kryterium lokalności do wartości bliskich do jedności jest konieczne sterowanie rozkładem odkształcenia plastycznego w objętości metalu. Kontrola aktywna za stanem materiału w procesie nagrzewania i odkształcenia półfabrykatu umożliwia sterowanie objętościowymi naprężeniami szczątkowymi w całym czasie obróbki. W celu rozwiązania tego problemu wykonało piec sekcyjny (rozdz. 4.2 i 4.5) i przeprowadzono szereg badań.

Celem badań była obróbka i wybór parametrów sterowania nagrzewaniem i ochładzaniem sekcji. Prace przeprowadzano zgodnie ze specjalnie w tym celu opracowaną metodyką badań:

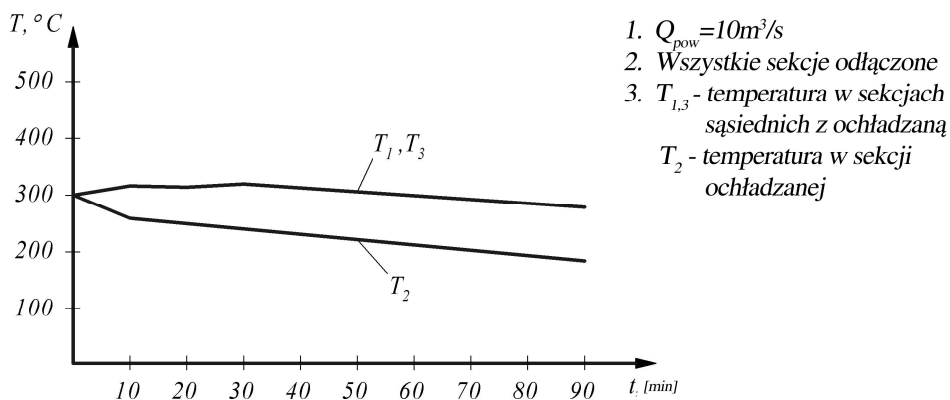
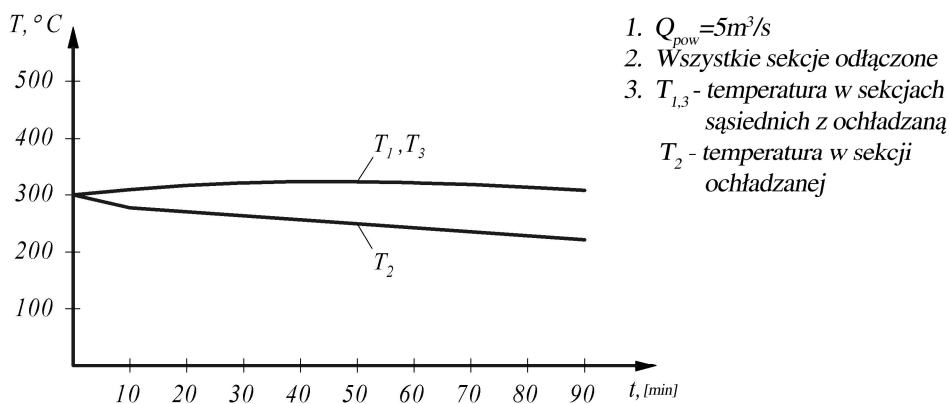
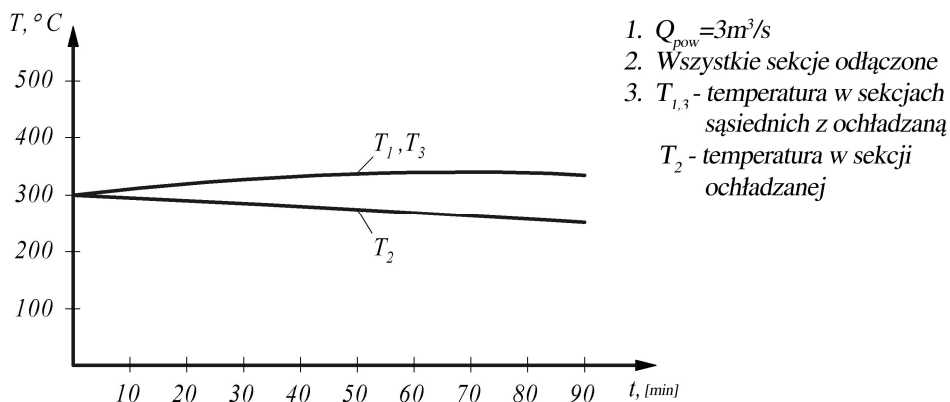
1. Stosować próbki znormalizowane o długości 1300mm oraz średnicy części roboczej 26mm.
2. Ustawić na próbce żebra rozdzielające.
3. Wstawić próbki do pieca trójsekcyjnego.
4. Sprawdzić jakość izolacji cieplnej na żebrach rozdzielających. W miarę potrzeby uzupełnić izolację cieplną w celu usunięcia szczelin między żebrami i wewnętrzną powierzchnią pieca szybowego.
5. Włączyć nagrzewnice elektryczne. $I = 50A$. $U = 40W$.
6. Nagrzać próbkę do wymaganej temp., zmierzyć prędkość nagrzewania.
7. Wyłączyć nagrzewnice elektryczne we wszystkich sekcjach.
8. Dostarczyć do centralnej sekcji sprężone powietrze z magistrali ($p = 60N/cm^2$) przez wymienną końcówkę ($d = 4mm$).
9. Mierzyć temperaturę w ciągu 90 minut.
10. Uzyskane dane zapisać do tabel, zbudować wykresy zmiany temp.
11. Sprawdzić punkty 8–10, zmieniając wymienne końcówki podawania powietrza do sekcji ($d = 6, 10, 15mm$).

Wyniki przeprowadzonych badań zestawiono w tabelach 5.2–5.7. Według tych badań zbudowano wykresy zmiany temperatury w sekcjach przy różnych parametrach ochładzania (wykresy 5.23–5.25).

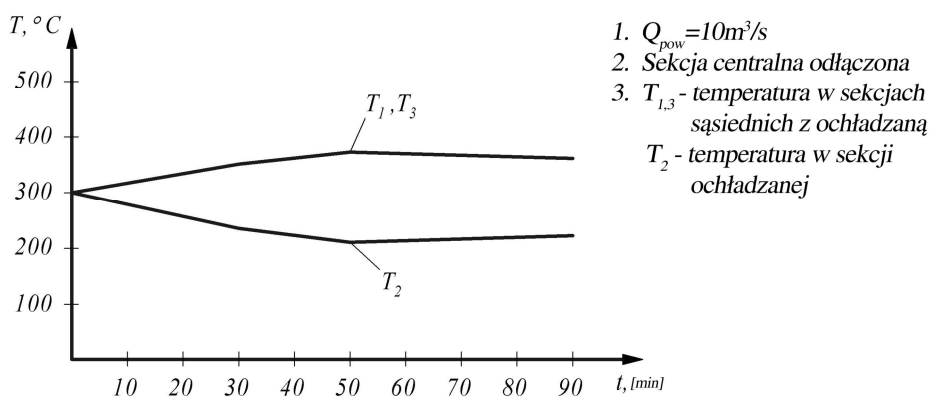
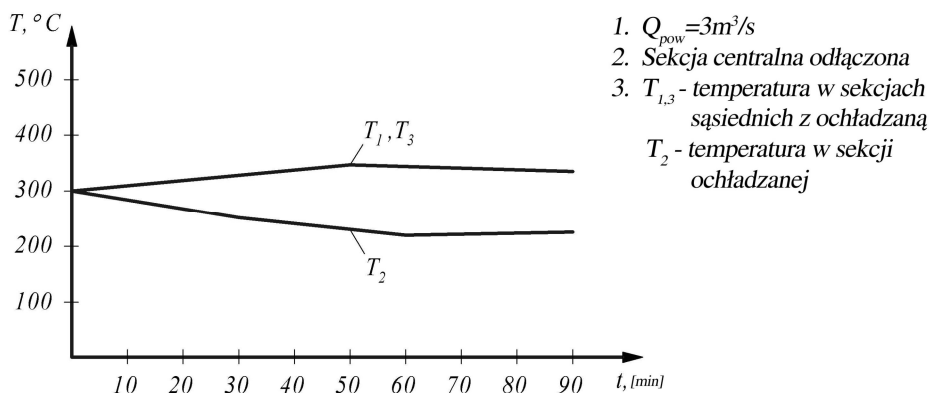
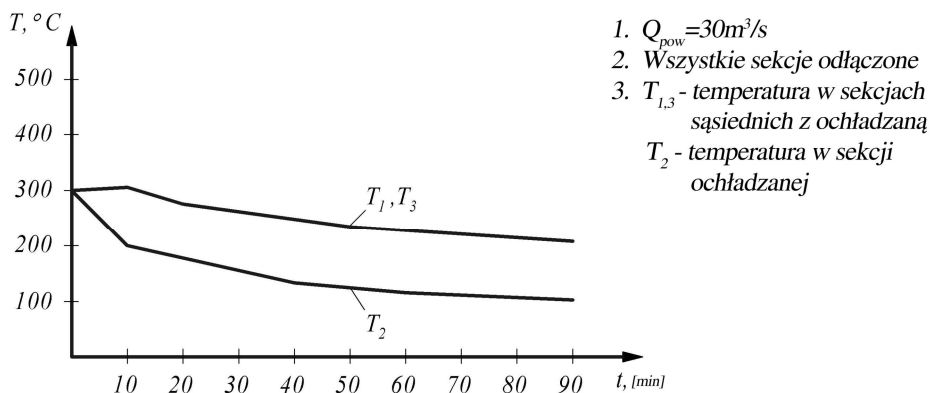
Konstrukcja pieca sekcyjnego do obróbki cieplno-mechanicznej zawiera piec szybowy z elektrycznymi elementami grzewczymi. Obrabiany półfabrykat jest ustawiany w pryzmie i umieszczany w piecu. Każda przegroda ma wejście i wyjście powietrza chłodzącego. Po ustawieniu na sztywno półfabrykatu są włączane nagrzewnice elektryczne do nagrzewania półfabrykatu. Bieżąca wartość temperatury jest określana przez termopary znajdujące się w każdej przegrodzie. Po osiągnięciu temperatury odpowiadającej reżimowi obróbki jest wtłaczany układ obciążenia. Ponieważ struktura metalu jest niejednorodna w różnych strefach półfabrykatu to czas osiągnięcia granicy plastyczności może być różny.

Rejestracja miejsca naruszenia proporcjonalności wydłużenia liniowego jest realizowana przy pomocy czujnika przemieszczeń liniowych. Nagrzewnice elektryczne sekcji w strefie, w której odnotowano wyprzedzające powstanie odkształcenia plastycznego w porównaniu do sąsiednich są wyłączane, natomiast jest włączana sprężarka podająca powietrze chłodzące. W strefie ochłodzonej powietrzem odkształcenie plastyczne przebiega wolniej.

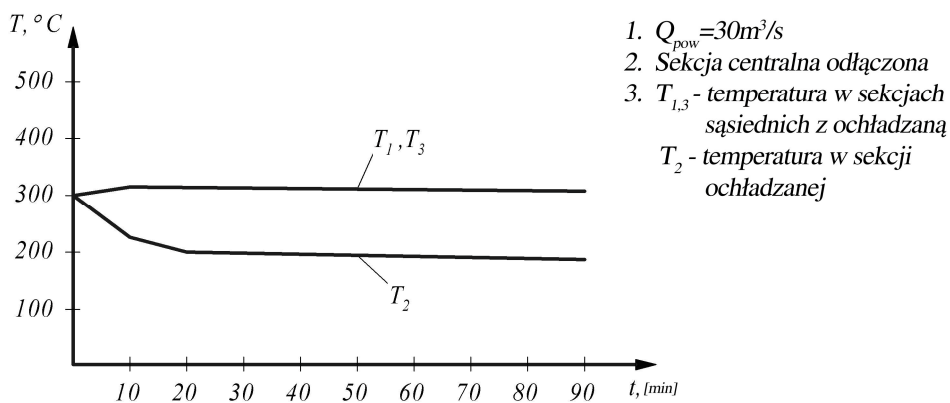
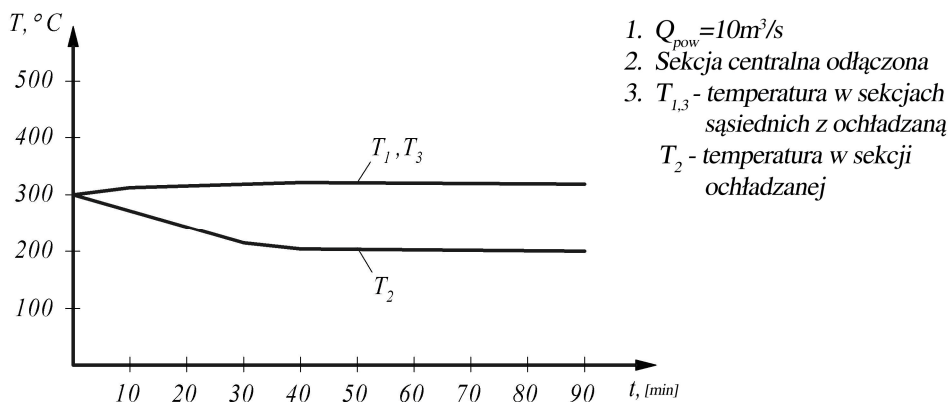
Badania zmiany temperatury w sekcjach w czasie po odłączeniu elementów grzewczych we wszystkich sekcjach przeprowadzono zgodnie z metodyką badań (rozdz. 5.3). Wyniki badań przedstawiono w tabelach 5.8–5.17.



Wykres 5.23. Zmiany temperatury w sekcjach



Wykres 5.24. Zmiany temperatury w sekcjach



Wykres 5.25. Zmiany temperatury w sekcjach

Według danych tabelach 5.8–5.11 zbudowano wykresy zmiany temperatury w sekcjach w procesie ochładzania (rys. 5.23–5.24).

Tab.5.8. Zmiana temperatury w sekcjach (T_1 , T_2 , T_3) w czasie przy wydatku powietrza $Q_{\text{pow.}} = 3 \text{ m}^3/\text{s}$

Nr sekcji	Oznaczenie Wymiary	Czas chłodzenia, min								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Sekcja 1	$T_1, ^\circ\text{C}$	315	320	325	330	335	340	335	330	325
Sekcja 2 (centr.)	$T_2, ^\circ\text{C}$	300	295	290	285	280	275	270	265	260
Sekcja 3	$T_3, ^\circ\text{C}$	315	320	325	330	335	340	335	330	325

Analiza uzyskanych danych pozwala stwierdzić, że chłodzenie sekcji powietrzem przy wartościach wydatku $Q_{\text{pow.}} = 30\text{m}^3/\text{s}$, odpowiadających umownej średnicy przewodu rurowego podawania powietrza $d_{\text{wej.}} = 15\text{--}20\text{mm}$ przy ciśnieniu w magistrali powietrznej $p_{\text{pow.}} = 60\text{N}/\text{cm}^2$, obniża temperaturę w chłodzonej sekcji w porównaniu z sąsiednimi o $90\text{--}100^\circ\text{C}$.

Tab.5.9. Pomiar temperatury w sekcjach (T_1 , T_2 , T_3) w czasie przy wydatku powietrza $Q_{\text{pow.}} = 5\text{m}^3/\text{s}$

Nr sekcji	Oznaczenie Wymiary	Czas chłodzenia, min								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Sekcja 1	$T_1, ^\circ\text{C}$	315	320	325	330	335	335	330	325	320
Sekcja 2 (centr.)	$T_2, ^\circ\text{C}$	385	280	275	270	265	260	255	250	245
Sekcja 3	$T_3, ^\circ\text{C}$	315	320	325	330	335	335	330	325	320

Tab.5.10. Pomiar temperatury w sekcjach (T_1 , T_2 , T_3) w czasie przy wydatku powietrza $Q_{\text{pow.}} = 10\text{m}^3/\text{s}$

Nr sekcji	Oznaczenie Wymiary	Czas chłodzenia, min								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Sekcja 1	$T_1, ^\circ\text{C}$	315	315	320	315	310	305	300	290	285
Sekcja 2 (centr.)	$T_2, ^\circ\text{C}$	270	260	250	240	230	220	210	200	190
Sekcja 3	$T_3, ^\circ\text{C}$	315	315	320	315	310	305	300	290	285

Tab.5.11. Pomiar temperatury w sekcjach (T_1 , T_2 , T_3) w czasie przy wydatku powietrza $Q_{\text{pow.}} = 30\text{m}^3/\text{s}$

Nr sekcji	Oznaczenie Wymiary	Czas chłodzenia, min								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Sekcja 1	$T_1, ^\circ\text{C}$	305	280	260	240	230	220	210	205	200
Sekcja 2 (centr.)	$T_2, ^\circ\text{C}$	210	185	165	145	130	120	115	110	105
Sekcja 3	$T_3, ^\circ\text{C}$	305	280	260	240	230	220	210	205	200

Gwarantuje to zmianę wartości granicy plastyczności q przypadku stali X10CrNi18-8 na $20\text{N}/\text{mm}^2$ przy nagrzanu półfabrykatu do 200°C . Wyniki badania w czasie zmiany temperatury w sekcjach przy odłączeniu elementów grzewczych sekcji centralnej przy jednoczesnym jej chłodzeniu przedstawiono w tabelach 5.12–5.15. Według danych z tabel 5.12–5.15 zbudowano wykresy zmiany temperatury w sekcjach w procesie ochładzania sekcji centralnej (rys. 5.24–5.25).

Analiza danych uzyskanych przy ochładzaniu centralnej sekcji z jednocześnie trwającym nagrzewaniem sekcji sąsiednich umożliwia stwierdzenie wyraźnej zależności temperatury sekcji od warunków ochładzania.

Uzyskane dane umożliwiają wybór optymalnych warunków ochładzania gwarantujących maksymalną prędkość spadku temperatur w sekcjach sąsiednich.

Tab.5.12. Pomiar temperatury w sekcjach (T_1 , T_2 , T_3) w czasie przy wydatku powietrza $Q_{\text{pow}} = 3\text{m}^3/\text{s}$

Nr sekcji	Oznaczenie Wymiary	Czas chłodzenia, min								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Sekcja 1	T_1 , °C	315	330	345	355	365	370	370	370	370
Sekcja 2 (centr.)	T_2 , °C	285	270	255	245	235	230	230	230	230
Sekcja 3	T_3 , °C	315	330	345	355	365	370	370	370	370

Tab.5.13. Pomiar temperatury w sekcjach (T_1 , T_2 , T_3) w czasie przy wydatku powietrza $Q_{\text{pow}} = 5\text{m}^3/\text{s}$

Nr sekcji	Oznaczenie Wymiary	Czas chłodzenia, min								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Sekcja 1	T_1 , °C	315	330	345	355	365	360	360	360	360
Sekcja 2 (centr.)	T_2 , °C	275	255	235	225	215	210	210	210	210
Sekcja 3	T_3 , °C	315	330	345	355	365	360	360	360	360

Tab.5.14. Pomiar temperatury w sekcjach (T_1 , T_2 , T_3) w czasie przy wydatku powietrza $Q_{\text{pow}} = 10\text{m}^3/\text{s}$

Nr sekcji	Oznaczenie Wymiary	Czas chłodzenia, min								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Sekcja 1	T_1 , °C	315	320	325	330	330	330	330	330	330
Sekcja 2 (centr.)	T_2 , °C	265	240	215	205	205	205	205	205	205
Sekcja 3	T_3 , °C	315	320	325	330	330	330	330	330	330

Tab.5.15. Pomiar temperatury w sekcjach (T_1 , T_2 , T_3) w czasie przy wydatku powietrza $Q_{\text{pow}} = 30\text{m}^3/\text{s}$

Nr sekcji	Oznaczenie Wymiary	Czas chłodzenia, min								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Sekcja 1	T_1 , °C	315	320	320	320	320	320	320	320	320
Sekcja 2 (centr.)	T_2 , °C	230	200	200	200	200	200	200	200	200
Sekcja 3	T_3 , °C	315	320	320	320	320	320	320	320	320

Do przeprowadzenia analizy porównawczej dane uzyskane podczas badań zestawiono w tabelach 5.16–5.17. Jako wskaźnik oceny wybrano różnicę temperatur w sąsiednich sekcjach, która jest określana według zależności:

$$\Delta T^\circ = 0,5(T_1^\circ + T_3^\circ) - T_2^\circ,$$

gdzie: T_2° – temperatura w centralnej chłodzonej sekcji,

T_1° i T_3° – temperatury w sąsiednich sekcjach z chłodzoną.

Analiza danych zamieszczonych w tab. 5.16–5.17 umożliwia określenie najważniejszych parametrów chłodzenia z punktu widzenia efektywności temperatury i szybkości działania sterowania. Przy wartości wydatku powietrza chłodzącego $Q_{\text{pow.}} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ zmiana temperatury o 100°C zachodzi praktycznie po 10–15 min od rozpoczęcia chłodzenia sekcji centralnej. Taka wartość wydatku odpowiada dopływowi powietrza chłodzącego z magistrali powietrznej ($p = 60 \text{ N/cm}^2$) przewodem rurowym o przekroju $d_{\text{wej}} = 15 \text{ mm}$.

Tab.5.16. Wpływ wydatku powietrza chłodzącego (Q_{pow}) na skok temperatury w sekcjach sąsiednich ΔT

Wydatek powietrza chłodzącego $Q_{\text{pow}}, \text{ m}^3/\text{s}$	Różnica temperatur w sąsiednich $\Delta T, ^\circ\text{C}$					
	$t=10$ min	$t=20$ min	$t=30$ min	$t=40$ min	$t=50$ min	$t=60$ min
3	15	25	35	45	55	65
5	30	40	50	60	70	75
10	45	55	70	75	80	85
30	95	95	95	95	100	100

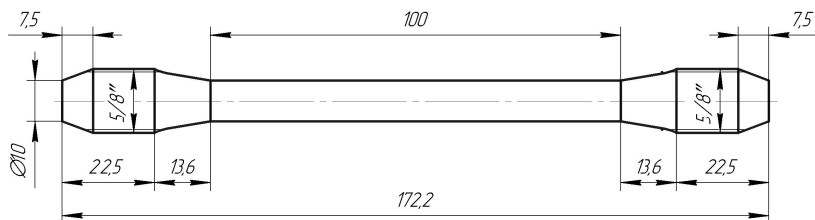
Tab.5.17. Wpływ wydatku powietrza chłodzącego (Q_{pow}) na skok temperatury w sekcjach sąsiednich ΔT

Wydatek powietrza chłodzącego $Q_{\text{pow}}, \text{ m}^3/\text{s}$	Różnica temperatur w sąsiednich $\Delta T, ^\circ\text{C}$					
	$t=10$ min	$t=20$ min	$t=30$ min	$t=40$ min	$t=50$ min	$t=60$ min
3	30	60	90	110	130	140
5	40	75	90	130	150	150
10	50	80	110	125	125	125
30	85	120	120	120	120	120

W celu uzyskania najbardziej racjonalnego trybu chłodzenia sekcji, umożliwiającego wystarczającą szybkość pracy układu sterowania uzyskaniem równomiernego odkształcenia plastycznego, średnica przewodu rurowego z powietrzem chłodzącym powinna być nie mniejsza niż 15 mm.

5.4. Badanie wpływu temperatury odkształcenia na warunki przemiany martenzytycznej

Badania były realizowane na maszynie wytrzymałościowej AMSLER (Szwajcaria). Próbki walcowe do badań były wykonane zgodnie z rysunkiem 5.1. W celu rozwiązania postawionego zadania opracowano specjalną metodykę badań. Wyniki przeprowadzonych badań są przedstawione w tabeli 5.18. Według danych z badań określono zależność granicy plastyczności (σ_{02}) i granicy wytrzymałości (σ_w) w zakresie temperatur 20–600°C (rys. 5.26).



Rys. 5.1. Rysunek próbki do badań

Powstanie martenzytu przy odkształceniu określano metodą rentgenowskiej analizy strukturalnej. Podstawą współczesnej rentgenowskiej analizy strukturalnej jest prawo Wulfa-Braggów, pokazujące warunki interferencji odbitych promieni rentgenowskich od atomów w równoległych płaszczyznach krystalograficznych. Promienie odbite od tych płaszczyzn ulegają wzajemnemu wzmocnieniu pod warunkiem, że różnica przemieszczenia Δ jest równa całkowitej liczbie długości fal λ .

$$\Delta = n \cdot \lambda = 2a \cdot \sin \theta, \quad (5.1)$$

gdzie: n – liczba naturalna,

λ – długość fali promieniowania rentgenowskiego,

a – odległość międzypłaszczyznowa,

θ – kąt padania i odbicia promieni rentgenowskich.

Przy strukturalnych badaniach rentgenowskich kryształów w siatkach sześciennych wykorzystuje się sześć płaszczyzn krawędzi sześcianu. Znając wskaźniki Millera dla płaszczyzn (h, k, l), można określić odległość międzypłaszczyznową a między płaszczyznami (h, k, l) danej rodziny, która jest określana w przypadku kryształów kubicznych z okresem siatki δ według zależności:

$$a = a_{(h,k,l)} = \frac{\delta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (5.2)$$

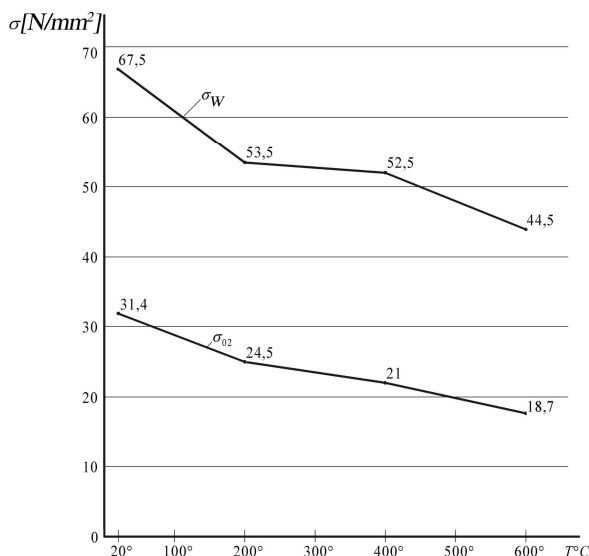
Z warunku interferencji promieni rentgenowskich (5.1) oraz zależności między odległością międzypłaszczyznową i okresem siatki (5.2) wynika, że sinus kąta pod, którym występuje maksimum interferencyjne w przypadku danej rodziny płaszczyzn krystalograficznych $n = 1$ można określić z zależności:

$$\sin \theta = \frac{\lambda \cdot \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{2a}. \quad (5.3)$$

Znając długość fali promieniowania rentgenowskiego λ i parametry siatki δ , można ustalić indeksy płaszczyzny (h, k, l) od których na rentgenogramie otrzymano linie odpowiadające różnym odbiciom.

Przedstawione zależności umożliwiają otrzymanie różnych wariantów informacji o odległościach międzypłaszczyznowych, o okresach siatki metalu, a także o występowaniu i stosunku ilościowym różnych faz w metalu.

Warunki Wulfa-Braggów (5.1) pokazują, że przy interferencji w siatce idealnie krystalicznej pod określonymi kątami powstają intensywne linie rentgenowskie. W związku z tym, że realne obiekty mają siatkę krystaliczną różniącą się od idealnej, rozmyte linie rentgenowskie niosą w sobie informację o stanie siatki krystalicznej. Badania zarysu i rozmycie linii rentgenowskich umożliwiają określenie stopnia przesycenia roztworów stałych, gęstości dyslokacji, wymiarów bloków i wielkości mikroskażeń w siatce krystalicznej. Po zmianie form linii można oceniać stopień odpuszczenia metalu i temperaturę początku rekrystalizacji.



Wykres 5.26. Zależność σ_{02} i σ_w od temperatury dla stali X10CrNi18-8

Tab. 5.18. Badania na rozciąganie na maszynie wytrzymałościowej formy AMSLER (Szwajcaria)

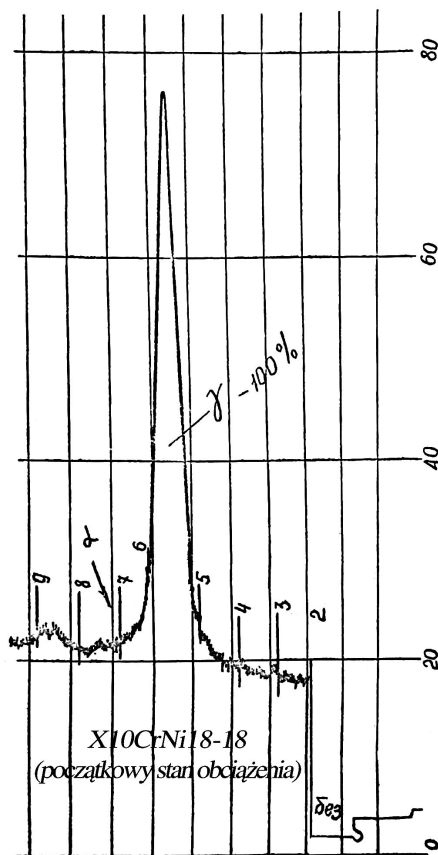
L.p.	Rodzaj eksperymentu	d_k , mm	F_k , mm ²	ψ , %	d_0 , mm	S_0 , mm ²	F_w , N	σ_w , N/mm ²	F_{02} , N	σ_{02} , N/mm ²	l_0 , mm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Bez podgrzewania próbki $T^o = 20^oC$	5,15	20,08	67	9,0	63,6	43000	67,5	20000	31,5	45
2	Z podgrzewaniem do 200^oC	5,35	22,5	66	9,25	67,2	36000	53,5	16500	24,5	45
3	Z podgrzewaniem do 400^oC	5,5	23,7	65	9,25	67,2	35300	52,5	14000	21	45
4	Z podgrzewaniem do 600^oC	5,5	23,7	65	9,25	67,2	30000	44,5	12400	18	45

Tab. 5.18. Ciąg dalszy

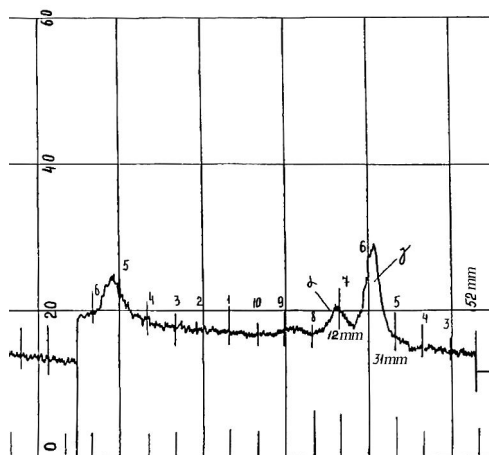
L.p.	Δl	δ_ξ	l_0	Δl	δ_{10}	Ugięcie początkowe f_{poc} , mm	Ugięcie końcowe f_{kon} , mm	Materiał
1	13	14	15	16	17	18	19	20
1	24,35	55	90	40,25	44,7	124 177	53 42,7%	X10CrNi18-8
2	18,8	42	90	30,7	34		austenit	
3	18,0	40	90	30,5	34		austenit	
4	17,75	39,5	90	26,5	29,5		austenit	

Określanie warunków powstawania martenzytu przy rozciąganiu próbek ze stali X10CrNi18-8 w zależności od temperatury odkształcania przeprowadzono przy temperaturach: 20°C, 200°C, 400°C, 600°C. Na przedstawionych wykresach (wykres 5.29) występuje jedno maksimum odpowiadające γ -fazie w metalu. W materiale wejściowym (nieodkształconym) również nie stwierdzono występowania α -fazy (wykres 5.27). Po rozerwaniu próbki przy temperaturze 20°C rentgenogram ma inny charakter (wykres 5.28). Są dwa maksima: jedno odpowiada zawartości austenitu, drugie – martenzytu. Porównanie powierzchni pod rentgenogramami pokazuje, że martenzyt stanowi 30% struktury metalu. A więc odkształcenie stali X10CrNi18-8 o stopniu odkształcenia $\varepsilon_{\text{sr}} = 20\%$ przy temperaturze 20°C prowadzi do powstania „martenzytu odkształcenia”.

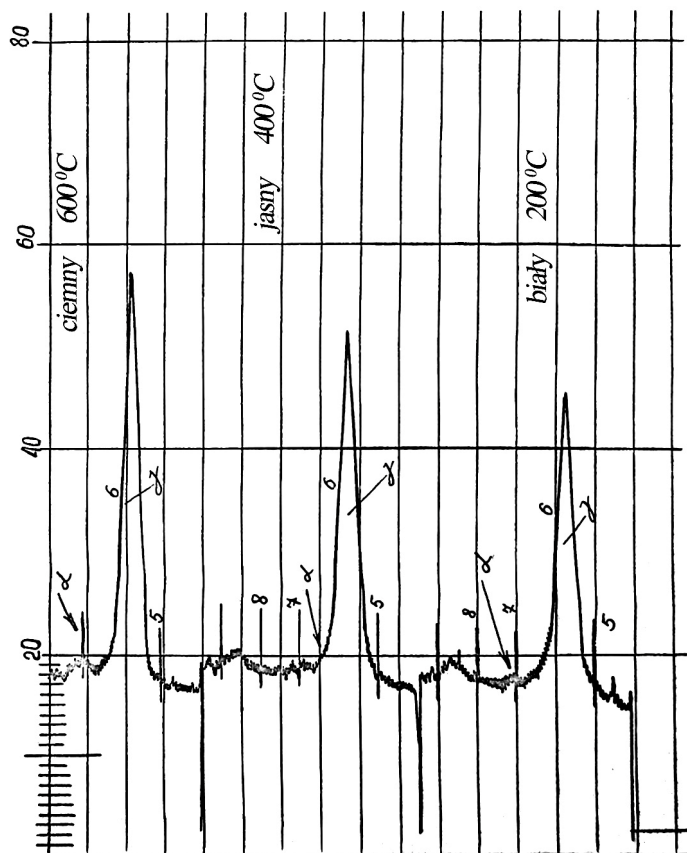
Przy rozciąganiu próbki przy temperaturach 200°C, 400°C, 600°C martenzyt nie powstaje (wykres 5.29). Przeprowadzenie obróbki cieplno-mechanicznej przy temperaturach 200°C i wyższych umożliwia, więc uzyskanie stabilnej struktury austenitu niezależnie od stopnia odkształcenia.



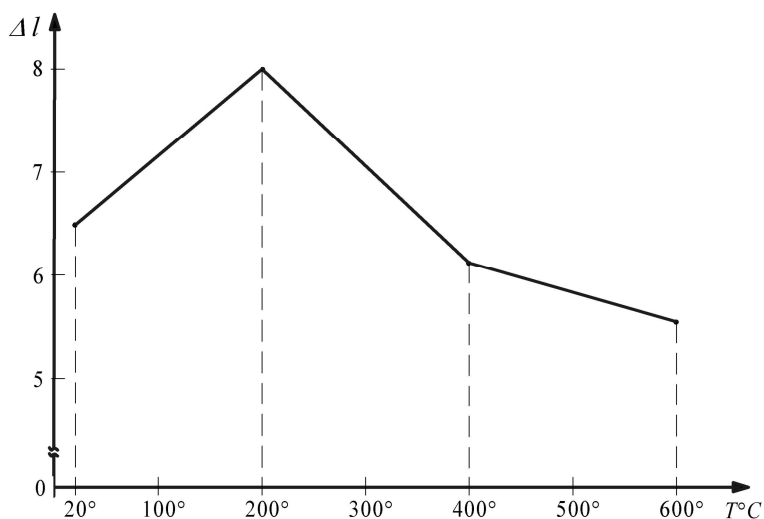
Wykres 5.29. Rentgenogram stanu początkowego metalu bez obciążenia



Wykres 5.28. Rentgenogram zerwania próbki



Wykres 5.29. Rentgenogram stanu próbki przy rozciąganiu przy temperaturach 200°C, 400°C, 600°C



Wykres 5.30. Zależność wydłużenia próbki pod obciążeniem od temperatury

Na podstawie wyników badań wpływu temperatury na właściwości mechaniczne stali X10CrNi18-8 (tab. 5.18) zostały zbudowane wykresy zależności granicy plastyczności (σ_{02}) i granicy wytrzymałości (σ_w) od temperatury odkształcenia (wykres 5.26). Uzyskano wykresy rozciągania przy różnych parametrach obróbki wykres 2.7, rozdz. 2.2), określono zależności wydłużenia (Δl) przy sile plastyczności (F_{02}) od temperatury (wykres 5.30).

Z porównania wykresów rozciągania przy temperaturach 200°C, 400°C, 600°C (wykres 2.7, rozdz. 2.2) wynika, że plastyczność ulega wyraźnemu obniżeniu. Można to wyjaśnić bardziej intensywnym przebiegiem rozdzielania międzykrystalicznego w umocnionej stali. Jednakowe wartości modułu Younga na wykresach rozciągania przy $T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$ i 200°C do stopnia odkształcenia $\varepsilon = 8\text{--}10\%$, a następnie wzrost modułu Younga na wykresie rozciągania przy $T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$ w porównaniu z jego wartością na wykresie przy $T^{\circ} = 200^{\circ}\text{C}$ wynika z powstania zauważalnej ilości α -fazy. Przy badaniu odporności korozyjnej stali X10CrNi18-8, określono „progową” wartość wielkości odkształcenia plastycznego, powyżej której skłonność do korozyjnego pęknięcia wyraźnie wzrasta. Strukturalna analiza rentgenowska i magnetyczno-metalograficzna pokazały, że obniżenie odporności korozyjnej w danych warunkach wynika z fazowego γ - α przekształcenia, spowodowanego odkształceniem plastycznym. Badania potwierdzają, więc możliwość odkształcania na zimno (przy $T^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$) austenitu bez powstawania „martenzytu odkształcenia” (przy $\varepsilon \leq 8\%$).

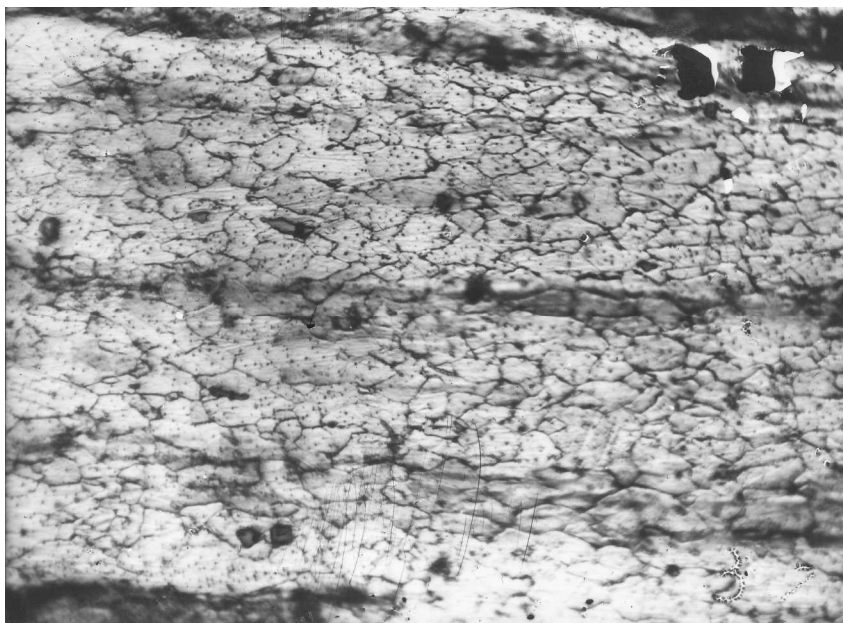
W procesie opracowania wyników uzyskanych przy badaniach próbek na rozzerwanie określono zależności granicy plastyczności (σ_{02}) i granicy wytrzymałości (σ_w) od temperatury odkształcenia (rys. 5.26).

Łamany charakter krzywej opisującej zmianę granicy wytrzymałości (σ_w) wynika z wpływu następujących czynników:

- powstaniem α -fazy przy obniżonych temperaturach, a więc bardziej intensywnym umocnieniem;
- bardziej intensywnym rozwojem międzykrystalicznego rozdzielania w umocnionym austenicie przy temperaturze 600°C.

Czynniki te okazują również wpływ na charakter krzywej na wykresie zależności wydłużenia próbki przy sile (F_{02}) od temperatury (rys. 5.30).

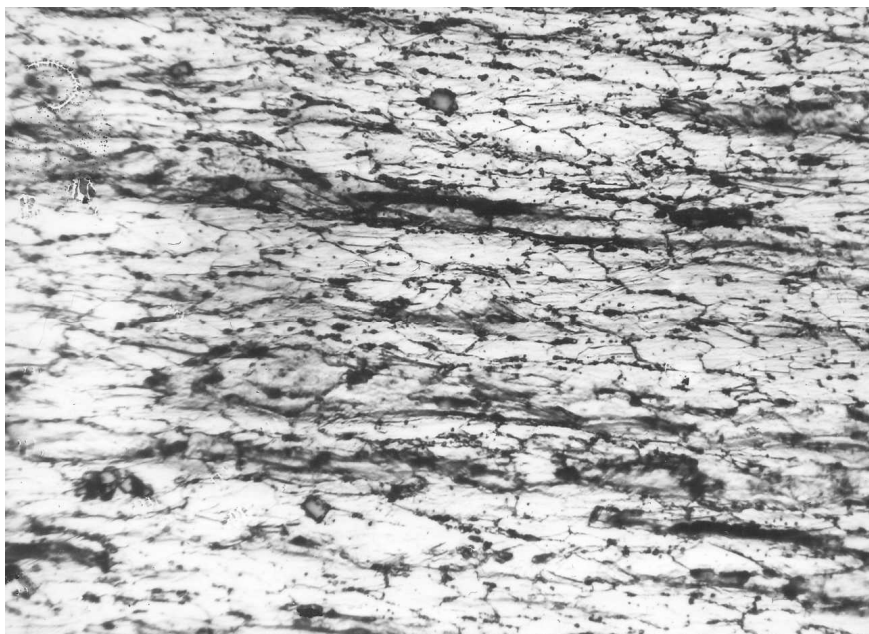
Przed przeprowadzeniem badań metalograficznych wykonano zglądy wzdłuż osi próbek – w miejscu rozerwania i części cylindrycznej. Analiza wyników pokazuje, że ziarna krysztalów są wyciągnięte (co szczególnie wyraźnie widać w miejscach rozerwania, rys. 5.2–5.5).



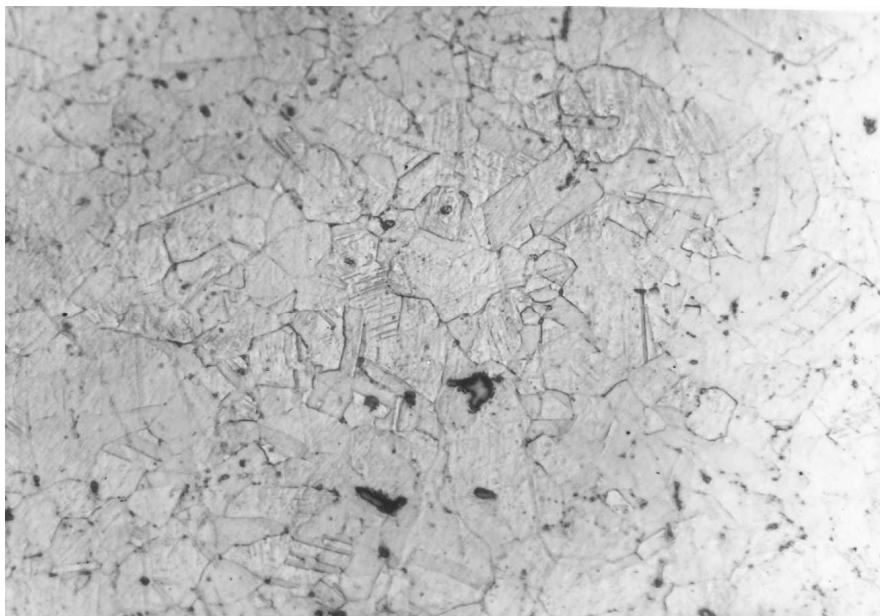
Rys. 5.2. Struktura próbki rozrywanej ($T^\circ = 20^\circ\text{C}$) przy 500-krotnym powiększeniu. Część cylindryczna



Rys. 5.3. Struktura próbki rozrywanej ($T^{\circ} = 200^{\circ}\text{C}$) przy 500-krotnym powiększeniu



Rys. 5.4. Struktura próbki rozrywanej ($T^{\circ} = 400^{\circ}\text{C}$) przy 500-krotnym powiększeniu



Rys. 5.5. Struktura próbki odkształconej na 10% przy $T^\circ = 300^\circ\text{C}$ – 500-krotne powiększenie

Analiza mikrostruktury próbek poddanych rozciąganiu na 10% przy temperaturze 300°C , pokazuje (rys. 5.5), że odkształcenie o takiej wielkości nie powoduje znaczących zmian wymiarów i konfiguracji ziarna. Wydłużenie próbki i zmniejszenie jej średnicy zaszło w wyniku poślizgu pomiędzy ziarnami metalu. Przeprowadzone eksperymenty umożliwiają wyciągnięcie następujących wniosków:

- obróbkę cieplno-mechaniczną wałów celowo jest realizować w zakresie temperatur $200\text{--}400^\circ\text{C}$;
- możliwa jest obróbka cieplno-mechaniczna stali X10CrNi18-8 przy $T^\circ = 20^\circ\text{C}$ bez powstania α -fazy przy stopniu odkształcenia plastycznego $\varepsilon \leq 8\%$;
- przy odkształceniu $\varepsilon < 10\%$ zmiana kształtu próbki zachodzi w wyniku makroodkształcenia w ziarnach oraz ich obrotu i poślizgu; wymiary ziaren przy tym nie ulegają zmianie.

5.5. Eksperymentalne badanie wpływu obróbki cieplno-mechanicznej przy hartowaniu na dokładność geometryczną wyrobów

Badania teoretycznie i eksperymentalne na próbkach umożliwiły przeprowadzenie aprobach zapropionowanych metod w warunkach rzeczywistych Urządzenie zastosowane przy hartowaniu zostało opisane w rozdz. 4.4. Należy tylko wspomnieć o istocie sposobu. Materiał elementu wykonawczego urządzenia posiada współczynnik rozszerzalności liniowej większy od współczynnika rozszerzalności liniowej materiału półfabrykatu i przy nagrzewaniu, w wyniku różnicy tych współczynników przy temperaturze hartowania, element wykonawczy wydłużając się odkształca część – „prostowanie na gorąco”. W celu uzyskania stałego obciążenia osiowego element wykonawczy jest wykonany jako wielowarstwowy, a jako wypełniacz zastosowano piasek kwarcowy (rys. 4.7).

Obrabiano wały pomp wykonane ze stali X30Cr13, a na element wykonawczy urządzenia zastosowano stal X10CrNi18-8. Parametry geometryczne półfabrykatu są następujące: długość 3400mm, średnica 45mm; długość gotowej części 3200mm, średnica 38mm. Parametry temperaturowe nie były zmieniane. Temperatura hartowania $T^{\circ} = 1000^{\circ}\text{--}1050^{\circ}\text{C}$ z chłodzeniem na powietrzu. Na końcach półfabrykatu został nacięty gwint do nakręcenia sferycznych chwytów. Mierzone było bicie półfabrykatu i gotowej części w dziesięciu przekrojach po całej jego długości, przy tym część ustawiano w dwóch pryzmach w taki sposób, aby wał był podzielony na trzy równe części. Według zaproponowanej technologii wał był obrabiany na tokarce przy zastosowaniu układu sterowania automatycznego [43] oraz w urządzeniu – prostowany i poddany obróbce cieplnej. Po ostygnięciu na powietrzu była przeprowadzona kontrola równomierności odkształcenia plastycznego wzdłuż wału, a także bicia w dziesięciu przekrojach i jednocześnie mierzona twardość wzdłuż wału.

Obróbka cieplna (hartowanie) przy zastosowaniu opracowanego urządzenia dała pozytywne wyniki: bicie wału nie było większe od $26\mu\text{m/m}$ i nie przekraczało nadkładu na obróbkę tokarską, współczynnik lokalności był rzędu 1,5–2,3 a rozrzut twardości nie przekraczał 12%.

Należy odnotować, że przy technologii tradycyjnej półfabrykat nie był obrabiany mechanicznie, a przy hartowaniu część była swobodnie podwieszona, w tym przypadku bicie wałów było w granicach 7–8mm. Stwierdzono, że po hartowaniu płaszczyzna maksymalnego ugięcia przemieszcza się w granicach $40^{\circ}\text{--}45^{\circ}$, co świadczy o występowaniu dużych naprężeń stycznych w półfabrykacie. Powstałe w trakcie hartowania maksymalne naprężenia podlegają intensywnej relaksacji w wyniku miejscowego odkształcenia plastycznego. W celu usunięcia relaksacji należy zmniejszyć działające naprężenia albo też zwiększyć wytrzymałość metalu na odkształcenie plastyczne, to znaczy, podwyższyć odporność na relaksację.

Zaproponowana technologia hartowania, w przypadku, kiedy jest operacją końcową, umożliwia uzyskanie zadawalającej dokładności geometrycznej, lecz nie gwarantuje stabilności kształtu przy dalszej obróbce mechanicznej realizowanej w celu kształtowaniu zarysu wzdłużnego części. Minimalizację poziomu naprężeń szczątkowych w całej objętości części, nie tylko przy jej wytwarzaniu, ale także przy eksploatacji, umożliwia zaproponowane podejście technologiczne opisane szczegółowo w rozdz. 4.2; a tutaj przedstawiono tylko pokrótce jego istotę. Oceniając wyniki badań obróbki cieplno-mechanicznej należy odnotować, że zastosowane podejście technologiczne umożliwia wyrównywanie właściwości fizyko-mechanicznych materiału, uzyskanie jednorodnego rozkładu odkształcenia plastycznego w całej objętości półfabrykatu oraz minimalizację poziomu naprężeń szczątkowych, a w wyniku minimum 5-krotne zmniejszenie paczenia wału.

Sposób przedkładany, w odróżnieniu od technologii konwencjonalnej, umożliwia usunięcie poprzedniej pamięci technologicznej i kształtowanie nowej – odpowiednio ukierunkowanej. Istotny wpływ na obróbkę mają parametry temperaturowe. Obróbka cieplno-mechanicznej powinna być realizowana w zakresie temperatur od 200°C do 400°C. Właściwości mechaniczne materiału w tym zakresie praktycznie nie ulegają zmianie, a wzrost twardości w tych warunkach jest praktycznie maksymalny. Struktura materiału przy tych parametrach nie ulega zmianie, a przy temperaturze odkształcenia w zakresie od 200°C do 400°C nie występuje umocnienie fazowe ($\gamma \rightarrow \alpha$ przekształcenie), które ma miejsce przy odkształceniu na zimno. Szczególnie należy odnotować, że na proces obróbki cieplno-mechanicznej mają wpływ naprężenia styczne.

Temperatura w płaszczyźnie maksymalnych odkształceń zmienia się o 40–45°C, a w niektórych przypadkach nawet o 60°C. Duży wpływ na dziedziczność technologiczną okazuje obróbka mechaniczna – toczenie. Dokładność obróbki mechanicznej, szczególnie w przekroju wzdłużnym, wpływa na paczenie półfabrykatów po obróbce cieplnej zarówno przy hartowaniu jak i odpuszczaniu. Przed prostowaniem na zimno i obróbką cieplno-mechaniczną półfabrykaty powinny być możliwie dokładnie, w granicach nadmiaru na wytworzenie, toczone. Badania na próbkach o różnej długości pokazały, że intensywne zwiększenie granicy sprężystości ma miejsce wraz ze zwiększeniem wymiarów półfabrykatu.

Sterowanie poziomem naprężeń szczątkowych tylko przy pomocy odkształceń plastycznych powinno być przeprowadzane w początkowym stadium procesu chłodzenia, kiedy to granica sprężystości jest niska i występuje słaba zależność granicy plastyczności od temperatury. Funkcja regulowania powinna, więc uwzględniać, jakie odkształcenia plastyczne należy wytworzyć na początku procesu chłodzenia, aby uzyskać minimalne naprężenia szczątkowe w końcowej fazie procesu. Eksperymentalne sprawdzenie podstawowych założeń teoretycznych pokazało zadawalającą zbieżność wyników obliczeniowych i badań eksperymentalnych. W celu uzyskania wymaganych parametrów geometrycznych i fizyko-mechanicznych przy wykorzystaniu bieżącej

informacji, w przypadku zastosowania opracowanej technologii, nie należy wykonywać obliczeń w oparciu o informację a priori. Zbudowane urządzenie eksperymentalne do obróbki cieplno-mechanicznej długich części jest wyposażone w układ kontroli czynnej, według określonego algorytmu, przebiegu procesu technologicznego i obwodów sterowania. Opracowano i wykonano urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej długich półfabrykatów przy temperaturach hartowania, umożliwiające minimalizację dziedziczności technologicznej krzywizny wału w wyniku osiowego odkształcenia plastycznego.

Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej części osiowosymetrycznych z układem sterowania

Urządzenie jest przeznaczone do zwiększenia dokładności geometrycznej części długich w wyniku usunięcia dziedziczności technologicznej poprzez stabilizację naprężeń szczątkowych i równomierne odkształcenie plastyczne półfabrykatu na całej jego długości przy parametrach temperaturowych odpuszczania, normalizacji i hartowania. Zakres efektywnego zastosowania to części o małej sztywności: trzpienie, wałki, półosie, śruby pociągowe, itd.

Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej – odpuszczania części osiowosymetrycznych z układ sterowania automatycznego

Urządzenie jest przeznaczone do zwiększenia dokładności geometrycznej długich części w wyniku usunięcia dziedziczności technologicznej drogą stabilizacji naprężeń szczątkowych na całej długości przy parametrach temperaturowych odpuszczania i normalizacji. Charakterystyka urządzenia jest przedstawiona w tabeli 5.19. Urządzenie umożliwia automatyczną diagnostykę i sterowanie operacją technologiczną obróbki cieplno-mechanicznej. Nowe w tej technologii obróbki cieplnej jest to, że do półfabrykatu są przykładane odpowiednie osiowe oddziaływania statyczne i dynamiczne przy jednoczesnym oddziaływaniu temperatury, zgodnie z procesem technologicznym: odpuszczania, wyżarzania itp. Przy tym jednocześnie są mierzone przyrosty średnic i wydłużeń półfabrykatu oraz oddziaływania zewnętrzne: siła osiowa i prędkość odkształcenia. Układ diagnostyki automatycznej odnotowuje moment, w którym uzyskiwane jest równomierne odkształcenie plastyczne wzdłuż półfabrykatu. Przy temperaturze nagrzewania półfabrykatu równej granicy odpuszczania niskiego są przykładane do niego osiowe oddziaływania dynamiczne o własnej częstotliwości rezonansowej odpowiadające wzdłużnym drganiom półfabrykatu.

W skład urządzenia wchodzi piec wyposażony w mechanizm rozciągania półfabrykatu, wibrator zamocowany na czole mechanizmu rozciągania osiowego i wyposażony w elementy diagnostyki kontroli sił przykładanych do półfabrykatu, przemieszczeń liniowych i temperatury nagrzewania pieca. Obróbka cieplno-mechaniczna długich wałów przy zastosowaniu sterowania automatycznego przebiegiem procesu technologicznego umożliwia 3–5-krotne zwiększenie wydajności obróbki, niezawodności oraz długowieczności gotowych wyrobów.

Tab. 5.19. Charakterystyki techniczne urządzenia do obróbki cieplno-mechanicznej

Parametr	Wartość
Średnica obrabianego półfabrykatu, mm	10–60
Długość obrabianego półfabrykatu, mm	10,00–4500
Przemieszczenie robocze zespołu obciążania, mm	0–350
Temperatura nagrzewania półfabrykatu, °C	do 1050
Obciążenie, T	1–80
Prędkość odkształcenia, s ⁻¹	10–1x10 ⁵
Prędkość nagrzewania półfabrykatu, °C / min	0–30
Prędkość chłodzenia półfabrykatu, °C / min	0,2–0,5

Układ sterowania automatycznego obróbką cieplno-mechaniczną przy odpuszczaniu umożliwia usunięcie dziedziczności technologicznej, ukształtowanie równomiernych wzdłuż półfabrykatu odkształceń plastycznych i minimalizację naprężeń osiowych. Wielkość odkształceń plastycznych mieści się w zakresie od 4 do 10%, a paczenie jest mniejsze od 10µm/m.

Urządzenie do obróbki cieplno-mechanicznej (hartowania) długich części

Przeznaczone jest do hartowania długich części o małej sztywności typu wał. Charakterystyka urządzenia jest przedstawiona w tab. 5.20.

Tab.5.20. Techniczne charakterystyki urządzenia do obróbki cieplnej (hartowania) długich części osiowosymetrycznych

Parametr	Wartość
Stosunek długości półfabrykatu do średnicy	10–120
Temperatura nagrzewania, °C	do 1300
Stosunek współczynników rozszerzenia materiału półfabrykatu i urządzenia	nie więcej niż 1,08

Obróbka części jest realizowana w elemencie wykonawczym urządzenia z równomiernie rozmieszczonymi otworami przelotowymi. Współczynnik rozszerzalności liniowej urządzenia jest niższy od współczynnika rozszerzalności liniowej obrabianej części, co umożliwia uzyskanie i utrzymanie naciągu osiowego części obrabianej w czasie stygnięcia. W procesie ochładzania powstają naprężenia w wyniku różnicy współczynników rozszerzalności liniowej. Urządzenia to powinno być zastosowanie do naciągu w odpowiednim momencie hartowania, co umożliwia zwiększenie wydajności wytwarzania części, zmniejszenie ilości materiału od 1,5 do 1,3 razy, uzyskanie dodatkowego umocnienia materiału od 15 do 20% oraz utrzymanie wysokiej dokładności wykonanej części o małej sztywności w procesie eksploatacji.

6. METODY ANALITYCZNE I EKSPERYMENTALNE KONTROLI ODKSZTAŁCEŃ ORAZ NAPRĘŻEŃ SZCZĄTKOWYCH W OPERACJACH OBRÓBKİ CIEPLNO-MECHANICZNEJ

6.1. Obliczanie osiowych naprężeń szczątkowych według zmiany ugięcia wału

Przy opracowywaniu technologii innowacyjnych, takich jak obróbka cieplno-mechaniczna, gdzie trzeba kontrolować parametry dokładnościowe wału zarówno w procesie wytwarzania jak i w całym okresie eksploatacji należy sprawdzać kształt wału i naprężenia szczątkowe powstające przy wytwarzaniu oraz ich relaksację w procesie eksploatacji.

Naprężenia szczątkowe posiadają wszystkie składowe naprężeń: osiowe, promieniowe i styczne. Przy długim wale naprężenia szczątkowe na jego różnych odcinkach są różne i na podstawie naprężeń w próbce wziętej z wału nie można wnioskować o naprężeniach szczątkowych występujących w całej części. Dlatego próbka do badania naprężeń szczątkowych w częściach typu wał na każdej operacji technologicznej powinna być modelem fizycznym o takim samym stosunku długości do średnicy jak w rzeczywistym wale.

Przeprowadzona analiza literaturowa umożliwia sformułowanie wniosku, że najbardziej odpowiednią metodą (w przypadku, kiedy należy określić poziom i znak osiowych naprężeń szczątkowych 1 rzędu na całej długości wału) jest metoda eksperymentalna, wyróżniająca się prostotą, dokładnością oraz wiarygodnością wyników, w której po zapisaniu ostatecznego wyniku jest automatycznie uwzględniany wpływ całego zestawu czynników.

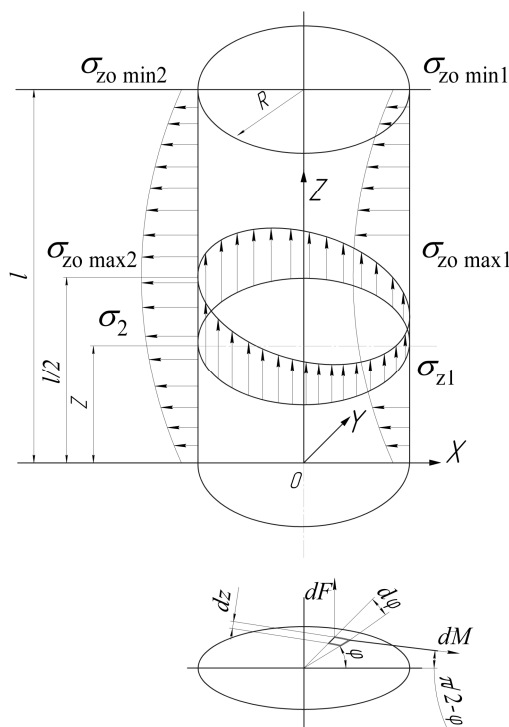
W próbkach (wałach) po określonej operacji technologicznej z jednej z powierzchni są zdejmowane cienkie słoje materiału i odnotowywane są przy tym ugięcia lub odkształcenia na przeciwległej stronie według, których są określane naprężenia szczątkowe.

Do osiągnięcia postawionego celu należy rozwiązać następujące problemy:

- uzasadnić i opisać matematycznie metodę określenia naprężeń szczątkowych według odkształceń początkowych na podstawie idei usunięcia cienkiej warstwy z powierzchni wału,
- opracować konstrukcje urządzeń do eksperymentalnego określania naprężeń szczątkowych poprzez usunięcie części próbki w wyniku obróbki elektrochemicznej,

- eksperymentalnie określić parametry wyjściowe pracy urządzeń do rozpuszczania anodowego,
- opracować metodykę określania naprężeń szczątkowych według odkształceń początkowych i określania rozkładu naprężeń szczątkowych w miarę zdejmowania zewnętrznych warstw ze zmierzonymi odkształceniami.

W celu uproszczenia obliczeń jest określone maksymalne paczenie bez uwzględniania czasu. Nierównomierność naprężeń szczątkowych wału powstaje w zasadzie w wyniku nierównomierności naddatku na obróbkę i bicia wału w wyniku początkowej krzywizny półfabrykatu. Dlatego wielkość osiowych naprężeń szczątkowych oznaczona jako σ_{zo} (rys. 6.1) jest mniejsza na końcach części i większa w jej środku. Oprócz tego zależność σ_{zo} od współrzędnych r , φ , z ma charakter monotoniczny.



Rys.6.1. Rozkład naprężeń szczątkowych

Określany jest moment sił wewnętrznych zginających wał. W przekroju o współrzędnej z jest wyodrębniana elementarna powierzchnia $dS = r dr d\varphi$. Na tę powierzchnię działa osiowa siła wewnętrzna $dF = \sigma_{zo}(r, \varphi, z) dS$. Elementarny moment tej siły względem środka przekroju jest równy:

$$d\bar{M}(z) = \bar{r} \times d\bar{F} . \quad (6.1)$$

Projekcję momentu sumarycznego sił wewnętrznych w całym przekroju można zapisać w postaci:

$$\left. \begin{aligned} M(z)_x &= \int_0^R \int_0^{2\pi} \sigma_{zo}(z, r, \varphi) r^2 dr \sin \varphi d\varphi \\ M(z)_y &= - \int_0^R \int_0^{2\pi} \sigma_{zo}(z, r, \varphi) r^2 dr \cos \varphi d\varphi \end{aligned} \right\}. \quad (6.2)$$

Całkowity moment w przekroju jest równy:

$$M(z) = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}. \quad (6.3)$$

Do określenia wielkości ugięcia wału Y zastosowano równanie różniczkowe ugiętej osi belki:

$$\frac{M(z)}{EJ} = \frac{d^2 y(z)}{dz^2}, \quad (6.4)$$

Rozwiązując je otrzymuje się równanie belki ugiętej:

$$y(z) = \frac{1}{EJ} \int dz \int M(z) dz + C_1 z + C_2. \quad (6.5)$$

Określana jest współrzędna z przy której ugięcie wału Y ma wartość maksymalną $dy/dz = 0$ oraz jest obliczana wielkość ugięcia maksymalnego. Obliczenia wykonano w przypadku następującej funkcji rozkładu naprężeń szczątkowych:

$$\sigma_{zo}(z, r, \varphi) = \frac{r^2}{K^2} \left\{ \cos \varphi \left[\frac{2(G-D)\left(z - \frac{1}{2}\right)^2}{l^2} - \frac{G}{2} \right] + \frac{K}{2} + \frac{2(N-K)\left(z - \frac{1}{2}\right)^2}{l^2} \right\}, \quad (6.6)$$

gdzie: $G = \sigma_{zo \max 2} - \sigma_{zo \max 1}$; $D = \sigma_{zo \min 2} - \sigma_{zo \min 1}$;

$$K = \sigma_{zo \max 2} + \sigma_{zo \max 1}; N = \sigma_{zo \min 2} + \sigma_{zo \min 1}. \quad (6.7)$$

Funkcja ta jest przedstawiona schematycznie na rysunku 6.1. Została uzyskana przy założeniu rozkładu parabolicznego w kierunkach: osiowym z i promieniowym r , a także według zasady *cosinusa* w kierunku obwodowym po współrzędnej φ .

Płaszczyzna współrzędnych xoz została przeprowadzona przez płaszczyznę średnicową wału o największych naprężeniach szczątkowych $\sigma_{zo \max 1}$ i $\sigma_{zo \max 2}$.

Określając wielkość $M(z)$, otrzymano $M(z)_x = 0$, ponieważ naprężenia są symetryczne odnośnie płaszczyzny współrzędnych xoz :

$$M(z) = M(z)_x = -\frac{\pi R^3}{10l^2} \left[4G - D \left(z - \frac{l}{2} \right)^2 - Gl^2 \right]. \quad (6.8)$$

Równanie ugiętej osi wału ma postać:

$$y(z) = \frac{\pi R^3 (G - D) l^2}{480 EJ} - \frac{\pi R^3 Gl^2}{20 EJ} - \frac{\pi R^3}{10 l^2 EJ} \left[\frac{(G - D) \left(z - \frac{l}{2} \right)^4}{3} - \frac{Gl^2 z^2}{2} \right]. \quad (6.9)$$

Maksymalne ugięcie, w wyniku symetrii rozkładu $\sigma_{zo}(z)$, wał posiada w środku, a więc:

$$y_{\max} = \frac{\pi R^3 l^2}{80 EJ} \left(\frac{5G - D}{6} \right). \quad (6.10)$$

Otrzymano zależność maksymalnego ugięcia wału na jednostkę długości Y/l od wielkości nierównomierności naprężeń szczątkowych

$$i = \frac{\sigma_{zo \max 2}}{\sigma_{zo \max 1}}. \quad (6.11)$$

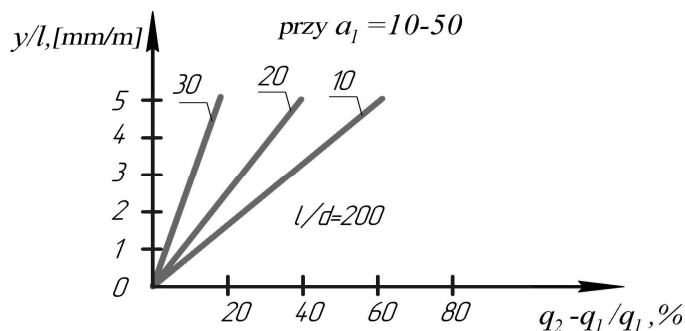
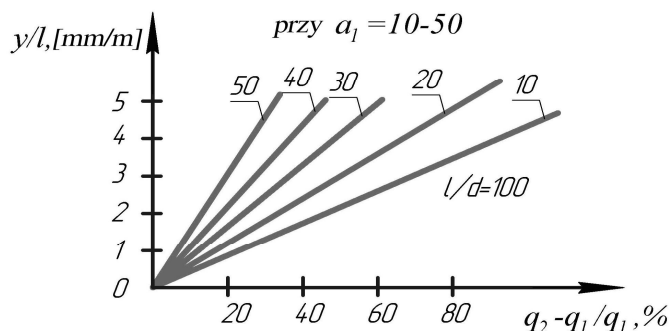
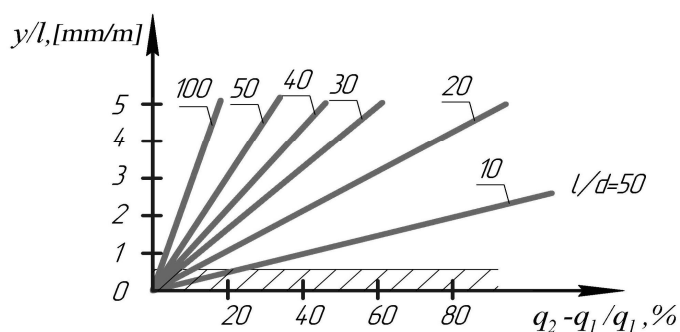
Uwzględniając, że $J = \frac{\pi R^4}{4}$, a także (6.6), otrzymano:

$$\frac{y_{\max}}{l} = \frac{1}{10} E \cdot \left(\frac{l}{d} \right) \cdot \sigma_{zo \max 1}. \quad (6.12)$$

Analiza otrzymanej zależności pokazuje, że ugięcie względne wału Y/l nieliniowo zależy od stosunku l/d , charakteryzującego sztywność wału i wielkości naprężeń szczątkowych σ_{zo} . Otrzymana zależność została przedstawiona na wykresie 6.1 w postaci wykresów, z których widać, że wielkość naprężeń szczątkowych wpływa na ugięcie wału. Im większa jest wartość bezwzględna tych naprężeń tym większe ugięcie półfabrykatów przy takim samym stosunku $(\sigma_{zo2} - \sigma_{zo1}) / \sigma_{zo1} \%$.

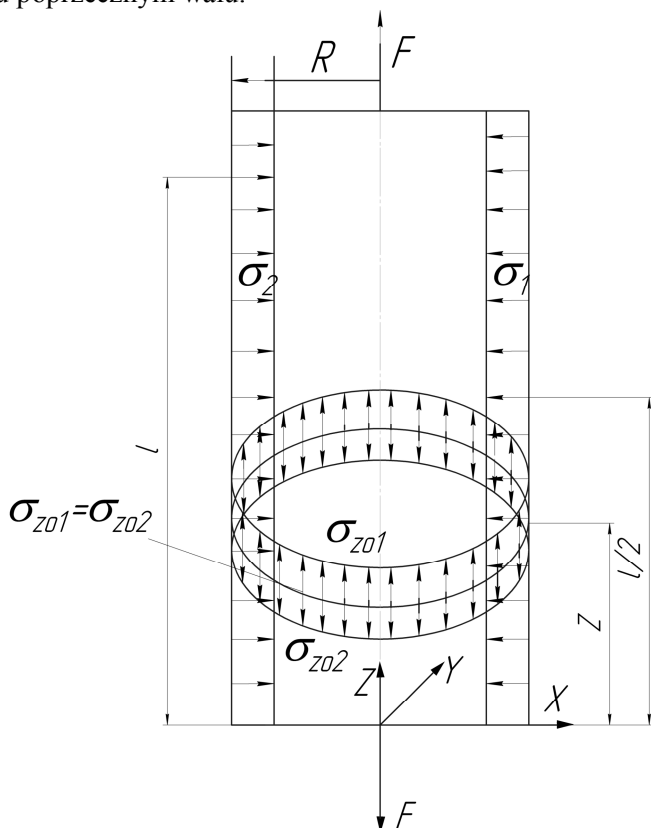
Na podstawie obliczeń teoretycznych można, więc wnioskować, że naprężenia w wale obrobionym powinny mieć maksymalne liczbowe wartości. O tym wniosku należy pamiętać przy opracowaniu technologii wytwarzania długich wałów. Z wykresu 6.1 widać, że ze wzrostem stosunku l/d wału, charakteryzującego sztywność, wpływ nierównomierności naprężeń szczątkowych wyraźnie się zwiększa. Analiza teoretyczna pokazuje, że przy obróbce części o małej sztywności jest niezbędna taka technologia, która pozwoliłaby na uzyskanie dokładności i zachowanie jej w okresie eksploatacji.

Parametry skrawania i obróbki cieplej powinny być określone nie z warunku wydajności, a z warunku minimalizacji poziomu naprężeń szczątkowych i ich równomierności po średnicy i długości gotowej części. Przeprowadzone obliczenia rozkładu naprężeń szczątkowych umożliwiają wyciągnięcie wniosku o konieczności przyłożenia osiowej siły rozciągającej w celu wyrównywania naprężeń szczątkowych.



Wykres 6.1. Zależność y/l od wielkości naprężeń szczątkowych i ich równomierności

Przy przyłożeniu osiowej siły rozciągającej do wału, jak to pokazano na rysunku 6.2, powstaje równomierny rozkład naprężeń szczątkowych wzdłuż i w przekroju poprzecznym wału.



Rys. 6.2. Rozkład naprężeń szczątkowych przy przyłożeniu osiowej siły rozciągającej

Z rysunku 6.2 widać, że naprężenia szczątkowe są stałe wzdłuż i w przekroju wału: σ_{zo} , $\sigma_{zo1} = \sigma_{zo2}$.

Zależności (6.6) przyjmą więc postać:

$$\begin{aligned} G &= \sigma_{zo \max 2} - \sigma_{zo \max 1} = 0; \\ D &= \sigma_{zo \min 2} - \sigma_{zo \min 1} = 0; \\ K &= \sigma_{zo \max 2} + \sigma_{zo \max 1} = 2\sigma_{zo}; \\ N &= \sigma_{zo \min 2} + \sigma_{zo \min 1} = 2\sigma_{zo}; \end{aligned}$$

Przy czym $K = N$.

Podstawiając uzyskane wartości do równania (6.6) otrzymano:

$$\sigma_{z_0}(r, \varphi, z) = \frac{r^2}{K^2} \left\{ \cos \varphi \left[\frac{2 \cdot \left(z - \frac{G}{2} \right)}{G^2} - \frac{\Gamma}{2} \right] + \frac{K}{2} + \frac{2(N-K) \left(z - \frac{l}{2} \right)^2}{l^2} \right\} =$$

$$= \frac{r^2}{K^2} \cdot \frac{K}{2} = \frac{r^2}{2K} = \frac{r^2}{4\sigma_{z_0}}. \quad (6.13)$$

Z zależności (6.13) widać, że przyłożenie osiowej siły rozciągającej w istotny sposób zmniejsza poziom naprężeń szczątkowych. W przypadku, kiedy osiowa siła rozciągająca jest wystarczająco duża (rys. 6.2) to umożliwia skompensowanie ugięcia.

$$y(z) = \frac{\pi R^3 G^3}{80EJ} \left(\frac{5G-D}{6} \right) \approx 0, \quad (6.14)$$

ponieważ $G = D = 0$.

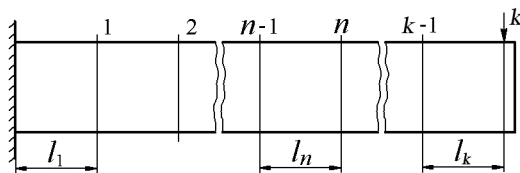
Z zależności (6.13) i (6.14) można, więc wnioskować, że osiowa siła rozciągająca wpływa na rozkład naprężeń szczątkowych i sprzyja obniżeniu ich poziomu.

6.2. Opracowanie metodyk określania naprężeń szczątkowych w próbkach wyciętych z wału

W procesie obróbki mechanicznej w warstwie powierzchniowej wałów powstają wszystkie składowe naprężeń szczątkowych: osiowe σ_z , obwodowe σ_θ , promieniowe σ_r i styczne $\tau_{z\theta}$. W przypadku wałów długich o dużej średnicy naprężenia te mogą ulegać zmianie w kierunkach wzdłużnym i obwodowym. Zastosowanie próbek c świadców nie daje gwarancji, że naprężenia szczątkowe będą odpowiadać naprężeniom w wałach rzeczywistych. Najbardziej wiarygodne wyniki są uzyskiwane w przypadku, kiedy naprężenia szczątkowe są określane bezpośrednio na częściach – wałach (eksperymentalnych) lub na wyciętych z nich próbkach.

Proces określenia naprężeń szczątkowych polega na rejestracji przemieszczeń (odkształceń) próbki w procesie jej trawienia, a następnie opracowaniu teoretycznym otrzymanej krzywej. Do tej pory w wielu laboratoriach ten proces jest wykonywany ręcznie i z czterech wyżej wymienionych składowych, określających naprężenia szczątkowe wału, są określane tylko naprężenia osiowe σ_{z_0} przy założeniu, że przekrój poprzeczny próbek (pasków) jest prostokątny) oraz σ_{θ_0} – na próbkach – pierścieniach. W rzeczywistości określone w taki sposób wielkości są całościowymi naprężeniami szczątkowymi osiowymi

oraz obwodowymi, tj. $\sigma_{zo} = (\sigma_z - \mu\sigma_\theta)$ i $\sigma_{\theta o} = (\sigma_\theta - \mu\sigma_z)$. Przy tym, z trzech składowych zależności do określania naprężeń szczątkowych jest uwzględniana tylko jedna, odpowiadająca pierwszej pochodnej od krzywej odkształcenia. Takie uproszczenie prowadzi do błędów, szczególnie istotnych przy określaniu naprężeń szczątkowych w próbkach dokładnych. Do jeszcze większych błędów prowadzi odchylenie kształtu od prostokąta w przekroju poprzecznym próbki, ponieważ metodyki tradycyjne dają miarodajne wyniki tylko w przypadku zastosowania ich do próbek o prostokątnym przekroju poprzecznym. Dlatego też, istotnym i aktualnym problemem jest opracowanie metodyki określania naprężeń szczątkowych w wałach długich o okrągłym przekroju poprzecznym, a także w próbkach wyciętych z wałów o dowolnym sektorowym przekroju pierścieniowym. Metodyka określenia naprężeń szczątkowych została opracowana dla najbardziej ogólnego przypadku – dowolnej długości l_n i liczbie odcinków k , na które wał jest dzielony (rys. 6.3) przy pomiarze jego ugięć w procesie trawienia.

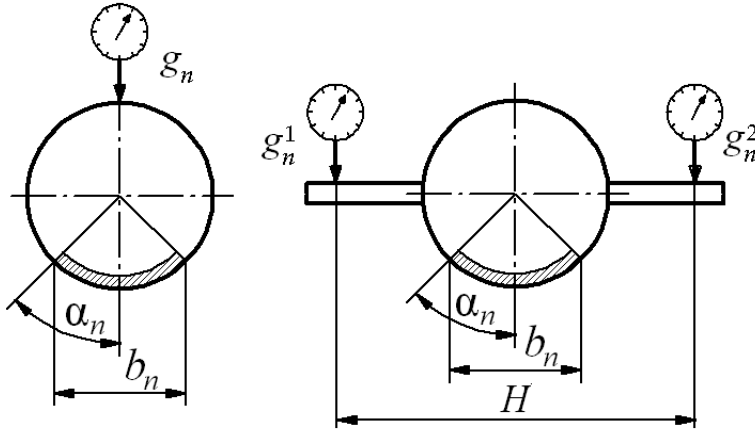


Rys. 6.3. Ogólny schemat podziału wału przy pomiarze

Przy jednostronnym wytrawianiu warstw powierzchniowych wał ulga odkształceniu. W przypadku każdego n -go przekroju są wykonywane pomiary czujnikami przemieszczeń według schematu: nr 1 – tylko ugięcia wału y_n (rys. 6.5 a); nr 2 – ugięcia y_n i kąty skręcania wału β_n (rys. 6.5 b); H – odległość między czujnikami:

$$y_n = 0,5(y_n^1 + y_n^2), \quad \beta_n = \frac{1}{H}(y_n^1 - y_n^2). \quad (6.15)$$

Według wielkości ugięć y_n są określone osiowe naprężenia szczątkowe $\sigma_n(\xi) = (\sigma_z - \mu\sigma_\theta)_n$, a w oparciu o kąty β_n – styczne naprężenia szczątkowe $\tau_{z\theta}(\xi)_n$. Analogiczne wymagania odnośnie pomiaru przemieszczeń są stawiane próbkom krótkim wycinanym z wału. W przypadku wałów i próbek o przekroju poprzecznym okrągłym i sektorowym przyjmuje się, że przemieszczenia liniowe do góry (zgodnie z rys. 6.3) są dodatnie i odpowiadają dodatnim osiowym naprężeniom szczątkowym. Przemieszczenie obrotowe zgodne ze wskazówką zegara, przy obserwacji z jej swobodnego końca, jest dodatnie i odpowiada dodatnim stycznym naprężeniom szczątkowym.



a) schemat 1

b) schemat2

Rys. 6.4. Schemat pomiaru odkształceń

Niezależnie od pokazanych wyżej schematów pomiaru określanie osiowych naprężeń szczątkowych $\sigma_n(\xi) = (\sigma_z - \mu\sigma_\theta)_n$ w przypadku n -go odcinka wału jest realizowane na podstawie krzywej odkształceniowej $f_n(\xi)$ według następujących zależności:

$$\sigma_n(\xi) = K_n (\sigma_{n,1}(\xi) + \sigma_{n,2}(\xi)), \quad (6.16)$$

gdzie: $K_n = \frac{E}{3 \cdot l_n^2};$

$$\sigma_{n,1}(\xi) = \phi_n \cdot \frac{df_n}{d\xi}; \quad (6.17)$$

$$\sigma_{n,2}(\xi) = -4\sqrt{\phi_n} \cdot f_n(\xi) + 2 \int_0^\xi f_n(\bar{\xi}) d\bar{\xi}, \quad (0 \leq \bar{\xi} \leq \xi).$$

Funkcja kształtu przekroju poprzecznego $\phi_n(\xi)$ jest określana zależnością:

$$\begin{aligned} \phi_n = & \frac{3}{r_n(r_n \sin \alpha_n + c_n \alpha_n)} \left\{ \pi R_n^2 (0, 25 R_n^2 + c_n^2) - \right. \\ & - 0, 25 (\alpha_n + 0, 5 \sin 2\alpha_n) (R_n^4 - r_n^4) - \\ & \left. - c_n \left[1, 33333 \cdot \sin \alpha_n \cdot (R_n^3 - r_n^3) + c_n \alpha_n (R_n^2 - r_n^2) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.19)$$

gdzie:

$$c_n = \frac{2 \cdot \sin \alpha_n \cdot (R_n^3 - r_n^3)}{3 \cdot [R_n^2 \cdot (\pi - \alpha_n) + \alpha_n \cdot r_n^2]}, \quad (6.19 \text{ a})$$

$$r_n = R_n - \xi_n, \quad \alpha_n = \arcsin\left(\frac{b_n}{2R_n}\right).$$

$f_n(\xi)$ jest określane zgodnie z zależnością:

$$f_n(\xi) = \frac{1}{\cos \theta_{n-1}} (S_n - l_n \sin \theta_{n-1}), \quad (6.20)$$

gdzie: $S_n(\xi) = g_n - g_{n-1}, \quad \theta_{n-1}(\xi) = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{f_i(\xi)}{l_i}. \quad (6.21)$

Przy $n = 1$ uzyskano $n - 1 = 0$, q więc wszystkie odpowiednie składowe należy przyrównać do zera.

Określenie stycznych naprężeń szczątkowych $\tau_n(\xi) = \tau_{z0}(\xi)_n$ jest możliwe tylko według drugiego schematu pomiaru przemieszczeń (rys. 6.4b).

W tym przypadku funkcją przemieszczeń każdego odcinka l_n wału jest $\varphi_n(\xi)$ – kąt skręcenia n -go odcinka wału określane na podstawie pełnych kątów skręcenia $\beta_n(\xi)$ zgodnie z zależnością:

$$\varphi_n(\xi) = \beta_n - \beta_{n-1}. \quad (6.22)$$

Obliczenia naprężeń szczątkowych stycznych są wykonywane wg zależności:

$$\tau_n(\xi) = \frac{G \cdot I_n(\xi)}{2R_n(R_n - \xi) \cdot \alpha_n l_n} \cdot \frac{d\varphi_n}{d\xi}, \quad (6.23)$$

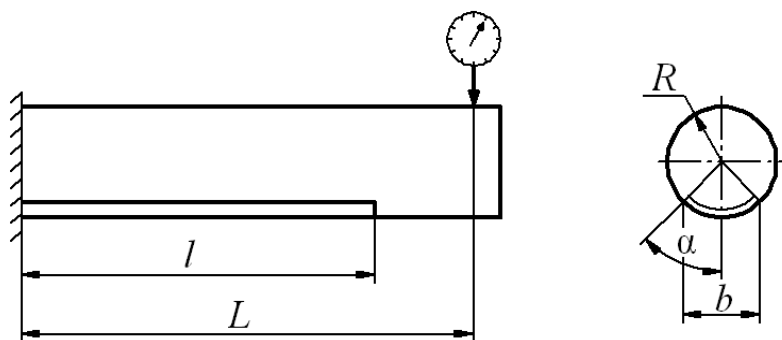
gdzie:

$$I_n(\xi) = 0, 5 \left[R_n^4 (\pi - \alpha_n) + \alpha_n (R_n - \xi)^4 \right], \quad (6.24)$$

α_n określane jest z zależności (6.19 a).

6.3. Określenie naprężeń szczątkowych w próbkach o okrągłym przekroju poprzecznym

Metodyka jest przeznaczona do określania naprężeń szczątkowych w wałach krótkich do 100–150 mm lub w próbkach o okrągłym przekroju poprzecznym wyciętych z wału o małej średnicy d (tj. odpowiadających warunkowi $l/d \geq 10$). Zakłada się przy tym, że naprężenia szczątkowe wzdłuż próbki są rozłożone równomiernie. Schemat mocowania wału i pomiaru przemieszczeń swobodnego końca w procesie trawienia warstw powierzchniowych jest pokazany na rysunku 6.6. W odróżnieniu od wałów krótkich przy wycinaniu próbek z wału długiego w wyniku jego odciążenia lub powstania nowych naprężeń szczątkowych są możliwe początkowe ugięcia próbek y_w .

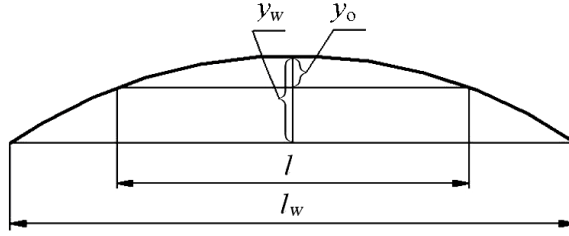


Rys. 6.5. Schemat mocowania próbki: l – długość odcinka trawienia, L – odległość od utwierdzenia do czujnika przemieszczeń (baza pomiarowa), R – promień przekroju poprzecznego próbki, b – szerokość wytrawiania

Przemieszczenia te są mierzone przy pomocy specjalnych środków pomiarowych i przeliczane na ugięcia y_o sprowadzone do długości odcinka trawienia l (rys. 6.6):

$$y_o = y_w \left(\frac{l}{l_w} \right)^2,$$

gdzie: l_w – baza pomiarowa początkowych ugięć próbek.



Rys. 6.6. Strefy maksymalnych ugięć

Podobnie jak w przypadku długich wałów, schemat pomiaru przemieszczeń próbki w procesie trawienia jest wybierany w zależności od rodzaju określanych naprężeń szczątkowych. Obliczenia osiowych naprężeń szczątkowych $\sigma_n(\xi) = (\sigma_z - \mu\sigma_\theta)_n$ są wykonywane w oparciu o krzywą odkształcenia $f(\xi)$ według następującej zależności:

$$\sigma_{zo}(\xi) = K(\sigma_0 + \sigma_1 + \sigma_2), \quad (6.25)$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot l^2};$$

gdzie: $\sigma_0(\xi) = 12f_0(\sqrt{\phi} - \xi); \quad (6.26)$

$$\sigma_1(\xi) = \phi \cdot \frac{df}{d\xi};$$

$$\sigma_2(\xi) = -4\sqrt{\phi} \cdot f(\xi) + 2 \int_0^\xi f(\bar{\xi}) d\bar{\xi}, \quad (0 \leq \bar{\xi} \leq \xi).$$

Funkcja przemieszczeń $f(\xi)$ jest określana jako:

$$f(\xi) = g \cdot \frac{l}{2L - l}, \quad (6.27)$$

gdzie: g – ugięcia próbki mierzone za pomocą czujnika przemieszczeń według schematu nr 1 lub $y = 0, 5(y^I + y^2)$ – zgodnie z (6.15) przy pomiarze przemieszczeń według schematu nr 2.

Funkcja kształtu przekroju poprzecznego $\phi(\xi)$ jest określana jako:

$$\begin{aligned} \phi_n = & \frac{3}{r \cdot (r \sin \alpha + c \cdot \alpha)} \{ \pi R^2 (0, 25R^2 + c^2) - \\ & - 0,25(\alpha + 0,5 \sin 2\alpha) (R^4 - r^4) - \\ & - c \cdot [1, 33333 \cdot \sin \alpha \cdot (R^3 - r^3) + c \cdot \alpha \cdot (R^2 - r^2)] \} \end{aligned} \quad (6.28)$$

gdzie:

$$c = \frac{2 \cdot \sin \alpha \cdot (R^3 - r^3)}{3 \cdot [R^2 \cdot (\pi - \alpha) + \alpha \cdot r^2]}, \quad (6.29)$$

$$r = R - \xi, \quad \alpha = \arcsin\left(\frac{b}{2R}\right).$$

Określenie stycznych naprężeń szczątkowych $\tau_{z\theta}(\xi)$ w próbkach jest realizowane w oparciu o funkcje przemieszczeń kątowych $\varphi(\xi)$, która zgodnie z (6.15) jest określana analogicznie do β_n z zależności:

$$\varphi(\xi) = \frac{1}{H}(y^1 - y^2). \quad (6.30)$$

Naprężenia szczątkowe styczne są więc określane z zależności (9) i (10) z których wyklucza się indeks n :

$$\tau_{z\theta}(\xi) = \frac{G \cdot I(\xi)}{2R(R - \xi) \cdot \alpha \cdot l} \cdot \frac{d\varphi}{d\xi}, \quad (6.31)$$

gdzie:

$$I(\xi) = 0,5[R^4(\pi - \alpha) + \alpha \cdot (R - \xi)^4],$$

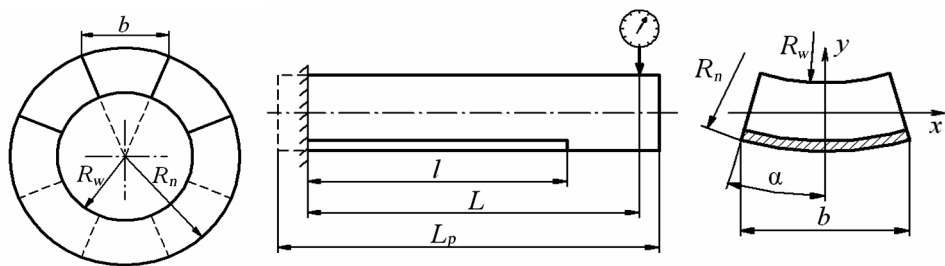
$$\alpha = \arcsin\left(\frac{b}{2R}\right). \quad (6.32)$$

6.4. Określanie naprężeń szczątkowych w próbkach o pierścieniowym i sektorowym przekroju poprzecznym

Takie próbki są stosowane wtedy, kiedy należy określić rozkład naprężeń szczątkowych w kierunku obwodowym w wałach o dużej średnicy $d = 2R_n$. W przypadku gdy wał jest pełny to zaleca się pociąć go na próbki – walce i wywiercić w nich otwory (rys. 6.8), określając pełną długość próbek L_p i promień wewnętrzny R_w z warunków:

$$\frac{L_p}{h} \geq 12, \quad \frac{R_n}{h} \geq 5 \quad \text{ i } \quad \frac{h}{a} \geq 10 \dots 20, \quad (6.33)$$

gdzie: $h = (R_n - R_w)$ – grubość próbki;
 a – zakładana grubość warstwy wytrawionej.



Rys. 6.7. Widok ogólny próbek

Usunięcie części wewnętrznej próbki prowadzi do nowego rozkładu naprężeń szczątkowych i zmian długości ΔL oraz średnicy Δd cylindra. Zachodzące przy tym zmiany osiowych naprężeń szczątkowych: $\Delta\sigma_{z0} = \Delta(\sigma_z - \mu\sigma_\theta)$ i obwodowych: $\Delta\sigma_{\theta0} = \Delta(\sigma_\theta - \mu\sigma_z)$ można ocenić z zależności:

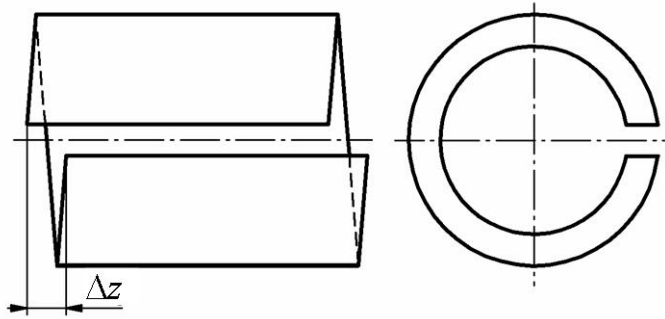
$$\Delta\sigma_{z0} = \frac{\Delta L}{L_n} E, \quad (6.34)$$

$$\Delta\sigma_{\theta0} = \frac{\Delta d}{d} E. \quad (6.35)$$

Znak naprężeń w tym przypadku jest taki sam jak znak zmian wymiarów. W celu wyeliminowania istotnego wpływu technologicznych naprężeń szczątkowych, powstających przy cięciu walca na walcowe próbki sektorowe, szerokość próbki b jest określana z warunku:

$$b > 2h. \quad (6.36)$$

W wyniku wykonania pierwszego rozcięcia walca wzdłuż jego tworzącej powierzchnie czołowe mogą ulec wzajemnemu przemieszczeniu osiowemu o Δz (rys. 6.8). Próbki sektorowe mają ugięcia początkowe y_w , które według zależności (6.24) są przeliczane na ugięcia sprowadzone y_0 . Pojawienie się przemieszczenia Δz świadczy o występowaniu w walcu stycznych naprężeń szczątkowych $\tau_{z\theta}(\xi)$. Pomiar wielkości Δd i Δz jest wykonywany przy zastosowaniu standardowych narzędzi pomiarowych z dokładnością 1–2 μm . Schemat pomiaru przemieszczeń próbki w procesie trawienia jest wybierany w zależności od rodzaju określanych naprężeń szczątkowych (w przypadku osiowych naprężeń szczątkowych – schemat nr 1, a osiowych i stycznych naprężeń szczątkowych – schemat nr 2).



Rys. 6.8. Schemat odkształceń osiowych

Obliczanie osiowych naprężeń szczątkowych $\sigma_{z0}(\xi) = (\sigma_z - \mu\sigma_\theta)$ jest wykonywane w oparciu o krzywą odkształcenia $y(\xi)$ według zależności:

$$\sigma_{z0}(\xi) = K(\sigma_0 + \sigma_1 + \sigma_2) + \Delta\sigma_{z0}, \quad (6.37)$$

gdzie $f(\xi)$ i $\Delta\sigma_{z0}$ są określane zgodnie z formułami (6.27) i (6.34):

$$f(\xi) = g \cdot \frac{l}{2L-l}, \quad \Delta\sigma_{z,sz} = \frac{\Delta L}{L_n} E,$$

wartości K , σ_0 , σ_1 , σ_2 są obliczane z zależności (6.26).

Funkcja kształtu sektorowego przekroju poprzecznego $\phi(\xi)$ jest określana jako:

$$\phi = \frac{r + R_w}{r(r^2 + rR_w - 2R_w^2)\sin\alpha} \left\{ 2, 25(r^4 - R_w^4) \cdot (\alpha + 0,5\sin 2\alpha) - \frac{4[(r^3 - R_w^3)\sin\alpha]}{(r^2 - R_w^2) \cdot \alpha} \right\} \quad (6.38)$$

gdzie:

$$r = R_n - \xi, \quad \alpha = \arcsin\left(\frac{b}{2R_n}\right). \quad (6.39)$$

Naprężenia szczątkowe styczne $\tau_{z\theta}(\xi)$ w sektorowych próbkach pierścieniowych są określone zgodnie z [68]. W przypadku ogólnym $\tau_{z\theta}(\xi)$ można tylko wyznaczyć drogą liczbowego rozwiązania równania całkowego:

$$\theta(a) = \int_{R_w}^{R_n-a} H(a,r) \cdot \tau_{z\theta}(r) dr, \quad (6.40)$$

gdzie:

$$G(a, r) = \frac{1}{GI_k(a)} \left\{ -2\alpha r^2 + \frac{\alpha[(R_n - a)^2 - R_w^2]}{\ln \frac{R_n - a}{R_w}} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8[(R_n - a)^2 + R_w^2(-1)^{k-1}]}{k\pi(4 + \beta_k^2)} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{th} \beta_k \alpha \cdot \cos \left(\beta_k \ln \frac{r}{R_n - a} \right) \right\}, \quad \beta_k = \frac{k\pi}{\ln \frac{R_n}{R_w}}; \quad (6.41)$$

$$I_k(a) = \frac{\alpha}{2} [(R_n - a)^4 - R_w^4] - \frac{\alpha[(R_n - a)^2 - R_w^2]}{2 \ln \frac{R_n - a}{R_w}} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{16[(R_n - a)^2 + R_w^2(-1)^{k-1}]^2}{k\pi(4 + \beta_k^2)^2} \operatorname{th} \beta_k \alpha \quad (6.42)$$

W przypadku wystarczająco szerokich próbek rozwiązanie równania (6.40) ma następującą postać:

$$\tau_{z\theta}(\xi) = \frac{G}{3 \cdot l} \left[\varphi_0 h + (h - \xi)^2 \frac{d\varphi}{d\xi} - 4(h - \xi) \varphi(\xi) + 2 \int_0^{\xi} \varphi(\bar{\xi}) d\bar{\xi} \right], \quad (6.43)$$

gdzie: funkcja przemieszczeń kątowych $\varphi(\xi)$ jest określana z zależności (6.30), a początkowy kąt obrotu przekrojów można obliczyć według wielkości Δz :

$$\varphi_0 = \frac{2 \cdot l \cdot \Delta z}{\pi \cdot (R_n + R_w)^2}. \quad (6.44)$$

W zależności od grubości warstwy a , próbki sektorowe można uważać za szerokie przy $b \geq 2h$, jeżeli $h/a > 10$ oraz przy $b \geq 5h$, jeżeli $h/a \leq 10$.

6.5. Określenie stycznych naprężeń szczątkowych w próbkach pierścieniowych

Próbki pierścieniowe służą do określenia naprężeń szczątkowych w kierunku stycznym $\sigma_{\theta 0}(\xi) = (\sigma_{\theta} - \mu \sigma_z)$, na podstawie, których w oparciu o $\sigma_{z0}(\xi) = (\sigma_z - \mu \sigma_{\theta})$ jest wykonywany podział naprężeń szczątkowych na składowe σ_{θ} , σ_z i σ_r .

Przygotowanie próbek pierścieniowych z krótkich wałów lub próbek – walców jest realizowane w następującym porządku.

1. W przypadku, kiedy wał jest długi jest cięty na próbki – walce o długości L_p . Wielkość L_p jest określana w oparciu o niezbędną liczbę próbek N z uwzględnieniem nadkładu na rozcinanie Δb oraz szerokości próbki b :

$$L_p = (b + \Delta b)N. \quad (6.45)$$

Po analogii z warunkiem (6.36) $b \geq 2h$.

2. Otrzymane walce są dzielone na próbki pierścieniowe (z uwzględnieniem nadkładu na rozcinanie Δb). Dokładnie w środku szerokości b jest kilkakrotnie mierzona średnica każdej przyszłej próbki i określana średnia arytmetyczna średnic każdej próbki w stanie początkowym $d_{sr,i}^{pocz}$, gdzie i – numer pierścienia.
3. Wiercony jest otwór w próbce o promieniu R_w określonym na podstawie warunku (6.33).
4. Próbką – walcem jest cięta na pierścienie przy parametrach skrawania określonych w taki sposób by powstały minimalne technologiczne naprężenia szczałkowe.
5. Zgodnie z punktem 2 ponownie są mierzone średnice otrzymanych pierścieni, określane ich średnie arytmetyczne $d_{sr,i}$ oraz zmiana średnicy $\Delta d_i = d_{sr,i}^{pocz} - d_{sr,i}$ niezbędna, zgodnie z (6.35), do określenia (uwzględnienia) naprężeń odciażania $\Delta \sigma_{\theta_0}$.
6. Otrzymane pierścienie zgodnie z rys. 6.9 są dzielone na strefy wytrawiania β , a zatem są rozcinane i jest mierzona zmiana ich średnicy spowodowana przecinaniem δ_p .

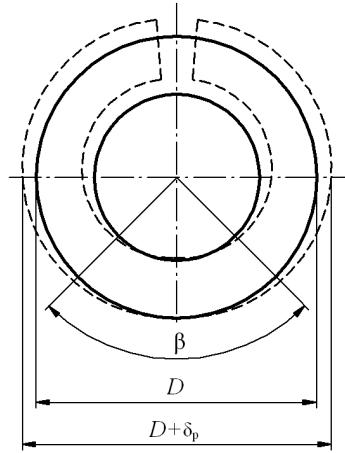
Przy rozcinaniu oraz w procesie wytrawiania warstw powierzchniowych rozcięty pierścień ulega odkształceniu, głównie w wyniku przemieszczenia ugięcia, które prowadzi do dużych, w porównaniu ze zmianą średnicy pierścienia nierozciętego, zmian średniej średnicy $\delta(\xi)$.

W celu dodatkowego zwiększenia dokładności pomiaru $y(\xi)$ w procesie wytrawiania warstw powierzchniowych w praktyce często są stosowane specjalne przedłużacze l (rys. 6.10). W tym przypadku wielkość $y(\xi)$ jest określana przy zastosowaniu współczynnika K_β :

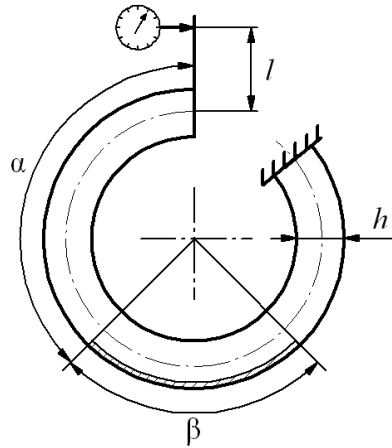
$$y(\xi) = K_\beta \cdot y_\beta(\xi), \quad (6.46)$$

gdzie: $y_\beta(\xi) = y$ – przemieszczenie mierzone czujnikiem przy pomocy przedłużacza

$$K_\beta = \frac{2}{(1 + \frac{l}{R}) \cdot \beta + \sin \alpha - \sin(\alpha + \beta)}. \quad (6.47)$$



Rys. 6.9. Schemat odkształcenia pierścieni



Rys. 6.10. Schemat mocowania pierścieni

Dalej zostały przyjęte następujące oznaczenia:

h – grubość początkowa pierścienia, mm;

$d_{sr} = (d - h)$ – średnia początkowa średnica pierścienia, mm;

$d(\xi) = (d_{sr} - \xi)$ – średnia średnica pierścienia po zdjęciu warstwy ξ , mm;

α i β – parametry kątowe pierścienia (patrz rys. 6.9), rad.

Obliczanie obwodowych naprężeń szczątkowych $\sigma_{\theta 0}(\xi) = (\sigma_{\theta} - \mu \sigma_z)$, jest realizowane w oparciu o krzywą odkształcenia $\delta(\xi)$ według zależności zamieszczonych w [2] przy uwzględnieniu odciążających $\Delta \sigma_{\theta 0}$:

$$\sigma_{\theta 0}(\xi) = K(\sigma_0 + \sigma_1 + \sigma_2) + \Delta \sigma_{\theta 0}, \quad (6.48)$$

$$\begin{aligned}
\text{gdzie :} \quad K &= \frac{E}{3d^2(\xi)}; \\
\sigma_0(\xi) &= \frac{4\delta_p d^2(\xi)}{d_{sr}^2} (h - 2\xi); \\
\sigma_1(\xi) &= -(h - \xi)^2 \cdot \frac{dy}{d\xi}; \\
\sigma_2(\xi) &= +4(h - \xi) \cdot \delta(\xi) - 2 \int_0^\xi \delta(\bar{\xi}) d\bar{\xi}, \quad (0 \leq \bar{\xi} \leq \xi),
\end{aligned} \tag{6.49}$$

Stała składowa $\Delta\sigma_{\theta 0}$ jest określana z zależności (6.35) w której w przypadku każdego i -tego pierścienia jako Δd i d należy wziąć odpowiednie Δd_{sr} i d_{sr} :

$$\Delta\sigma_{\theta 0} = \frac{\Delta d_{sr}}{d_{sr}} E. \tag{6.50}$$

Wielkość $y(\xi)$ jest przyjmowana jako dodatnia przy zwiększeniu średnicy pierścienia. Do określenia średnich obwodowych naprężeń szczątkowych brana jest wielkość $\beta = \pi$. Jeżeli trzeba określić rozkład naprężeń szczątkowych w zależności od współrzędnej θ , to bierze się $\beta < \pi$. W tym przypadku okrąg jest dzielony na k odcinków: $\beta = 2\pi/k$ (rys. 6.13b). Umiejscowienie rozcięcia i pomiar δ_r są realizowane zgodnie z rys. 6.9. Przy zmniejszeniu wielkości β przemieszczenia $y_\beta(\xi)$ również ulegają zmniejszeniu. Wielkość l w celu zwiększenia dokładności pomiarów można więc zwiększyć.

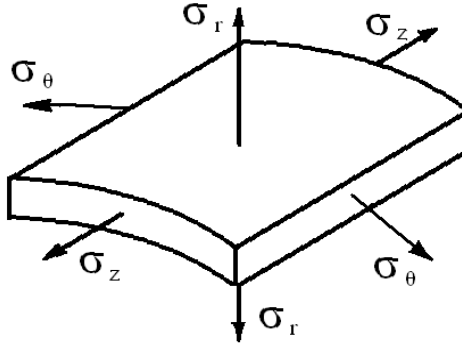
6.6. Podział naprężeń szczątkowych na składowe osiowe, styczne i promieniowe

W odróżnieniu od części płaskich w częściach cylindrycznych (wałach pełnych i drążonych) powstaje nie płaski, a objętościowy stan naprężeń charakteryzujący się naprężeniami szczątkowymi $\sigma_z(\xi)$, $\sigma_\theta(\xi)$ i $\sigma_r(\xi)$. Przy zastosowaniu próbek prętowych i pierścieniowych można określić całościowe naprężenia szczątkowe, które zostały oznaczone w sposób następujący:

$$\sigma_{z0}(\xi) = (\sigma_z - \mu\sigma_\theta) = F_z(\xi), \quad \sigma_{\theta 0}(\xi) = (\sigma_\theta - \mu\sigma_z) = F_\theta(\xi). \tag{6.51}$$

Do określenia promieniowych naprężeń szczątkowych $\sigma_r(\xi)$ należy wyodrębnić z zależności (6.51) składowe naprężenia szczątkowych $\sigma_z(\xi)$ i $\sigma_\theta(\xi)$ (rys. 6.11). W tym celu można posłużyć się zależnościami:

$$\sigma_z(\xi) = \frac{1}{1 - \mu^2} (F_z + \mu F_\theta), \quad \sigma_\theta(\xi) = \frac{1}{1 - \mu^2} (F_\theta + \mu F_z). \tag{6.52}$$



Rys. 6.11. Schemat rozkładu składowych naprężeń szczątkowych

Obliczeniowa głębokość a zalegania naprężeń szczątkowych σ_z i σ_θ jest określana przez minimalną z dwóch wielkości a_z i a_θ – głębokości oddziaływania F_z i F_θ . W celu właściwego określenia naprężeń szczątkowych należy więc skorygować dane o F_z i F_θ w taki sposób, aby skok $\Delta\xi$ i głębokość zalegania a były jednakowe.

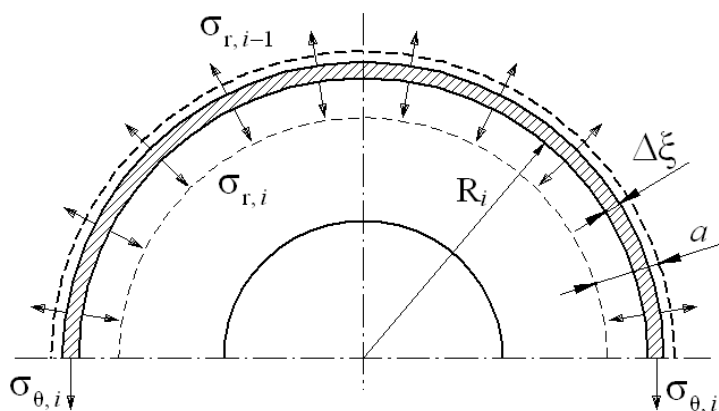
Promieniowe naprężenia szczątkowe $\sigma_r(\xi)$ są określane po uzyskaniu rozkładu stycznych naprężeń szczątkowych $\sigma_\theta(\xi)$. Głębokość a jest dzielona na n warstw o grubości $\Delta\xi = a/n$. W przypadku i -tej warstwy (rys. 6.12) naprężenia szczątkowe $\sigma_{r,i}$ są określane zależnością:

$$\sigma_{r,i} = \sigma_{r,i-1} + \frac{\Delta\xi}{R_i} (\sigma_{r,i-1} - \sigma_{\theta,i}), \quad (6.53)$$

gdzie: $R_i = R_n - \Delta\xi i$, $1 \leq i \leq n$.

Przy $i = 1$ należy przyjąć $\sigma_{r,i-1} = \sigma_{r,0} = 0$.

Dokładność obliczeń $\sigma_r(\xi)$ wzrasta przy zwiększeniu liczby n warstw.

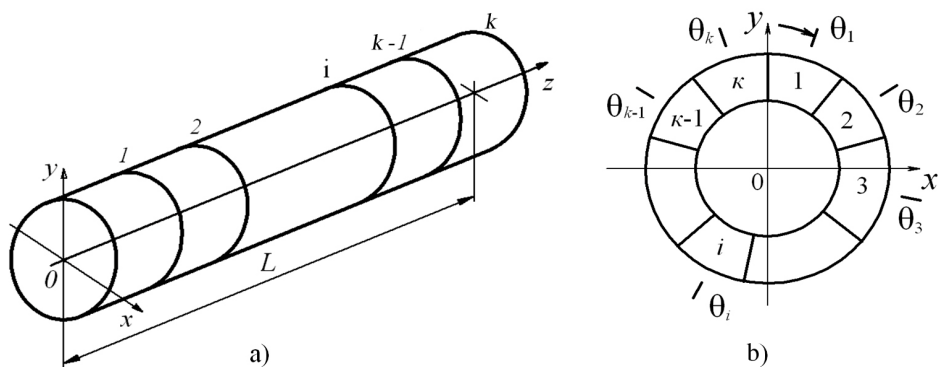


Rys. 6.12. Schemat określenia promieniowych naprężeń szczątkowych

6.7. Budowa wykresów naprężeń szczątkowych w zależności od współrzędnej „Z” i „\theta”

Wykresy zależności naprężeń osiowych lub obwodowych w kierunkach osiowym lub obwodowym należy budować w sposób następujący (rys. 6.13).

1. Niezbędne wyniki obliczeń należy generować z takim samym krokiem $\Delta \xi$.
2. Dane trzeba importować w takim porządku, aby można byłoby utworzyć tabelę (tab. 6.1),
3. Zbudować wykresy naprężeń szczątkowych w zależności od współrzędnej ξ .



Rys. 6.13. Schemat wyboru kierunku naprężeń szczątkowych

Tab. 6.1. Widok zewnętrzny zbudowanej tablicy: n – ilość danych o naprężeniach szczątkowych według głębokości warstwy a , k – dane o naprężeniach szczątkowych w kierunkach: osiowym – Z (rys. 6.13a), lub obwodowym – θ (rys. 6.13b)

ξ , μm	$\Sigma_{sz, 1}$ MPa	$\Sigma_{sz, 2}$ MPa	$\Sigma_{sz, 3}$ MPa		$\sigma_{sz, k}$ MPa
0					
10					
20					
.....					
a_n					

4. Określić zależność naprężeń szczątkowych od współrzędnych Z lub θ w przypadku kilku wybranych współrzędnych ξ_i ($1 \leq i \leq k$).
5. W miarę potrzeby na podstawie danych początkowych (tablicowych) zbudować wykresy przestrzenne naprężeń szczątkowych we współrzędnych $\sigma_{sz} - \xi - Z$ lub $\sigma_0 - \xi - \theta$.

Na podstawie ogólnej teorii odkształceń szczątkowych części o dowolnym kształcie opracowano nowe metodyki określania naprężeń szczątkowych osiowych i stycznych dla wałów długich, a także wałów i próbek o poprzecznym przekroju okrągłym i pierścieniowym sektorowym. Otrzymano zależności umożliwiające wyodrębnienie naprężeń szczątkowych σ_z i σ_θ oraz określenie promieniowych naprężeń szczątkowych σ_r . Przedstawiono metodykę budowy wykresów naprężeń szczątkowych w zależności od współrzędnych Z lub θ . Opracowane metodyki stały się podstawą do opracowania oprogramowania do obliczeń naprężeń szczątkowych.

6.8. Urządzenia eksperymentalne do określania naprężeń szczątkowych

W obróbce elektrochemicznej z fizycznego punktu widzenia jest wykorzystywane zjawisko elektrolizy. Rozpuszczanie anodowe stopów w wyniku działania prądu stałego, na przykład w roztworze wodnym soli kuchennej, w procesie połączenia z obrabianym metalem przebiega w sposób przedstawiony poniżej.

Obróbka elektrochemiczna jest wykonywana na specjalnym urządzeniu, w skład, którego wchodzi źródło zasilania prądu stałego, układ hydrauliczny podający elektrolit oraz mechanizm realizacji kinematyki procesu. Półfabrykat jest podłączany do bieguna dodatniego (anoda), narzędzie do ujemnego (katoda). Półfabrykat i narzędzie są umieszczane w komorze wykonanej z dielektryka. Po doprowadzeniu elektrolitu do szczeliny między katodą i anodą obwód elektryczny jest zamykany, co prowadzi do rozpuszczenia materiału anody (półfabrykatu). Kształt obrabianej powierzchni półfabrykatu w wyniku elektrolizy będzie odpowiadać kształtowi elektrody – narzędzia. Wydajność obróbki elektrochemicznej jest charakteryzowana ilością rozpuszczonego materiału. Zgodnie z prawem Faradaya jest ona proporcjonalna do natężenia prądu przechodzącego przez roztwór elektrolitu:

$$G = I \cdot k \cdot t ,$$

gdzie: k – równoważnik elektrochemiczny,
 I – natężenie prądu elektrycznego,
 t – czas obróbki.

Intensywność rozpuszczania anody również zależy od prędkości ruchu elektrolitu. Podawanie świeżego elektrolitu między elektrody sprzyja wyprowadzaniu ze szczeliny roboczej produktów rozpuszczania anodowego, odpowiednio zwiększeniu także ulega faktyczna gęstość prądu oraz zdejmowanie materiału. W większości przypadków równomierne rozpuszczanie jest używane przy prędkości strumienia wyższej od 5–8m/s.

Można to wyjaśnić tym, że przy obróbce elektrochemicznej nie występują naprężenia szczątkowe i odkształcenia warstwy powierzchniowej oraz jest względnie niska temperatura w przestrzeni między elektrodami. Również przy obróbce elektrochemicznej nie występują mikronaprężenia.

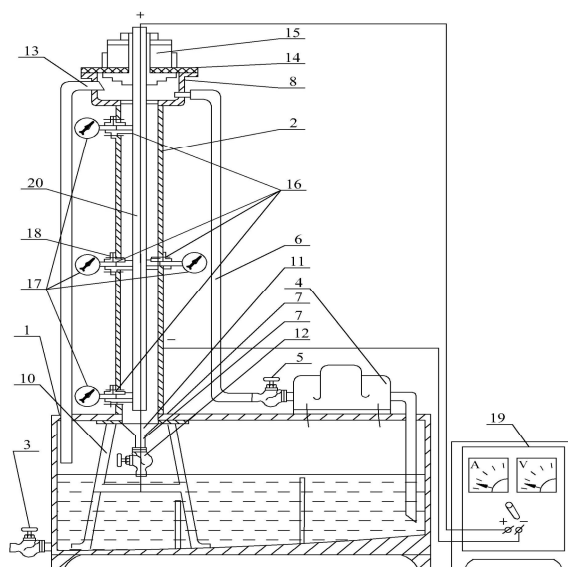
Opracowano urządzenie nr 1 do elektrochemicznego usuwania (trawienia) części próbki i ciągłego pomiaru odkształceń wału, zamocowanego wspornikowo w położeniu pionowym, w procesie elektrochemicznego wytrawiania warstwy materiału. Urządzenie nr 1 jest zbudowane z kolumny – elektrody 2, źródła zasilania 19 i stacji przetaczania elektrolitu (rys. 6.14).

W skład stacji przetaczania elektrolitu wchodzi: wanna 1 o pojemności 400 litrów do przechowywania elektrolitu wykonana ze stali nierdzewnej z trzema sekcjami o pochylonym dnie do oczyszczania elektrolitu – do korpusu wanny jest przyspawany zawór 3 do odprowadzania z niej produktów rozpuszczania anodowego; pompa zębata 4 na wejściu, której znajduje się zawór prosty 5 do regulacji wydatku elektrolitu; przewody rurowe 6 i 7 którymi elektrolit jest podawany do miski 8 i odprowadzany z kolumny 2.

Do kolumny 2 – nieruchomej elektrody wykonanej ze stali nierdzewnej (rurka o średnicy wewnętrznej 60mm) przy podstawie – jest przyspawana płyta 9 do mocowania kolumny 2 na postumencie 10. Do płyty 9 jest przyspawane pochyłe dno 11 z pionowym zaworem 12, który służy do regulowania prędkości przepływu elektrolitu w kolumnie 2. Od góry do kolumny jest przyspawana misa 8, w której znajduje się króciec 13 do spuszczenia elektrolitu, gdy jego poziom przewyższy wymagany w misie 8. Misa 8 jest przeznaczona do wytwarzania przepływu turbulentnego elektrolitu, przy którym produkty rozpuszczania anodowego są odprowadzane szybciej niż przy przepływie laminarnym.

Do misy 8 przez podkładkę ebonitową 14 jest zamocowany trzyszczękowy uchwyt 15 z kolumną 2. W płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez oś kolumny 2, przy pomocy tulei prowadzących 16, są zamocowane 4 wskaźniki zegarowe 17 o podziałce 0,01mm. Schemat rozmieszczenia czujników jest pokazany na rys. 6.15. Do tulei prowadzących 16 są przymocowane membrany 18, które zabezpieczają przed przedostaniem się elektrolitu do czujników i wyciekami elektrolitu z kolumny 2.

Praca na urządzeniu przebiega następująco. Próbką (wał) 20, po pokryciu lakierem chlorowinylowym lub emalią ceramiczną 50% jej powierzchni niewytrawianej elektrochemicznie, jest ustawiana pionowo w kolumnie 2 i mocowana w uchwycie 15. Wskaźniki 17 są umieszczane na próbce z naciągami, a czujniki z luzem 0,2mm i są mocowane w tulejach prowadzących 16 przy pomocy śrub. Włączana jest pompa w celu przetoczenia do kolumny słupa elektrolitu, a zatem odnotowywane są wskazania czujników lub wskaźników przemieszczenia liniowego. Wytrawiana elektrochemicznie jest warstwa metalu o głębokości 1,5–2mm z prędkością $v = 0,1\text{--}1,5\text{mm/min}$. Okresowo jest określana głębokość wytrawiania przy pomocy średnicowo rozmieszczonych czujników. Odkształcenie próbki jest określane przy zastosowaniu trzech czujników, umiejscowionych z jednej strony kolumny 2. Wyniki są odnotowywane w specjalnych tablicach. Po osiągnięciu przez warstwę wytrawianą określonej głębokości jest włączane źródło zasilania i pompa. Zatem według wyników pomiarów odkształcenia próbki są obliczane w czasie rzeczywistym naprężenia szczątkowe 1 rzędu. W przypadku, kiedy jest konieczne badanie procesu relaksacji naprężeń w ciągu długiego czasu (2–3 miesiące) to z próbki (wału), równomiernie z całej powierzchni, jest zdejmowana warstwa materiału oraz jednocześnie jest wykonywane wytrawianie na zadaną głębokość, a zatem próbka jest wyjmowana z kolumny 2 (rys. 6.14) i przenoszona na stanowisko do pomiaru odkształceń (rys. 6.16–6.17).



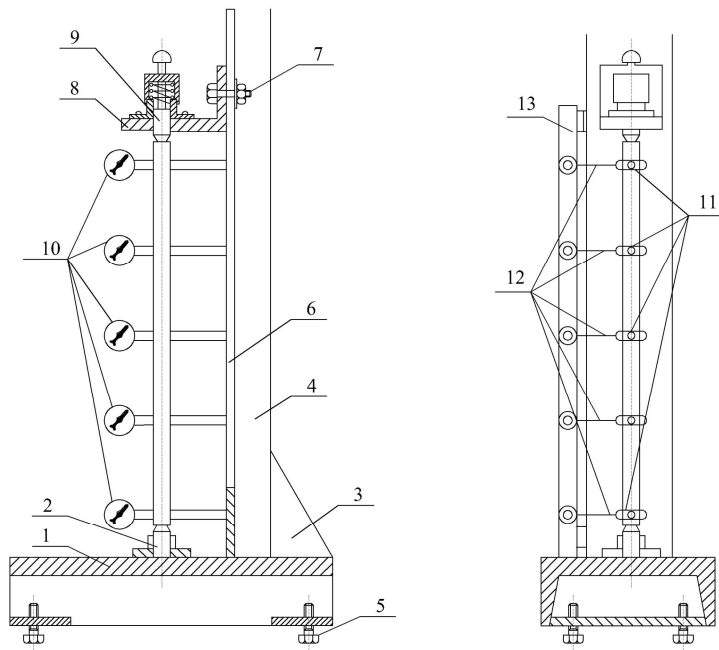
Rys. 6.14. Urządzenie nr 1 do elektrochemicznego usuwania części próbki i ciągłego pomiaru jej odkształcenia



Rys. 6.15. Widok ogólny urządzenia do obróbki elektrochemicznej bez zbiornika na elektrolit

Urządzenie do pomiaru odkształceń wału w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach jest wykonane następująco (rys. 6.16). Do podstawy 1 z nieruchomym kłem 2 jest przyspawany poprzez ukośnice 3 pionowy stojak 4. Podstawa 1 za pomocą poziomicy i śrub 5 jest ustawiana w położeniu poziomym. W stojaku jest rowek prowadzący 6 umożliwiający zamocowanie do stojaka 4 za pomocą śruby 7 ruchomego mechanizmu 8.

Przemieszczanie mechanizmu 8, z ruchomym posadowionym na sprężynie kłem 9, wzdłuż stojaka 4 i rowka prowadzącego 6 daje możliwość przezbierania urządzenia w celu dostosowania go do pomiarów odkształceń badanych próbek o różnej długości. Pięć czujników zegarowych 10 o wskazaniu 0,01mm jest umieszczonych w równej odległości jeden od drugiego wzdłuż osi kłków 2 i 9. Czujniki są zamocowane przy pomocy łapek 11, wsporników 12, które z kolei są umieszczone na pionowej sztywnej listwie 13 przymocowanej czterema śrubami do stojaka 4.



Rys. 6.16. Urządzenie nr 2 do pomiaru odkształceń wałów w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach

Urządzenia pracują (rys. 6.14–6.17) w sposób następujący. Wstępnie wały są cięte na wymiar 1300mm i nakielkowane. Na czole wału jest nanoszony trzycyfrowy numer: cyfra pierwsza – numer zadania, druga – numer partii, trzecia – numer półfabrykatu. Następnie na czole wału jest nanoszona ryska, która jest oznakowana jako „0”. Pod kątem 90° od tej ryski są nanoszone trzy

kolejne ryski w celu wyznaczenia dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyzn. Zatem powierzchnia wału, która nie jest poddawana wytrawianiu elektrochemicznemu jest pokrywana lakierem chlorowinylovym – jest pozostawiany niepolakierowany pasek o szerokości 3,5mm.

Na urządzeniu nr 2 jest określane odkształcenie wału przed obróbką elektrochemiczną według odchylenia jego osi. Wał jest ustawiany w kłach 2 i 9 tak, aby ryska „0” na wale pokrywała się ze znakiem na górnym kle osadzonym na sprężynie 9. Na powierzchni wału w osi umieszcza się pięć czujników 10 z naciągami 5–6 mm zamocowanych łapkami 11. Strzałki czujników są ustawiane na zerze, a zatem wał jest obracany zgodnie z ruchem wskazówek zegara o 90° tak, aby znak na górnym kle 9 pokrył się z ryską na wale. Wskazania czujników 10 (ze znakiem „+”, przy obrocie strzałki zgodnie z ruchem wskazówek zegara) są zapisywane w specjalnej tablicy. Metodyka pomiaru w przypadku zastosowania czujników bezkontaktowych jest identyczna.

Po odnotowaniu wskazań czujników w przypadku wszystkich czterech rysek, to znaczy po zdjęciu wartości odkształcenia wału w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach, jest określane jego położenie według wskazań pięciu czujników z zależności:

$$y_1 = \frac{3p + 1p}{2}, \quad y_2 = \frac{2p + 4p}{2},$$

gdzie: y_1 i y_2 – ugięcie osi wału w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach,

1p, 2p, 3p, 4p – wskazania czujników w przypadku czterech rysek na wale.

Wał jest mocowany w przyrządzie samocentrującym 15 urządzenia nr 1. Włączana jest pompa 5, w celu utworzenia słupa elektrolitu, oraz źródło prądu stałego 19. W trakcie wytrawiania elektrochemicznego rowka wzdłużnego, okresowo po wyłączeniu urządzenia nr 1 i wyjęciu wału, na urządzeniu nr 2 jest określane ugięcie i głębokość rowka wzdłużnego h . Wielkość h można określić w sposób pośredni według zmiany ciężaru wału ΔG . W celu uproszczenia eksperymentu można założyć, że ΔG w pośrednich chwilach jest proporcjonalne do czasu wytrawiania przy stałych parametrach.

Ugięcie y osi wału jest określane na urządzeniu nr 2 (rys. 6.17). Na podstawie ugięcia y osi wału przy określonej głębokości rowka r jest wykonywany wykres zależności $y = \lambda(r / R)$.

Urządzenie umożliwia zdejmowanie metalu wzdłuż półfabrykatu z dokładnością 0,01mm na średnicy przy wytrawianiu warstwy metalu równej 2mm w części o średnicy 30mm. Chropowatość obrabianej powierzchni stali nierdzewnej jest równa $Ra = 1,25 - 0,32\mu m$. Zaletą urządzenia jest wykorzystanie jako

katody jego korpusu (kolumny), co powoduje, że nie ma konieczności stosowania mechanizmu realizującego kinematykę procesu.

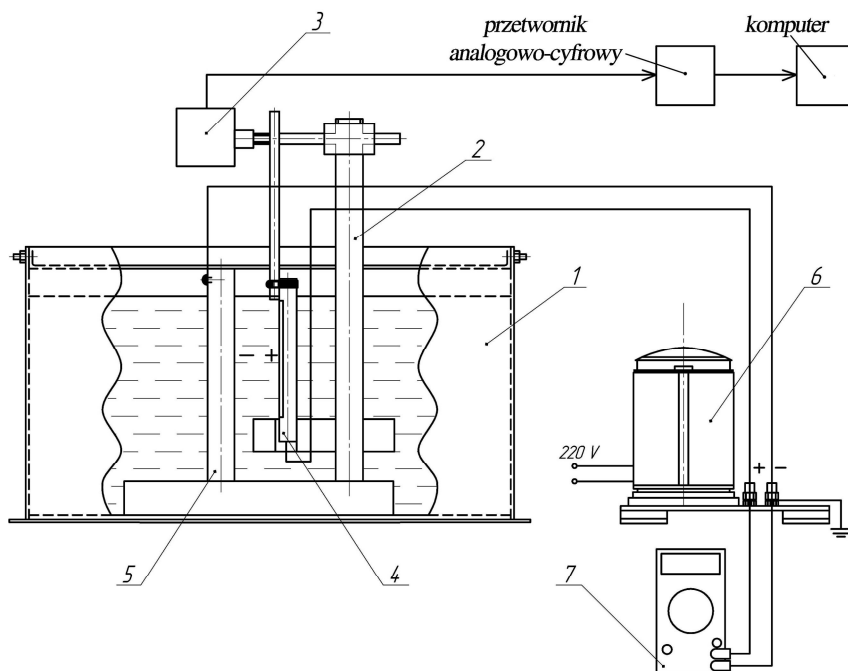
W wyniku eksperymentalnego doboru parametrów wytrawiania elektrochemicznego (gęstości prądu anodowego $I = 30 \text{ A/dm}^2$ oraz napięcia między elektrodami $U = 18\text{--}20 \text{ V}$) jest uzyskiwana wysoka wydajność procesu wytrawiania elektrochemicznego stali nierdzewnej $V_T = 0,1\text{--}0,15 \text{ mm/min}$, co w połączeniu z prędkością przetaczania elektrolitu $v_p = 18 \text{ l/min}$ gwarantuje praktycznie stałą temperaturę w strefie obróbki wału – próbki $T = 50^\circ \text{C}$, umożliwia to wyeliminowanie odkształceń temperaturowych wału i uzyskanie wystarczająco wysokiej przewodności względnej elektrolitu określającej dokładność i czystość powierzchni wału.

Przy wytrawianiu stali pasywacja obrabianej powierzchni występuje w niewielkim stopniu, dlatego przy optymalnym doborze parametrów wytrawiania można zastosować jako elektrolit roztwór wodny soli kuchennej o koncentracji 300 g/l , w którym zachodzi minimalna ilość reakcji pobocznych, poza tym, jest on bezpieczny w sensie ekologicznym.



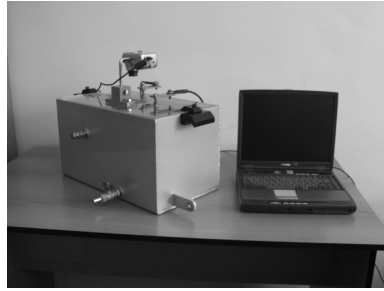
Rys. 6.17. Widok ogólny urządzenia do pomiaru odkształceń wału

Do badania naprężeń szczątkowych w próbkach wyciętych z wałów rzeczywistych opracowano urządzenie nr 3 (rys. 6.18). Urządzenie pracuje w sposób następujący. Do baku 1 z elektrolitem jest przymocowany statyw 2, służący jako sztywna baza do mocowania czujnika przemieszczenia 3 (lub aparatu fotograficznego) i badanej próbki. Próbka 4 jest zamocowana na statywie 2 między statywem i rurką 5, która jest elektrodą ujemną, natomiast, część jest dodatnią. Rurka 5 i badana próbka 4 są podłączone do bloku zasilania 6, którego wyjście jest podłączone do komputera lub multimetru 7.

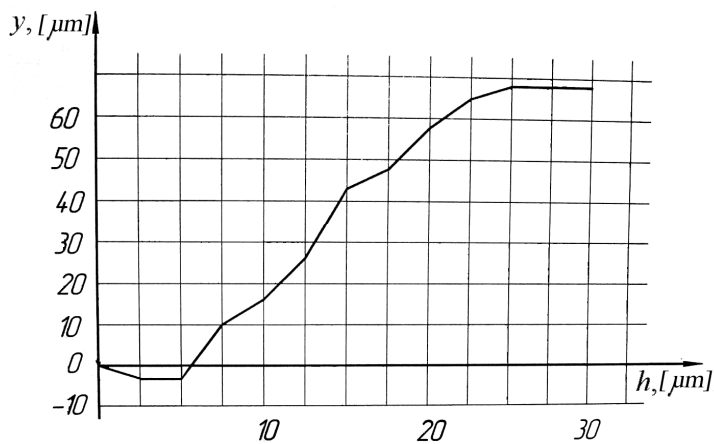


Rys. 6.18. Schemat funkcjonalny urządzenia do wytrawiania małych próbek

Jako elektrolit jest stosowany wodny roztwór soli kuchennej, przede wszystkim dlatego, że jest łatwo dostępny i bezpieczny (różne metodyki klasyczne zalecają stosowanie kwasów). Schemat pracy urządzenia przedstawiono na rysunku 6.18. Blok zasilania jest podłączany do sieci 220V, a na jego wyjściu jest uzyskiwane stałe napięcie rzędu 10–12V. Multimetr w trakcie trwania eksperymentu rejestruje zmiany napięcia prądu. Wskazania czujnika przemieszczeń są zapisywane w ciągu całego procesu wytrawiania co 0,5–1min. Umożliwia to uzyskanie zależności odkształcenia próbki od czasu – wykres 6.2. Na podstawie otrzymanych danych jest określana średnia prędkość wytrawiania oraz zależność ugięcia od głębokości wytrawionej warstwy (wykres 6.3).

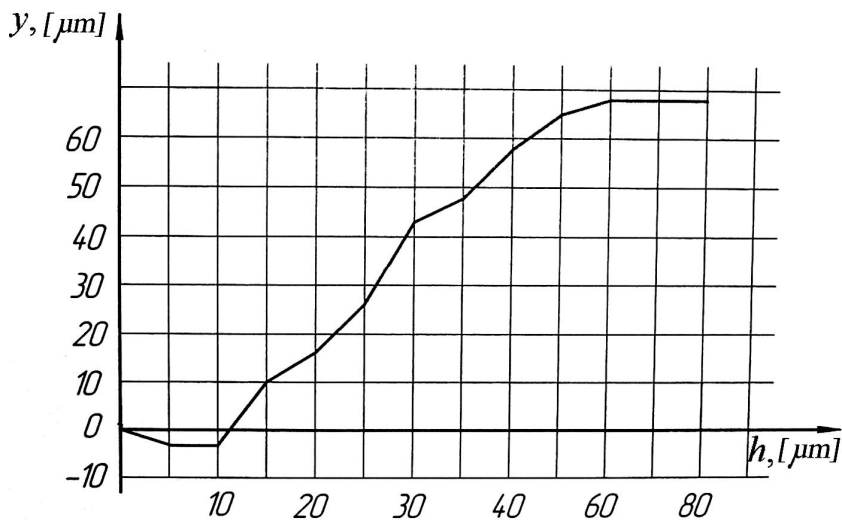


Rys. 6.19. Widok zewnętrzny urządzenia do trawienia

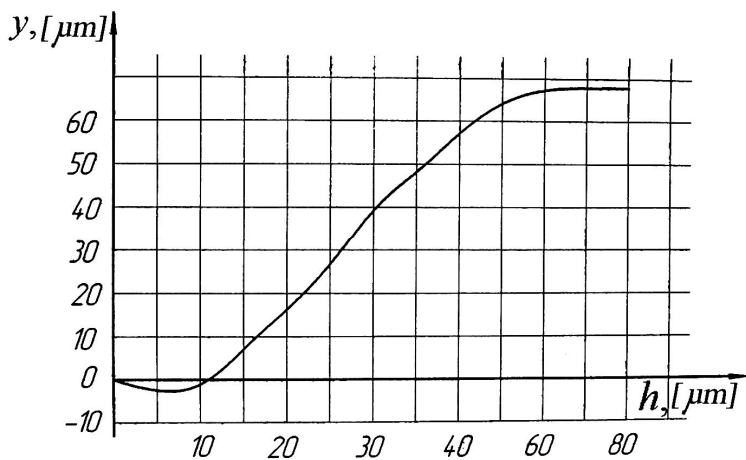


Rys. 6.2. Zależność ugięcia od czasu

Próbki są wykonane w postaci walców o średnicy 12–14mm i długości 120mm. Próbki pierścieniowe mają: średnicę zewnętrzną 40–50mm, szerokość 6–8mm, grubość 5–6mm. Geometria każdej próbki przed eksperymentem i po eksperymentie jest mierzona z dokładnością $1\mu\text{m}$. W celu wygładzenia błędów przeprowadzono aproksymację wyników, to znaczy, linia łamana (wykres 6.3) jest zamieniana krzywą (wykres. 6.4) zbliżoną maksymalnie do wyjściowej krzywej w tym celu opracowano odpowiedni algorytm i program.

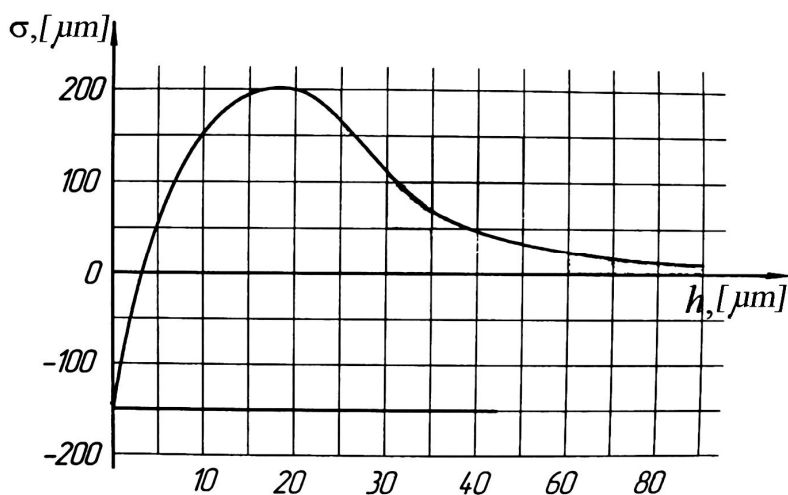


Rys. 6.3. Zależność ugięcia od wielkości warstwy wytrawionej



Rys. 6.4. Aproksymacja wyników

Otrzymana zależność ugięcia od głębokości wytrawiania w postaci równania 4–6 rzędu poddawana jest obróbce matematycznej w wyniku, której można uzyskać funkcję i wykres zależności wielkości naprężeń szczątkowych od głębokości zalegania (wykres 6.5).



Wykres. 6.5. Zależność naprężeń szczątkowych od głębokości zalegania

Można, więc uzyskać wiarygodne dane o stanie wewnętrznym próbek, przy czym nie w postaci graficznej jak to ma miejsce w większości metodyk klasycznych, a w postaci równania, którego stopień można zwiększać lub zmniejszać tak, aby uzyskać najlepszy wynik. Otrzymane dane łatwiej poddają się przetworzeniu matematycznemu i statystycznemu, a poza tym na dowolnym etapie jest możliwość odzwierciedlenia graficznego uzyskiwanych rezultatów.

POSUMOWANIE

W wyniku realizacji kompleksowych badań teoretycznych i eksperymentalnych rozwiązano istotne zagadnienie z zakresu technologii maszyn, polegające na opracowaniu metody sterowania procesem obróbki cieplno-mechanicznej długich części osiowosymetrycznych o małej sztywności bazującej na ustalonych prawidłowościach odkształcenia sprężysto-plastycznego części, zależnościach matematycznych i budowie schematów strukturalnych układów technologicznych w celu uzyskania wymaganej dokładności eksploatacyjnej kształtu i wymiarów części.

Metody technologiczne sterowania dokładnością i stabilnością kształtu części o małej sztywności powinny bazować na opracowanych zależnościach opisujących procesy zachowania obrabianego materiału części w oparciu o właściwości wewnętrzne i zewnętrzne metalu, wzajemne relacje półfabrykatu, oddziaływania technologiczne w procesie kształtowania jej właściwości fizyko-mechanicznych, a także parametry geometryczne z zastosowaniem modeli matematycznych, schematów strukturalnych oraz algorytmów sterowania. Określone powiązania stanu sprężysto-plastycznego części z parametrami technologicznymi procesów obróbki, wskaźnikami jakości i stabilności kształtu są realizowane przy zastosowaniu nowych metod obróbki cieplno-mechanicznej.

Modele matematyczne, jako podstawa funkcjonowania metod technologicznych sterowania dokładnością i stabilnością kształtu części o małej sztywności, ustanawiają związki między dokładnością wykonania i podstawowymi czynnikami technologicznymi, wymiarami, właściwościami fizyko-mechanicznymi oraz parametrami układów technologicznych w trybach quasi-statycznym i dynamicznym, położeniem osi półfabrykatu w trakcie jego obróbki, a także błędami geometrycznymi urządzeń i przyrządów.

Struktura modeli i algorytmów funkcjonowania umożliwia ich zastosowanie do obliczeń parametrów sterowanych i oddziaływań regulacyjnych schematów obliczeniowych.

Bazując na prawach mechaniki ciała sztywnego, teorii sprężystości i plastyczności, metaloznawstwa zbudowano algorytmy sterowania dokładnością i stabilnością kształtu w operacjach obróbki cieplnej: hartowania i odpuszczania. Opracowano również programy sterowania

parametrami odkształcenia sprężysto-plastycznego przy działaniu obciążeń wzdłużnych. Opracowano modele statyczne i dynamiczne obróbki cieplno-mechanicznej umożliwiające wykonywanie syntezy i analizy układów technologicznych.

Opracowano i wykonano specjalne urządzenia do prostowania na gorąco przy temperaturze hartowania oraz stabilizacji cieplnej przy temperaturze odpuszczania. Urządzenia są wyposażone w kanały diagnostyki i sterowania parametrami technologicznymi przy odpuszczaniu i normalizacji wyrobów.

Opracowano i aprobowano nową technologię obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności, o stosunku długości do średnicy rzędu 10–200, wykonywanych ze stali konstrukcyjnych i nierdzewnych.

Wdrożenie opracowanego, na bazie nowej metody sterowania odkształceniem sprężysto-plastycznym, urządzenia wyposażonego w kanały diagnostyki i regulowania umożliwia rozwiązanie problemu wykonania długich części osiowosymetrycznych o małej sztywności o dokładności eksploatacyjnej w zakresie 15–20 $\mu\text{m}/\text{m}$. Uzyskiwana wydajność, przy uzyskaniu wymaganej stabilności kształtu części, jest od 5 do 7 razy większa niż przy zastosowaniu technologii tradycyjnej.

Do oceny wskaźników ilościowych opracowanej technologii wykonania wałów o małej sztywności, na bazie teorii odkształceń części o dowolnym kształcie, opracowano nowe metodyki określenia naprężeń szczątkowych osiowych i stycznych w wałach o małej sztywności, a także w częściach i próbkach o przekroju poprzecznym, okrągłym i pierścieniowym. Uzyskano zależności umożliwiające rozdzielenie naprężeń szczątkowych oraz określenie promieniowych naprężeń szczątkowych.

Zaprezentowano metodykę budowy wykresów naprężeń szczątkowych w zależności od współrzędnych Z i θ .

Opracowane metodyki stanowią podstawę do wykonania oprogramowania do obliczeń naprężeń szczątkowych. Opracowano urządzenia do diagnostyki naprężeń szczątkowych pierwszego rzędu w przypadku wałów o średnicy 30–40mm i długości 1500mm.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

OZNACZENIA

- a – grubość warstwy wytrawianej, mm
- α – współczynnik rozszerzalności cieplnej, $1 / ^\circ\text{C}$
- β – współczynnik tłumienia, N s/mm
- b – szerokość, mm
- d – średnica próbki, mm
- $\varepsilon_y, \varepsilon_{pl}$ – odkształcenie względne – sprężyste i plastyczne, %
- $\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia s-1
- E, E_y – moduł sprężystości i moduł styczny sprężystości podłużnej, N/mm
- σ_{02}, σ_{sz} – granica plastyczności, naprężenia szcztątkowe, N/mm²
- h – głębokość wytrawiania, mm
- j – współczynnik podatności, mm²/N
- I – moment bezwładności przekroju poprzecznego, mm⁴
- K – współczynnik sztywności, N/mm
- L – długość, mm
- F – siła, N
- r_k – promień krzywizny, mm
- r – promień wału, próbki, mm
- R – promień zewnętrzny wału, mm
- S – pole przekroju wału, próbki, mm
- t – czas, s
- t_{ch} – czas chłodzenia, s
- L – długość, mm
- T – temperatura, $^\circ\text{C}$
- T – stała czasowa, s
- T_σ, T_ε – czas relaksacji, s
- φ – kąty względne skręcenia, stop
- $G(S)$ – transmitancja operatorowa
- y – ugięcie wału, próbki, mm
- μ – współczynnik Poissona
- ξ – współrzędna po grubości usuwanej warstwy, mm

SKRÓTY

- WRT** – współczynnik rozszerzalności termicznej
- CHAFc** – charakterystyka-amplitudowo-fazowo-częstotliwościowa
- UAS** – układ sterowania automatycznego

LITERATURA

1. Bai Y., Jia X., Cheng Z. Group optimization models for multi-component system compound maintenance tasks. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2011*; 1(49): 42–47.
2. Биргер И. А.: Остаточные напряжения. Москва: Машгиз, 1963.
3. Бленд Д. Р.: Теория линейной вязкоупругости. Москва: Мир, 1963.
4. Боли Б., Уэйнер Д.: Теория температурных напряжений. Москва: Мир, 1964.
5. Борздыка А. М., Гецов Л. Б.: Релаксация напряжений в металлах и сплавах. Москва: Металлургия, 1972.
6. Bubnicki Z.: Identyfikacja obiektów sterowania. Warszawa: PWN, 1974.
7. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. Warszawa: WNT, 1998.
8. Charczenko A., Świąć A., Taranenko W.: Obrabiarki i urządzenie technologiczne w produkcji elastycznej. Lublin: Politechnika Lubelska, 2011.
9. Carrino L., Giorleo G., Polini W., Prisco U.: Dimensional errors in longitudinal turning based on the unified generalized mechanics of cutting approach. Part II: Machining process analysis and dimensional error estimate. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2002; 42: 1517–1525.
10. Choroszy B.: Technologia maszyn. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000.
11. Хенкин М. Л., Локшин И. Х.: Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. Москва: Металлургия, 1974.
12. Хозирук Г. П.: Влияние остаточных напряжений в заготовке на погрешность формы маложестких деталей типа пластин. Совершенств. технолог. процессов в машиностроении. Иркутск, 1987, с. 137–140.
13. Cylc R., Świąć A.: Projektowanie procesów technologicznych. Automatyzacja procesów technologicznych. Lublin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 1985.
14. Gawlik J., Plichta J., Świc A.: Procesy produkcyjne. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2013.
15. Гезузин Я. Е.: Диффузионная зона. Москва: Наука, 1975
16. Гойтвуд Б. Е.: Температурные напряжения. Москва: ИЛ, 1959.
17. Гофман О., Закс Г.: Введение в теорию пластичности для инженеров. М.: Металлургия, 1975.

18. Гродский М.В.: Структурная сверхпластичность металлов. Москва: Металлургия, 1975.
19. Губкин С. И.: Пластическая деформация металлов. Москва: Металлургиздат, 1961.
20. Гуляев А. П.: Термическая обработка стали. Москва: Машгиз, 1960.
21. Гусенков А. П., Шнейдерович Р. М.: О свойствах кривых циклического деформирования в диапазоне мягкого и жесткого нагружения. Москва: Известия АН СССР, ОТН, Механика и Машиностроение, 1961, № 2.
22. Гусенков А. П., Шнейдерович Р. М.: Некоторые свойства кривых повторного деформирования при симметричном цикле. Москва: Известия АН СССР, ОТН, Механика и Машиностроение, 1960, № 5.
23. Давиденков И. А., Чучман Т. Н.: Влияние температуры на диаграммы сжатия металлов. Физика металлов и металловедение т. 9, вып.5, 1960, с. 741–750.
24. Дальский А. М.: Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. Москва: Машиностроение, 1975.
25. Долецкий В. А., Бунтов В. Н.: Увеличение ресурса машин технологическими методами. Москва: Машиностроение, 1978.
26. Draczew A., Taranenko G., Taranenko W., Hałas W., Świć A.: Sterowanie obróbką wibracyjną wałów długowymiarowych. Pomiary. Automatyka. Robotyka nr 2/2009, s. 224-227.
27. Draczew A., Taranenko G., Taranenko W., Hałas W., Świć A.: Sterowanie układem dynamicznym obróbki części osiowosymetrycznych o małej sztywności. Pomiary. Automatyka. Robotyka nr 2/2009, Warszawa 2009, s. 224–227.
28. Draczew O., Świć A., Taranenko W., Taranenko G.: Podstawy teoretyczne i doświadczalne modelowania operacji obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności. Postępy nauki i techniki 5/2010, 55-70.
29. Draczew O., Świć A., Taranenko W., Taranenko G.: Modelowanie układu dynamicznego obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności. Postępy nauki i techniki 5/2010, s.71-84.
30. Draczew O., Taranenko W. Technologia modułowa wytwarzania osiowosymetrycznych wałów długowymiarowych. Rzeszów: Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 230 Mechanika, z. 67: Modułowe technologie i konstrukcje w budowie maszyn, 2006, s. 47-50.
31. Draczew O., Taranenko V., Świć A., Hałas W.: Controlling thermal deformations during mechanical shafts processing. Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. Донецк: ДонНТУ, 2007. Выпуск 34, с. 278-283.

32. Draczew O., Taranenko W., Halas W., Taranenko G.: Sterowanie obróbką wibracyjną wałów o małej sztywności. Pomiary. Automatyka. Robotyka nr 2/2008, s. 224–227.
33. Драчев О.И., Расторгуев Д.А.: Лабораторные испытания по оценки влияния параметров термосиловой обработки на коробление валов. Тольятти: Сб. трудов ТГУ: Автоматизация технологических процессов и производственный контроль, 2000.
34. Драчев О.И.: Автоматическая система стабилизации геометрических форм маложестких деталей при термомеханической обработке. Куйбышев: Труды КпТИ, 1990, с. 129–142.
35. Драчев О.И.: Автоматическая система управления обработкой маложестких деталей. Алгоритмы и системы управления промышленными установками в машиностроении. Куйбышев: КпТИ, 1986, с. 181–196.
36. Драчев А.О.: Теоретические предпосылки к расчету осевых деформаций и напряжений при осевой нагрузке длинномерных деталей. Тольятти: Межвузовский сб. научных трудов, 1999, с. 157–160.
37. Драчев А.О.: Расчетное определение прямолинейности оси вала при термосиловой обработке. Тольятти: Межвузовский сб. научных трудов, 1999, с. 160–164.
38. Драчев А.О., Бобровский А. В.: Пути технологического воздействия на стабильность формы маложестких осесимметричных заготовок. Тольятти: Межвузовский сб. научных трудов, 1998, с. 180–183.
39. Драчев А.О., Драчев О.И., Тараненко Г.В., Тараненко В.А.: Управление вибрационной обработкой осесимметричных длинномерных деталей. Ташкент: Издательство Академии Наук Республики Узбекистан, 2008, с. 26–30
40. Драчев А., Тараненко Г., Тараненко В., Свиць А.: Способ термомеханической обработки нежестких длинномерных валов. Modern technologies, quality, restructuration. Кишинев, 2009.
41. Драчев О.И.: Энергосберегающая технология обработки маложестких валов. Рыбинск: Сб. научных трудов РГТА Международная научно-техническая конференция, т. 2, 2006, с. 20–25.
42. Драчев А.О.: Новый способ термосиловой обработки маложестких деталей. Журнал: Изобретатели машиностроения, № 3, 2003, с. 25–27.
43. Драчев О.И.; Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей. Москва: Политехника, 2005.
44. Драчев А.О., Алексеев О.К.: Модель процесса термосиловой обработки осесимметричных деталей. Труды 2-ой Межд. Конф.

- Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности металлоконструкций и методы их решения. С. Петербург: Изд-во СПбГТУ, 1977, с. 32–34.
45. Драчев О.И.: А.С. № 1786138 С 21D 9/06, 9/30. Способ термической обработки, БИ № 1, 1993.
 46. Драчев О.И., Палагнюк Г.Г.: Способ диагностики и управления процессом термосиловой обработки маложестких деталей и устройство для его осуществления. Ас. № 1561385 СССР В 23 15/00.
 47. Драчев О.И., Мазур В.К.: Способ обработки нежестких деталей. А. с. № 1258847 СССР с 1 с 21Д 1/78. БИ № 35 1986.
 48. Драчев О.И., Иванов О.И.: Способ термической обработки осесимметричных длинномерных деталей. А.с. № 170 8884 СССР А 1 С 21 Д 9/06. БИ № 4 1992.
 49. Драчев О.И., Драчев А.О.: Способ и устройство для термосиловой обработки длинномерных деталей. Патент С 1 Д9/06 RU № 2235794 С2 Д9/06 Би 25, 2004.
 50. Драчев О.И., Расторгуев Д.А.: Способ термосиловой обработки длинномерных деталей и устройство для его осуществления. Патент RU 2254383 С1 С21 Д9/06 Би № 17 2005.
 51. Драчев О.И., Расторгуев Д. А.: Устройство для термосиловой обработки. Патент RU № 2232198 С1 7С21 Д9/06, Би № 19, 2004.
 52. Drachev 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
 53. Farooq S, O' Birien C. Risk calculations in the manufacturing technology selection process, Journal of Manufacturing Technology Management 2010; vol. 21, 1: 28–49.
 54. Feld M.: Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn. Warszawa: WNT, 2007.
 55. Feld M.: Technologia budowy maszyn. Warszawa: PWN, 2000.
 56. Фридман Я. Б.: Механические свойства металлов. Москва: Машиностроение, 1974.
 57. Halas W., Taranenko V., Świć A., Glinko H.: Experimental resrarch on the extra surplus to the shafts processing accuracy. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Материалы междунар. научн.-техн. конф.: Изд-во СевНТУ, 2006, с. 143–144.
 58. Halas W., Taranenko V., Świć A.: Modelling the accuracy of axialsymetricc shaft manufacturing.. Proceedings 31th conference on

- production engineering of Serbia and Montenegro. Kragujevac, 2006, s. 305–310.
59. Hałas W., Taranenko W., Świć A.: Analiza dokładności wytwarzania części typu wał. *Przegląd Mechaniczny* nr 12/2006, s. 75-76.
 60. Hałas W., Taranenko W.: Badania doświadczalne dokładności obróbki wałów w przemyśle maszynowym. W: *Zagadnienia pęknięcia i skrawania materiałów plastycznych*. Monografia pod red. Józefa Jonaka. Lublin: Wyd. LTN, 2008, s. 75–86.
 61. Hałas W., Taranenko W., Świć A.: Kształtowanie struktury operacji procesu technologicznego obróbki wałów w CIM. *Przegląd Mechaniczny* nr 5/2007, s. 62–65.
 62. 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*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, pp. 749–756.
 63. Hałas 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.
 64. 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)*, Szczecin, 2008.
 65. Hałas W., Taranenko G., Taranenko W., Świć A.: Systemowe podejście do modelowania operacji procesu technologicznego wytwarzania wałów. *Modelowanie Inżynierskie*, tom 6, Nr. 37, s. 115–130.
 66. Hałas W., Taranenko G., Taranenko W., Świć A.: Modelowanie poszczególnych operacji procesu technologicznego wytwarzania wałów, tom 6, nr. 37, 2009, s. 115–130.
 67. Huang SC and Hsu BS. Resonant phenomena of a rotating cylindrical shell subjected to a harmonic moving load. *J Sound Vib* 1990; 136(2): 215–228.
 68. Иванов С.И.: Определение остаточных касательных напряжений в цилиндре по результатам исследования полоски. *Сборник статей каф. Сопротивление Материалов* вып. 53, Куйбышев: КПТИ, 1971, с. 127–138.
 69. Ильин Л. Н.: Основы учения о пластической деформации. Москва: Машиностроение, 1980.
 70. Informacyjne aspekty zarządzania i sterowania produkcją. Red. A. Świć. Lublin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 2005.

71. Исаев А.И.: Влияние технологических факторов на остаточные напряжения в поверхностном слое при точении конструкционных сталей. Москва: Филиал ВИНИТ, 1957.
72. Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych. Warszawa: WNT, 2007.
73. Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченко В. И.: Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: Наука и техника, 1977.
74. Ящерицын П. И., Скорыпин Ю. В.: Технологическая и эксплуатационная наследственность и ее влияние на долговечность машин. Минск: Наука и техника, 1978.
75. Китель И.: Введение в физику твердого тела. Москва: Физматгиз, 1963.
76. Кононов И. В., Пугин Е. П.: Оценка числа правок деталей цилиндрической формы с вытянутой осью. Автоматические линии и комплексы с программным управлением. Воронеж, 1980.
77. Колмогоров В. Л.: Пластичность и разрушение. Москва: Металлургия, 1977.
78. Коцюбинский О. Ю.: Стабилизация размеров чугунных отливок. Москва: Машиностроение, 1974.
79. Kosmol J.: Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem. Warszawa: WNT, 1995.
80. Korzyński M.: Metodyka eksperymentu. Warszawa: WNT, 2006.
81. Кравченко Б. А.: Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов. Куйбышев: Куйб. Книжн. Изд-во, 1962.
82. Кравченко Б. А. и др.: Повышение выносливости и надежности деталей машин и механизмов. Куйбышев: Куйб. Книжн. Изд-во, 1966.
83. Куйбышев О. А.: Пластичность и сверхпластичность металлов. Москва: Металлургия, 1975.
84. Kukielka L.: Podstawy badań inżynierskich. Warszawa: PWN, 2002.
85. Кутателадзе С. С.: Основы теории теплообмена. Москва: Атомиздат, 1979.
86. Кувалдин Ю. Н.: Формирование остаточных деформаций изгиба при точении нежестких валов. Известия ВУЗов: Машиностроение, 1987, № 6, с. 129-142.
87. Кузнецов В. А., Рене И. П., Рогожин В. Н.: Холодное выдавливание полых цилиндрических изделий из углеродистых сталей. Тула: Приокское книжное издательство, 1976.
88. Кузнецов Р. И., Павлов В. А.: Временный ход пластической релаксации напряжений. Москва: Физика металлов, металлосведение, 1968.
89. Кузьменко В. А.: Новые схемы деформирования твердых тел. Киев: Наукова Думка, 1973.

90. Ленский В. С.: Современные вопросы и задачи пластичности в теоретическом и прикладном аспектах. В кн.: Упругость и неупругость. Вып. 5, Москва: Изд. МГУ, 1978, с. 65-96.
91. Лернер А. Я.: Введение в теорию автоматического регулирования. Москва: Машгиз, 1968.
92. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos Sol Fract* 2002; 13(7): 1531–1535.
93. Лыков А. В.: Тепломассообмен. Москва: Энергия, 1972.
94. Лысов М. И.: Теория и расчет процессов изготовления деталей методом гибки. Москва: Машиностроение, 1966.
95. Малинин Н. Н.: Прикладная теория пластичности и ползучести. Москва: Машиностроение, 1968.
96. Marchelek K.: *Dynamika obrabiarek*. Warszawa: WNT, 1995.
97. Мееров М. В.: Системы многосвязного регулирования. Москва: Наука, 1967.
98. Мелан Э., Парку Г.: Температурные напряжения, вызываемые стационарными температурными полями. Москва: Физматгиз, 1958.
99. Михайлов О. Н.: Связь объемных и плоских остаточных напряженных состояний в цилиндрических деталях и их элементах при радиальном градиенте. *Проблемы прочности* № 8, 1983.
100. Modeling and designing in production engineering. Editors: Świć. A., Lipski J.: Lublin: Lublin University of Technology, 2009.
101. Modern techniques in mechanical engineering. Editors Świć. A., Lipski J.: Lublin: Lublin University of Technology, 2009.
102. Мошин Е. Н.: Исследование пластического изгиба. Труды ЦНИИТМаш. Москва: Машгиз, 1954, с. 62–65.
103. Надаи А.: Пластичность и разрушение твердых тел. Москва: Мир, т. 1–2, 1969.
104. Непершин Р. И.: Приближенный метод расчета температурного поля при плоском высокоскоростном прессовании № 6. Москва: Машиностроение, 1971, с. 27–35.
105. Непершин Р. И., Матяк В. А.: К расчету температурных полей заготовки и штамп в процессах горячей объемной штамповки. *Кузнечно-штамповочное производство* № 1, 1974, с. 1-4
106. Niezgodziński T.: *Mechanika ogólna*. Warszawa: PWN, 2006.
107. Niezgodziński M., Niezgodziński T.: *Wytrzymałość materiałów*. Warszawa: PWN, 2004.
108. Новиков И. И.: Теория термической обработки металлов. Москва: Металлургия, 1974.
109. Nowicki B.: *Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni*. Warszawa: WNT, 1991.

110. Няншин Ю. И.: Об управлении процессом обработки материалов с целью снижения остаточных напряжений. Прикладная математика и механика № 2, 1981.
111. Osiński Z.: Teoria drgań. Warszawa: PWN, 1980.
112. Orłoś Z.: Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń. Warszawa: PWN, 1977.
113. Oprządkiewicz J.: Podstawy niezawodności obrabiarek i systemów produkcyjnych. Warszawa: WNT, 1989.
114. Писаренко В. С., Вержбинская П. И.: Снижение остаточных напряжений вибрационной обработкой. Технология, организация и механизация сварочного производства. НИИФОРМТЯЖМАШ № 2, 1972.
115. Подпоркин В.Г.: Обработка нежестких деталей. Ленинград: Машгиз, 1969.
116. Поздеев А. А., Наншин Ю. И., Трусков П.В.: Остаточные напряжения, теория и приложения. Киев: Наукова Думка, 1982.
117. Projektowanie i automatyzacja procesów produkcyjnych. Redakcja Antoni Świć. Lublin: Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, 2005.
118. Projektowanie systemów i procesów technologicznych. Monografia pod red. A. Świcia. Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 2003.
119. Промтов А. И., Заманщиков Ю. И.: Остаточные напряжения и деформации при обработке маложестких деталей резанием. Вестник Машиностроения № 4, 1975, с. 42–45.
120. Puff T.: Technologia budowy maszyn. Warszawa: PWN, 1982.
121. Работнов Ю. И.: Элементы наследственной механики твердых тел. Москва: Наука, 1977.
122. Ratchev S, Govender E, Nikov S. Towards deflection prediction and compensation in machining of low-rigidity parts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B 2002; 1(216): 129-134.
123. Расторгуев Д. А., Драчев О. И., Драчев А. О.: Устройство для термосиловой обработки осесимметричных деталей. Патент RU 2260628 C1 C21D 9/06 Би 25, 2004.
124. Сагалевиц В.М., Савельев В.Ф.: Стабильность сварных соединений и конструкций. Москва: Машиностроение, 1986.
125. Садовский В. Д.: Структурная наследственность в стали. Москва: Металлургия, 1973, 208 с.
126. Седов Л. И.: Механика сплошной среды. Т.1. Москва: Наука, 1973.
127. Senczyk D.: Naprężenia własne. Wstęp do generowania, sterowania i wykorzystania. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1996.
128. Senczyk D.: Makronaprężenia. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1997.
129. Senczyk D.: Rentgenowskie pomiary tensora naprężenia. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1998.

130. Shron L., Bogucki W., Świć A., Taranenko W.: *Eksploatacja i remont maszyn technologicznych w elastycznych systemach produkcyjnych*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2007.
131. Синельникова Г. Б., Скроган В. А.: *Оценка погрешности при определении остаточных напряжений механическими методами*. Ленинград: Машиностроение, 1972, с. 211–220.
132. Скороходов А. Н., Зудов Е. Г., Киричков А. А., Петrenchенко Ю. П.: *Остаточные напряжения в профилях и способы их снижения*. Под ред. Полухина П. И. Москва: Металлургия, 1985.
133. Смирнов-Аляев Г. А.: *Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные расчеты процессов конечного формирования материалов* Ленинград: Машиностроение, 1978.
134. Соколов Л. Д.: *Сопротивление деформации сталей*. Москва: ЦНИИИМ, 1963.
135. Соколовский В. В.: *Теория пластичности*. Москва: Машиностроение, 1969.
136. Сорокин О. В., Самарин Ю. П.: *Ползучесть деталей машин и сооружений*. Куйбышев: Куйб. книжн. изд-во, 1968.
137. Судник В. К., Ярлыков А. П.: *Механизм релаксации остаточных напряжений при нагружении (виброобработке)*. Тула: Науч. труды Тульского Политехн. института: Управление сварочными процессами, 1980, с. 62–68.
138. Шнеер Ф. З., Федосеев В. Л.: *Вибрационная обработка для стабилизации внутренних напряжений нежестких цилиндрических деталей. Технология, организация и механизация механосборочных производств*. Москва: ЦНИИИТЭ-Итяжмаш, 1980.
139. Świć A.: *Technologia obróbki wałów o małej sztywności*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2009.
140. Świć A., Taranenko V., Wołos D.: *Nev metod for machining of low-rigidity shafts. Advances in manufacturing science and technology. Vol. 34, No 1, 2010, p. 59–71.*
141. Świć A., Taranenko W., Szabelski J.: *Modelling dynamic systems of low-rigid shaft grinding. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2011, 2 (50), s. 13–24.*
142. Świć A., Taranenko W.: *Adaptive control of machining accuracy of axial-symmetrical low-rigidity parts in elastic-deformable state. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2012; 14 (3): 215–221.*
143. Świć A., Hałas W.: *Wpływ naprężeń na dokładność wytwarzania części maszyn. Scientific bulletin of Chełm. Section of technical sciences, s. 209–213.*
144. Taranenko W., Świć A.: *Technologia kształtowania części maszyn o małej sztywności*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2005.

145. Taranenko W., Świć A.: Urządzenia sterujące dokładnością obróbki części maszyn o małej sztywności. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.
146. Taranenko G., Taranenko V., Szabelski J., Swic A.: Systemic analysis of models of dynamic systems of shaft machining in elastic-deformable condition. Applied Computer Science. Business Process Optimization. Vol. 3, No 2, 2007, s. 115–138.
147. Taranenko G., Taranenko W., Świć A., Szabelski J.: Modelling of dynamic system of low-rigidity shaft machining. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2010, 4 (48), s. 4–15.
148. Тараненко Г. В., Тараненко В. А., Шабельский Я.: Идентификация динамических систем обработки точением нежестких валов (часть 1). Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. Выпуск 35. Донецк: ДонНТУ, 2008, с. 208–218.
149. Тараненко Г. В., Тараненко В. А., Шабельский Я.: Идентификация динамических систем обработки точением нежестких валов (часть 2). Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. Выпуск 35. Донецк: ДонНТУ, 2008, с. 219–228.
150. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. В 4-х томах. Под ред. Солодовникова В. В. Москва: Машиностроение, 1972.
151. Технологические остаточные напряжения. Под ред. А. В. Подзея. Москва: Машиностроение, 1973.
152. Толоконников Л. А.: Механика деформируемого твердого тела. Москва: Высшая школа, 1979.
153. Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов. Москва: Металлургия, 1972.
154. Третьяков А. В., Трофимов Г. К., Гурьянова М. К.: Механические свойства сталей и сплавов при пластическом деформировании. Москва: Машиностроение, 1971.
155. Туровский М. Л., Биргер И. А.: Остаточные напряжения. В кн.: Фридман Я. Б. Механические свойства металлов, т. 1. Москва: Машиностроение, 1974.
156. Tymowski J.: Technologia budowy maszyn. Warszawa: WNT, 1989.
157. Вейнер Д., Ландау Г.: Температурные напряжения в упруго-пластических телах. Пластичность и термопластичность. Москва: Библиотечка Механика, 1962.
158. Wesołowski K.: Metaloznawstwo i obróbka cieplna. Warszawa: WNT, 1981.
159. Wiśniewski S.: Termodynamika Techniczna. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 1999.

160. Бивденко Ю. Н.: Равнодействующая технологических остаточных напряжений в поверхностном слое и ее применение для оценки влияния условий обработки на коробление деталей. Оптимизация технологических процессов по критериям. Москва: Наука, 1987.
161. Воронцов А. А.: Напряженное состояние заготовки при обратном выдавливании. Известия вузов. Машиностроение. 1980 № 10, с. 108–112.
162. Воронов А.А.: Основы теории автоматического управления. Ч.3. Ленинград: Энергия, 1970.
163. Wang Z., Kang R., Xie L.: Dynamic reliability modeling of systems with common cause failure under random load. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 3(43): 47–54.
164. Wysiecki M.: *Nowoczesne materiały narzędziowe*. Warszawa: WNT, 1997.
165. Золотухин Н.М.: Нагрев и охлаждение металла. Москва: Машиностроение, 1973.