

Oleg Draczew<sup>1</sup>, Antoni Świć<sup>2</sup>,  
Wiktor Taranenko<sup>2</sup>, Georgij Taranenko<sup>3</sup>

## PODSTAWY TEORETYCZNE I DOŚWIADCZALNE MODELOWANIA OPERACJI OBRÓBKII CIEPLNO-MECHANICZNEJ WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono podstawowe założenia, umożliwiające modelowanie operacji obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności. Pokazano schematy realizacji metod obróbki cieplno-mechanicznej, wyniki badań odkształceń i naprężeń przy obciążeniu osiowym, charakterystyki temperatury nagrzewania i chłodzenia, odkształceń i naprężeń. Przedstawiono przykład urządzenia do sterowania procesem odkształceń plastycznych wału o małej sztywności.

**Słowa kluczowe:** modelowanie, wały o małej sztywności, obróbka cieplno-mechaniczna

### WSTĘP

Przy produkcji samolotów, samochodów, ciągników, wyrobów elektrotechnicznych i innych, często są stosowane części o okrągłym przekroju poprzecznym – elementy cylindryczne (gładkie, stopniowane, krzywkowe i mimośrodowe) [1, 2].

Proces wykonania długich części osiowosymetrycznych, powinien zawierać operacje podstawowe, określające niezmiennosć kształtu części w procesie ich eksploatacji: prostowanie na zimno, obróbkę cieplno-mechaniczną, obróbkę mechaniczną i obróbkę wibracyjną. W artykule jest rozpatrywana operacja obróbki cieplno-mechanicznej wałów o małej sztywności.

Paczenie się części o małej sztywności jest uzależnione od naprężeń szczytkowych, powstających w wyniku odkształceń plastycznych przy obciążeniu półfabrykatu. W trakcie walcowania półfabrykatów długich można wyodrębnić dwie przyczyny powstawania naprężeń szczytkowych: nierównomierność odkształceń plastycznych metalu przy jego zgnieciu i niejednorodność pola temperaturowego podczas chłodzenia [6].

Poziom naprężeń szczytkowych w częściach o małej sztywności, w zależności od ich właściwości fizyko-mechanicznych, można obniżyć w wyniku zastosowania: odkształcenia plastycznego, wyżarzania lub odpuszczania [4, 5]. Jednym ze sposobów

---

<sup>1</sup>) Państwowy Uniwersytet Techniczny w Togliatti, Rosja.

<sup>2</sup>) Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Politechnika Lubelska.

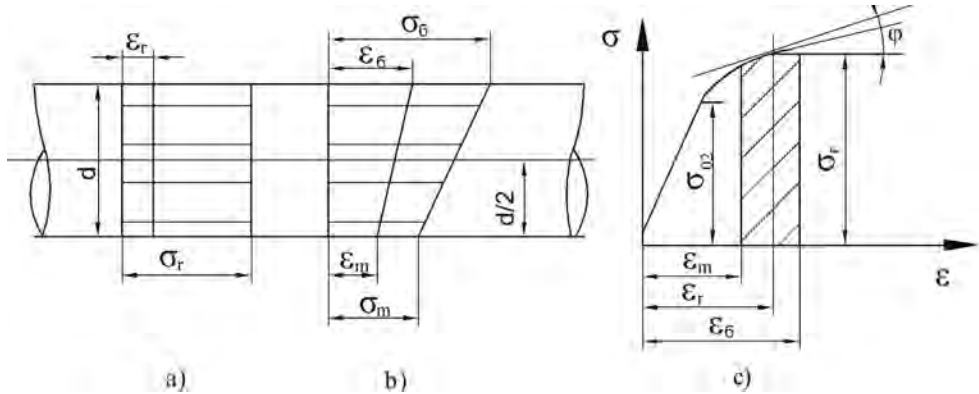
<sup>3</sup>) Narodowy Uniwersytet Techniczny w Sewastopolu, Ukraina.

zachowania niezmienności kształtu części jest obróbka cieplna przy ustalonym na sztywno położeniu półfabrykatu – w trakcie obróbki cieplnej bez takiego ustalenia (na przykład przy odpuszczaniu) praktycznie prawie zawsze zmianie ulegają wymiary części. Złożony stan mechaniczny materiału, w trakcie obróbki cieplnej wyrobów o podwyższonym poziomie naprężeń oraz różnorodność jego stanów fazowych, mogą być przyczyną zmiany wymiarów części w trakcie kolejnych operacji obróbki mechanicznej 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) [6]. Odpuszczanie realizowane po hartowaniu, w szczególności przy występowaniu austenitu szczytkowego, 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 może być modelowane zależnością nieliniową w funkcji działających naprężeń.

## **SPECYFIKA I WYMAGANIA DO DOKŁADNOŚCI OBRÓBKİ WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI**

W celu minimalizacji paczenia – odkształceń wałów o małej sztywności, w trakcie obróbki cieplnej pod obciążeniem należy stworzyć warunki do powstania odpowiedniego odkształcenia plastycznego lub przemiany fazowej. Na przykład, w trakcie przemiany martenzytycznej stal traci wytrzymałość i ulega niewielkiemu odkształceniu ( $\sigma_{02}$  ulega zmniejszeniu od 12 do 14 razy). Przy temperaturach hartowniczych pole naprężeń szczytkowych ulega redukcji do zera i jest jednorodne w przekroju – pełnej likwidacji ulega warstwa utwardzona przez zgniot. Technologicznie trudne jest utrzymanie takiego stanu materiału przy chłodzeniu do temperatury otoczenia. Parametry geometryczne dokładności półfabrykatu po prostowaniu i obróbce mechanicznej nie mogą być większe od tolerancji na obróbkę kształtującą. Nierównomierność odkształceń w przekroju poprzecznym i wzdłuż półfabrykatu jest spowodowana niedokładnością wykonania (szczególnie wielkością mimośrodów półfabrykatu – nie pokrywania się osi technologicznej i teoretycznej części). Przy obciążeniu, niesymetryczność w przekroju poprzecznym w wyniku odkształceń prowadzi do powstania momentu zginającego.

Rozpatrzone zostaną kolejne działania (procesy) technologiczne przy wprowadzeniu odkształcenia osiowego, w przypadku materiału nagrzanego i bez jego nagrzewania. W zależności od przeznaczenia wyrobu, każda operacja może występować jako samodzielna. Istota pierwszego procesu technologicznego polega na tym, że przy rozciąganiu wszystkie siły wzdłużne, w pierwszym przybliżeniu, są jednakowe – powstają



**Rys. 1.** Odskształcenia i naprężenia przy obciążeniu osiowym  
**Fig. 1.** Strain and stresses during axial tensions

takie same naprężenia (rys. 1a). Wielkość naprężeń roboczych  $\sigma_r$  można określić z diagramu naprężeń według wielkości odkształcenia względnego  $\epsilon_p$  (rys. 1c).

Na odcinkach skrzywionych pomimo rozciągania ma miejsce również prostowanie półfabrykatu, w wyniku czego odkształcenia względne warstw wzdłużnych tych odcinków są różne. Zwykle promień krzywizny nie jest mniejszy niż 20–30-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. 1b), a ich wartość najmniejszą i największą w warstwach skrajnych zewnętrznej i wewnętrznej wału, można przedstawić jako:

$$\epsilon_\delta = \epsilon_r + \frac{d}{2r_{sk}}, \quad \epsilon_m = \epsilon_r - \frac{d}{2r_{sk}},$$

gdzie:  $r_{sk}$  – promień krzywizny półfabrykatu.

Wartości wydłużeń względnych znajdują się w zakresie, przedstawionym na diagramie naprężeń strefą  $\epsilon_\delta - \epsilon_m$  (rys. 1c). Można więc przyjąć, że moduł sprężystości podłużnej  $E_y$  jest stały. W tym przypadku rozkład naprężeń również odpowiada zależności liniowej (rys. 1, b). Zależność naprężeń w strefie odkształceń względnych można zapisać jako:

$$\sigma_\delta = \sigma_r + \frac{E_y}{E} v, \quad \sigma_m = \sigma_r - \frac{E_y}{E} v, \quad (1)$$

gdzie:  $v$  — współrzędna naprężeń od centralnej warstwy półfabrykatu.

Siła rozciągająca i moment zginający wyznaczone są z zależności:

$$F_{roz} = \sigma_r \cdot S, \quad M_{zg} = E_y \cdot v / E \cdot J, \quad (2)$$

W wyniku nierównomiernego rozkładu naprężeń, po średnicy na odcinkach skrzywionych, działa moment sił wewnętrznych, który powinien być równoważony momentem zginającym zewnętrznym. Moment ten powstaje w wyniku przemieszczenia środka ciężkości przekroju poprzecznego skrzywionego 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:

$$y_e = J \cdot E_y / r \cdot S \cdot \sigma_r. \quad (3)$$

Wielkość  $\sigma_r$  jest tylko częścią, pozostałego po prostowaniu, naprężenia. Podstawowa część skrzywienia końcowego powstaje po zdjęciu zewnętrznego obciążenia rozciągającego, w wyniku relaksacji naprężeń szczątkowych i oddziaływań niesprężystych, to znaczy skrzywione wcześniej odcinki częściowo odbudowują krzywiznę, ponieważ przestaje na nie oddziaływać oprócz sił rozciągających również moment zginający spowodowany tymi siłami.

Na podstawie przeprowadzonych badań analitycznych procesów odkształcenia osiowego wału można wyciągnąć wniosek, że krzywizna ostateczna wyrobu zależy od skrzywienia początkowego  $1/R_{kr}$ , od właściwości fizyko-mechanicznych materiału i technologii wykonania. W związku z tym należy odnotować kilka podejść do projektowania procesów technologicznych obróbki wałów o małej sztywności, w zależności od materiału półfabrykatu. W przypadku, kiedy 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 sprężystości podłużnej. W przypadku stali niskowęglowych jest to strefa plastyczności ( $E_{y_0} = 0$ ). Przy określaniu odkształcenia osiowego, materiałów skłonnych do umacniania, strefa  $\varepsilon_\delta - \varepsilon_m$  na diagramie  $\sigma - \varepsilon$  powinna być umiejscowiona po odcinku początkowym wznoszenia się krzywizny naprężeń. Stale wysokowęglowe i wysokostopowe, charakteryzują się dużym wzrostem naprężeń na odcinku wydłużenia równomiernego, w wyniku dużych wartości modułu sprężystości podłużnej, wymagane są więc duże obciążenia osiowe, co powoduje, że odkształcenia znacznie przekraczając granicę wytrzymałości materiału.

Przedstawione podejście technologiczne, umożliwiające zmniejszenie krzywizny części osiowosymetrycznych, jest do przyjęcia w przypadku procesu obróbki zgrubnej (wstępnej) w przypadku wałów o stosunku  $L/d = 100$ , nieprzejawiających skłonności do umacniania.

W celu zwiększenia dokładności i niezmienności kształtu geometrycznego części o małej sztywności opracowano sposób, łączący w sobie proces prostowania i obróbki cieplnej [10, 11]. Istota tej metody polega na tym, że odkształcenie osiowe – rozciąganie jest przykładane do wału przy nagrzewaniu (do temperatury hartowania), natomiast prędkość stygnięcia wału (zamocowanego w urządzeniu) jest kilkakrotnie większa niż urządzenia (rys. 2a). Na rysunkach 2 i 3 cyfrą 1 oznaczono urządzenie, a 2 – wyrób oraz charakterystyki przy nagrzewaniu i chłodzeniu.

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

$$y = \alpha \cdot \sin \pi \cdot x / L, \quad (4)$$

a wielkość zmiany długości półfabrykatu określana jest zależnością (rys. 2a):

$$\Delta L = \pi^2 \cdot y_{\alpha}^2 / 4L, \quad (5)$$

gdzie:  $\alpha$  — początkowa strzałka ugięcia.

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

$$y_{\alpha 1} = y_{\alpha} / (1 + F_{roz} / F_{kr}), \quad (6)$$

z której można określić wartość obciążenia osiowego, niezbędnego do zmniejszenia ugięcia

$$F_{roz} = F_{kr} \cdot (y_{\alpha} / y_{\alpha 1} - 1), \quad (7)$$

gdzie:  $F_{kr}$  — siła osiowa krytyczna.

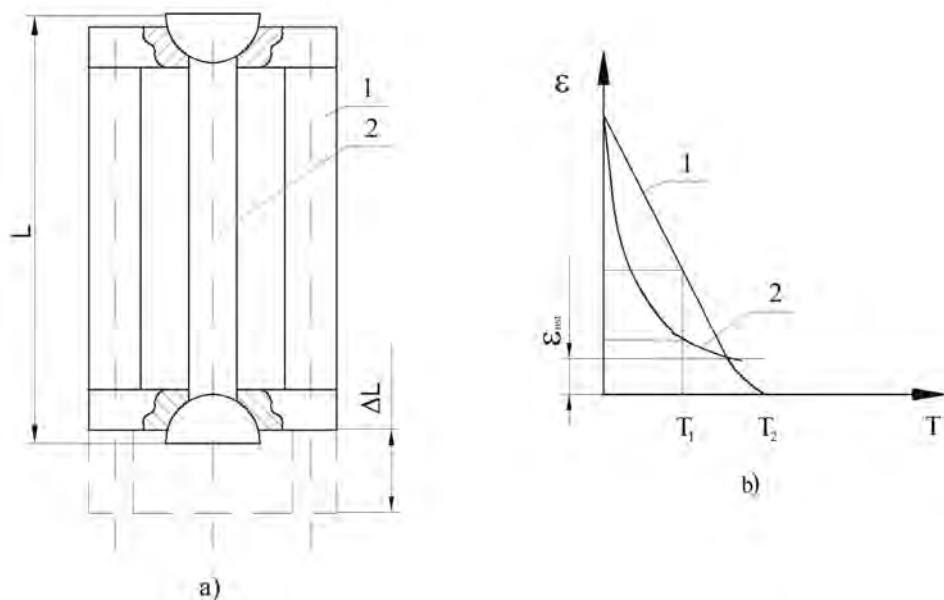
Zależność naprężeń od wydłużeń względnych może być stosowana pod warunkiem spełnienia nierówności (8):

$$\lambda \geq (\pi^2 \cdot E / \sigma_{02})^{1/2}, \quad (8)$$

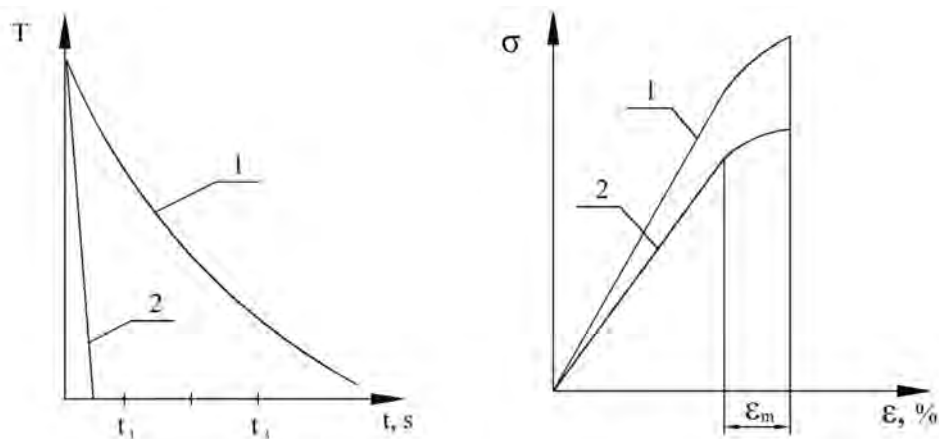
jeżeli  $\lambda < 100$ , to osiowa siła rozciągająca powinna być określana z zależności:

$$F_{roz} = E \cdot S_{pół} \cdot \Delta L / L, \quad (9)$$

gdzie  $S_{pół}$  – pole przekroju poprzecznego półfabrykatu.



**Rys. 2.** Schemat uproszczony realizacji technologicznej metody obróbki:  
 a) charakterystyki przy nagrzewaniu, b) chłodzeniu  
**Fig. 2.** Simplified model of realization of technological method of processing:  
 a) temperature profiles while heating, b) cooling



**Rys. 3.** Zależności temperatury chłodzenia urządzenia i półfabrykatu:  
 a) zależność naprężeń, b) wydłużeń względnych  
**Fig. 3.** The relation between the temperature of cooling the device and semimanufactured article:  
 a) the relation between strains, b) unit elongation

Na podstawie danych obliczeniowych można stwierdzić, że do osiągnięcia granicy proporcjonalności materiału (na przykład stal nierdzewna) półfabrykatu o średnicy 60 mm i długości 3000 mm, w przypadku którego  $\sigma_{02} = 200 \text{ N/mm}^2$ , jest konieczne 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; odkształcenie osiowe półfabrykatu jest uzyskiwane w wyniku doboru odpowiednich współczynników rozszerzalności cieplnej wyrobu i urządzenia oraz ich długości (półfabrykat jest umieszczany w urządzeniu i mocowany – rys. 2a). Różnica wydłużeń półfabrykatu i urządzenia jest określana z zależności:

$$\Delta L = \alpha_{urz}(T^\circ) \cdot T^\circ \cdot L_{urz} - \alpha_{pól}(T^\circ) \cdot T^\circ \cdot L_{pól} \quad (10)$$

Analiza pokazuje, że ze wzrostem temperatury nagrzewania różnica wydłużeń wzrasta nieliniowo. W celu utrzymania niezmienności geometrii wyrobu przy obróbce cieplnej w urządzeniu, należy wytworzyć wydłużenie sumaryczne nie mniejsze niż 1% jego długości.

Przy nagrzewaniu półfabrykat ulega wydłużeniu o:

$$\Delta L = (\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_{02} + \Delta_3) \cdot L \cdot K_1, \quad (11)$$

gdzie:  $\Delta_1$  – początkową krzywizną półfabrykatu,

$\Delta_2$  – różnicą współczynników rozszerzalności cieplnej materiałów,

$\Delta_{02}$  – umownym przedziałem proporcjonalności przy  $T = 20^\circ \text{C}$ ,

$\Delta_3$  – wydłużeniem względnym półfabrykatu,

$K_1 = S_{pól} + S_{pól} / S_{prz}$  – współczynnik uwzględniający ściśnięcie przyrządu

( $S_{pól}, S_{prz}$  – odpowiednio pole przekroju poprzecznego przyrządu i półfabrykatu).

Analiza zależności obliczeniowych (11) pokazuje, że ze wzrostem temperatury nagrzewania, odkształcenie osiowe półfabrykatu 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 jego chłodzenia jest mniejsza od 1,5 do 3 razy 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:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = b \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (12)$$

W celu rozwiązania analitycznego równania (12) należy wyznaczyć warunki brzegowe: 1) początkowy rozkład temperatury w materiale; 2) oddziaływanie na powierzchnię środowiska zewnętrznego – można je określić na trzy sposoby: a) temperaturą powierzchni, b) ilością ciepła przechodzącego przez powierzchnię, c) temperaturą otoczenia zewnętrznego i współczynnikiem wnikania ciepła  $\gamma$ . Zgodnie z prawem Newtona:

$$dQ = b(T_{prz}^{\circ} - T_c^{\circ})dS, \quad (13)$$

gdzie:  $dQ$  – ilość ciepła,  $T_{prz}^{\circ}$ ,

$T_c^{\circ}$  – temperatura ścianki przyrządu i cieczy,

$dS$  – jednostka powierzchni,

$b$  – współczynnik przewodności temperaturowej.

Wynikiem rozwiązania równania (12) jest funkcja, która powinna jednocześnie spełniać warunki brzegowe. Szukana funkcja zależy od dużej ilości parametrów, które można zgrupować w dwa bezwymiarowe zestawy:

– liczba Biota –  $B_i = \gamma \cdot \delta / \varphi$ ,

– kryterium Fouriera –  $F_0 = b \cdot t / \delta$ ,

gdzie:  $\varphi$  – współczynnik przewodzenia ciepła,

$\delta$  – grubość ścianki przyrządu,

$\gamma$  – współczynnik wnikania ciepła,

$t$  – czas chłodzenia.

Na podstawie drugiego twierdzenia podobieństwa, szukana funkcja w postaci bezwymiarowej  $Q / Q^{\checkmark}$ , w różnych punktach, może być przedstawiona jako:

$$Q / Q^{\checkmark} = \Phi(B_i, F_0, L),$$

gdzie:  $L = x / \delta$ ,  $x$  – współrzędne strefy nagrzewania.

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

$$\partial Q / \partial t = b(\partial^2 Q / \partial t^2 + \partial Q / t \partial t). \quad (14)$$

Warunki brzegowe: przy  $r = R$ ;  $\partial Q / \partial t = \gamma \cdot Q / \varphi_c$ .

Warunki początkowe: przy  $t = 0$ ;  $Q = Q^{\checkmark}$ .

Na wykresie zależności  $e = \psi(T^{\circ})$  (rys. 2b) pokazano charakter zależności odkształcenia przyrządu i wału przy chłodzeniu, gdzie  $\varepsilon_{ost}$  – odkształcenie półfabrykatu równe  $\varepsilon_{pl}$  (rys. 3b) – w przypadku różnicy współczynników rozszerzalności liniowej.

Jeżeli współczynniki rozszerzalności cieplnej półfabrykatu i przyrządu są jednakowe, to odkształcenie osiowe jest określane jako różnica długości przyrządu i półfabrykatu lub w wyniku odpowiedniego doboru prędkości ich chłodzenia (rys. 3a).



Naprężenia rozciągające osiowe przy obróbce cieplnej są określane z zależności:

$$\sigma_r = \alpha_T \cdot \Delta T^\circ \cdot E \cdot S_{pól} / S_{prz}, \quad (15)$$

gdzie:  $\Delta T$  – różnica temperatury półfabrykatu i przyrządu przy chłodzeniu,  
 $\alpha_T = \alpha(T^\circ) + T^\circ \cdot d\alpha / dT^\circ$  – rzeczywista różnica współczynników  
 rozszerzalności cieplnej.

Przy hartowaniu wału stopniowanego warunki równości naprężeń roboczych, na wszystkich jego stopniach, są określane z zależności:

$$S_{pól}^n \cdot E_{pól}^n \cdot \alpha(T^\circ) \cdot T^\circ / S_{prz}^n = S_{pól}^{n-1} \cdot E_{pól}^{n-1} \cdot \alpha(T^\circ) / S_{prz}^{n-1}, \quad (16)$$

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

W pierwszym etapie chłodzenia wału w przyrządzie, gdy różnica temperatur wału i przyrządu jest maksymalna, odkształcenia ostateczne półfabrykatu są sumą odkształceń sprężystych  $\varepsilon_y$ , plastycznych  $\varepsilon_{pl}$  i temperaturowych  $\varepsilon_T$ :

$$\varepsilon_\Sigma = \varepsilon_y + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_T, \quad (17)$$

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

Opracowana technologia obróbki cieplnej, z przyłożeniem odkształceń osiowych, umożliwia, niezależnie od właściwości materiału, eliminację naprężeń pozostałych od operacji poprzednich [8]. Przy chłodzeniu wału, zamocowanego w przyrządzie powstają jednak nowe naprężenia rozciągające, o rozkładzie równomiernie w przekroju półfabrykatu. Poziom naprężeń końcowych jest określany zależnością:

$$\sigma = E \cdot (\varepsilon_y + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_T). \quad (18)$$

Przy chłodzeniu powierzchnia zewnętrzna półfabrykatu ostyga szybciej niż wewnętrzna. Znak naprężeń w warstwach wierzchnich będzie więc przeciwny w stosunku do znaku naprężeń wewnątrz półfabrykatu. Po ochłodzeniu całkowitym znaki naprężeń ulegną zamianie. Zaletą proponowanego rozwiązania technologicznego jest uzyskanie takich samych znaków naprężeń w warstwach zewnętrznych, co wyklucza paczenie części. Dalsza obróbka przy równomiernym zdejmowaniu metalu odnośnie do osi wału również nie spowoduje paczenia części.

Przedstawione zależności są prawidłowe przy założeniu liniowości modelu. Nieliniowość, to znaczy odkształcenie plastyczne przy hartowaniu z odkształceniem osio-

wym, nie przekracza 1%, co umożliwia jej aproksymację z wystarczającą w praktyce dokładnością.

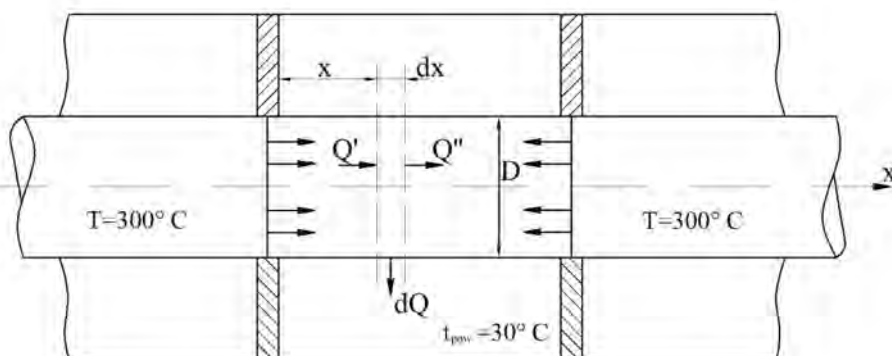
Proces hartowania jest początkiem technologii obróbki cieplnej, a więc procesy relaksacji i inne następstwa tutaj nie są rozpatrywane. Kontrola czynna stanu materiałów, w procesie nagrzewania i odkształcenia półfabrykatu, umożliwia sterowanie naprężeniami szcążkowymi w trakcie całego czasu obróbki.

## PRZYKŁAD URZĄDZENIA DO STEROWANIA PROCESEM ODKSZTAŁCEN PLASTYCZNYCH WAŁÓW O MAŁEJ SZTYWNOŚCI

Urządzenie do realizacji sposobu sterowania procesem odkształcenia plastycznego, wałów o małej sztywności (rys. 4) [3], zawiera piec szybowy 1, z sekcijnymi elektrycznymi elementami grzewczymi 2. Obrabiany półfabrykat jest ustawiany w przymie i umieszczany w piecu. Wstępnie na półfabrykacie są ustawiane żebra, rozdzielające przestrzeń pieca szybowego na komory, przy czym każda komora posiada 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  $T = 300^{\circ}\text{C}$  jest włączany system oddziaływania osiowego (rozciągania) na półfabrykat.

Właściwości fizyko-mechaniczne wzdłuż półfabrykatu nie są jednakowe, tak więc na różnych jego odcinkach czas osiągnięcia granicy plastyczności może być inny. Rejestracja miejsca naruszenia proporcjonalności wydłużenia osiowego jest wykonywana przy pomocy czujnika pneumatycznego (na rys. 4 umownie niepokazany).



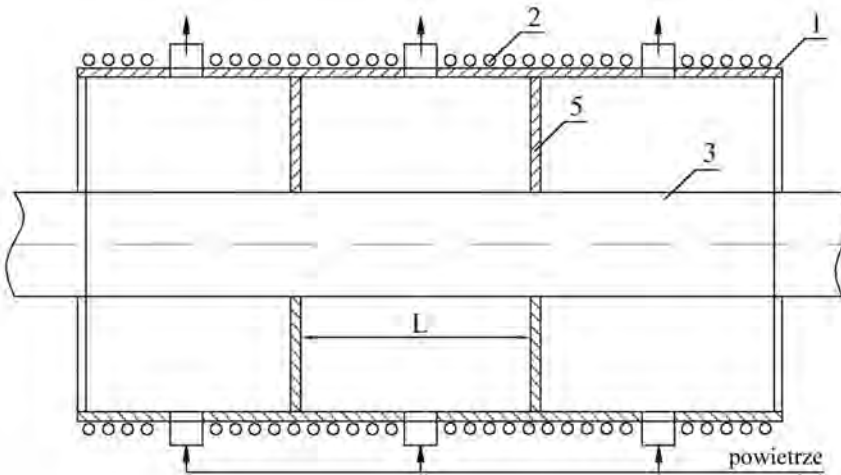
**Rys. 4.** Schemat urządzenia do sterowania procesem odkształceń plastycznych wału o małej sztywności

**Fig. 4.** Diagram of control device for process of elastic strain of non-rigid shafts

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  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , po czym znowu następuje nagrzewanie po odłączeniu podawania powietrza. Na rysunku 5 jest przedstawiony schemat obliczeniowy do określenia czasu ochłodzenia odcinka i jego długości.

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



**Rys. 5.** Schemat obliczeniowy do określania długości odcinka oraz czasu jego chłodzenia  
**Fig. 5.** Computational scheme for defining the length of section and the time of cooling it

Rozpatrzono przekazywanie ciepła przez sworzeń cylindryczny, którego przekrój poprzeczny jest równy:  $S = \pi \times R^2$ , a obwód przekroju  $U = 2\pi \cdot R$ , ( $R$  – promień wału).

Temperatura sworznia zmienia się tylko wzdłuż jego długości – jest funkcją 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. 5) wyodrębniano element  $dx$ , w przypadku którego zapisano równanie bilansu cieplnego:

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

Zgodnie z zasadą Fouriera:

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

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

a więc

$$Q' - Q'' = -\lambda_{prz} S \frac{dT^\circ}{dx} + \lambda_{prz} S \left( \theta + \frac{dT^\circ}{dx} dx \right), \quad (19)$$

z drugiej strony

$$dQ = \alpha_B \cdot U \cdot \theta \cdot dx. \quad (20)$$

Porównując zależności (19) i (20) otrzymano:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{\psi_B \cdot U \cdot T}{\lambda_{prz} \cdot S} = m^2 \cdot \theta, \quad (21)$$

gdzie:  $m = \sqrt{\psi_B \cdot U / \lambda_{prz} \cdot S}$  [1/m].

Rozwiązanie równania (21) można zapisać w postaci:

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

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

$$U / S = 4 / D,$$

$$K_1 = x \cdot m = x \sqrt{\frac{\psi_B \cdot U}{\lambda_{prz} \cdot S}} = x \sqrt{\frac{6 \cdot 4}{0,045 \cdot 14,5}} = 6x,$$

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

gdzie:  $x$  – współrzędna bieżąca,

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

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

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

Równanie krzywej temperaturowej przy danych warunkach jest następujące:

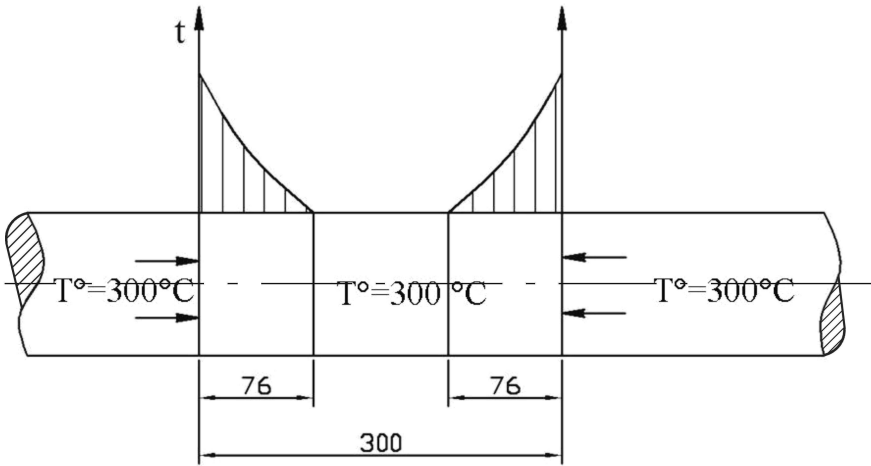
$$T^\circ = 270 \cdot e^{-6x}. \quad (22)$$

Z równania (22) jest wyznaczana długość odcinka  $x$ , na którym zostanie ustalona temperatura  $T^\circ = 200^\circ$ :

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

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

Schemat obliczeniowy do określenia czasu chłodzenia odcinka przedstawiono na rysunku 6.



**Rys. 6.** Schemat obliczeniowy do określenia czasu chłodzenia odcinka  
**Fig. 6.** Computational scheme for defining the time of cooling the section

Ilość ciepła przekazywanego przez przekrój jest równa:

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

Czas chłodzenia odcinka wału, w przypadku kryteriów:

$$B_i = \psi_B \cdot R / \lambda_{CT} = 6 \cdot 0,0225 / 14,5 = 0,0093,$$

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

Stosując zależność przy małych wartościach  $B_1$  otrzymano:

$$T = T' \cdot e^{-2B_i \cdot F_0}, \quad (23)$$

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

Z zależności (23) jest określany czas chłodzenia odcinka wału

$$t = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta^2 \cdot \ln \frac{\theta'}{\theta}}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0093} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,0225^2 \cdot \ln \frac{270}{170}}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0093} = 0,025 \text{ h} = 90 \text{ s}$$

Ilość ciepła, odprowadzanego przez powietrze w czasie pełnego ochłodzenia odcinka wału o długości  $L = 300 \text{ mm}$  przy  $T = 100^\circ\text{C}$ , wyznacza się jako:

$$Q' = c \cdot \gamma \cdot V \cdot T',$$

$$V = \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot L = \frac{3,14 \cdot 0,045^2}{4} \cdot 0,3 = 4,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3,$$

$$Q' = 0,5 \cdot 10^3 \cdot 7900 \cdot 100 \cdot 4,75 \cdot 10^{-4} = 187625 \text{ J}.$$

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

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

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

Poziom temperatury istotnie wpływa na odkształcenie plastyczne (rys. 4). Jak wynika z rysunku 4 opór przeciwko początkowym odkształceniom plastycznym (granica plastyczności) w istotny sposób zależy od temperatury. Przy zmianie temperatury występują zasadnicze różnice pomiędzy metalami z siecią regularną przestrzennie centryczną i siecią regularną płasko centryczną [8]. Odkształcenie metalu przy różnych temperaturach zależy głównie od dwóch czynników: wpływu temperatury na kierunek przepływu ciepła 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 metalu o sieci regularnej płasko centrycznej (stal X10CrNi18-8) wynika z tego, że metal w stanie odkształconym ma różną strukturę przy różnych temperaturach – 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 są doprowadzane do granicy plastyczności, dlatego występujące wcześniej naprężenia szczytkowe osiowe zanikają. W procesie prostowania osiowego przy odkształceniach ostatecznych 0,5–1% naprężenia szczytkowe zanikają w pełni [6].

Badania, prostowania osiowego wałów o małej sztywności ze stali austenitycznej X10CrNi18-8 (połączone z operacją hartowania, wykonywaną w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali) przeprowadzono w urządzeniu do obróbki cieplno-mechanicznej – odpuszczanie w tym przypadku nie jest wymagane [5]. Stale austenityczne charakteryzują się dużym współczynnikiem rozszerzalności i niską granicą plastyczności, a więc w celu wytworzenia obciążenia prostowania osiowego, po zakończeniu nagrzewania półfabrykatu wału do hartowania, końce jego są ustalane w urządzeniu (wykonanym ze stali o współczynniku rozszerzalności termicznej niższym niż materiał półfabrykatu wału), które jest poddawane chłodzeniu.

W wyniku różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej, przy chłodzeniu powstaje obciążenie osiowe, które działając na półfabrykat wału powoduje jego prostowanie osiowe.

## PODSUMOWANIE

Przeanalizowano procesy technologiczne, z zastosowaniem odkształcenia osiowego, w przypadku materiału nagrzanego i nienagrzanego. Każda operacja może być realizowana jako samodzielna w zależności od przeznaczenia wyrobu.

W celu zwiększenia dokładności i niezmienności kształtu geometrycznego części o małej sztywności, opracowano sposób łączący proces prostowania i obróbki cieplnej. Istota jego polega na tym, że odkształcenie osiowe – rozciąganie ma miejsce przy nagrzewaniu wału, natomiast przy stygnięciu wyrób jest ustalany odnośnie urządzenia, przy czym prędkość stygnięcia wału jest kilkakrotnie większa niż urządzenia. Ma zastosowanie fizyka samego procesu obróbki cieplnej – odkształcenie osiowe półfabrykatu jest realizowane w wyniku doboru współczynników rozszerzalności cieplnej wyrobu i urządzenia, oraz ich długości.

Przeprowadzono badania eksperymentalne – w opracowanym urządzeniu do obróbki cieplno-mechanicznej, w przypadku prostowania osiowego wałów o małej sztywności ze stali austenitycznej X10CrNi18-8, połączonego z operacją hartowania (przebieganą w celu zwiększenia odporności korozyjnej stali) – potwierdziły prawidłowość przyjętych założeń teoretycznych.

Zastosowanie proponowanego sposobu obróbki wałów, o małej sztywności, w przedsiębiorstwach przemysłu maszynowego, umożliwi znaczące podwyższenie jakości tych wyrobów, przy dużej wydajności ich wytwarzania.

## PIŚMIENNICTWO

1. Abakumov A.M., Taranenko V.A., Taranenko G.V.: Sposob mekhanicheskoy obrabotki nezhestkikh osesimetricznykh detalej i ustrojstvo dlja ikh realizacii. MKI B23B 1/00, B23Q 15/00. Zajavka na patent Rossii. No 96109283 ot 22.05.96.

2. Abakumov A.M., Vidmanov Ja. I., Mikhelevich V.N.: Algoritmizacija processa prodol'nogo tochenija. Stanki i instrument No 9, 1972: 29–31.
3. Avtorskoje svidetel'stvo SSSR a 1230715, V21D 3/16, 1986.
4. Drachev A.O., Taranenko G.V., Taranenko V.A., Svic' A.: Sposob termomekhanicheskoy obrabotki nezhestkikh dlinnomernykh valov. Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: Materialy mezhdunarodnojj nauchno – tekhnicheskoy konferencii. Sevastopol': Izdatel'stvo SevNTU 2009: 56–59.
5. Drachev A.O., Drachev O.I., Taranenko G.V., Taranenko V.A., Svic' A.: Termosilovaja obrabotka stupenchatykh osesimmetrichnykh detalej. Avtomatizacija: problemy, idei, reshenija: Materialy mezhdunarodnojj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Sevastopol': Izdatel'stvo SevNTU 2009: 18–21.
6. Hałas W. Badania wpływu naprężeń szczytkowych na dokładność wytwarzania wałów. Rozprawa doktorska. Lublin: Politechnika Lubelska 2010.
7. Halas W., Taranenko V., Swic A., Taranenko G.: Designing structure of operations of technological process of machining shafts in CIM considering the technological inheritance. Preprints 9 th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS'08) Szczecin, Poland 2008: 245–250.
8. Ivovich V. A.: Perekhodnye matricy v dinamike uprugikh sistem. Moskva: Mashinostroenie 1969, 199 s.
9. Karpushkin V. A.: Issledovanie uprugikh progibov nezhestkikh detalej pri tokarnoy obrabotke s rastjazheniem. Vesci Akademii navuk Belaruskai SSR, Ser. Fiehika – tekhnichnykh nauk No 1, 1978: 6–9.
10. Taranenko G., Taranenko V., Szabelski J., Swic A.: Systemic analysis of models of dynamic systems of shaft machining in elastic-deformable condition. Applied Computer Science. Business Process Optimisation. Vol. 3, No 2, 2007 Technical University of Žilina, Slovenska Republika
11. Taranenko W., Świć A., Wołos D.: Kolejność procedur i operacji projektowych dla typowego procesu zautomatyzowanego projektowania procesów technologicznych wałów o małej sztywności. W: Urządzenia sterujące dokładnością obróbki części maszyn o małej sztywności. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2006: 45–60.

## THE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL BASES OF MODELLING THE THERMO-MECHANICAL PROCESSING OF NON-RIGID SHAFTS

### Summary

The paper introduces scientific principles of modeling the thermo-mechanical processing of non-rigid shafts. The schemes of realization of the thermo-mechanical processing of non-rigid shafts, the results of research of strains and stresses during axial tension and temperature profiles while heating and cooling were presented. The example of device for controlling the process of non-rigid shafts' elastic deformation was introduced.

**Keywords:** modeling, non-rigid shafts, thermo-mechanical processing.