

Witalij Devjatov, ¹Jacek Michalczyk, ²Zygmunt Potęga
¹Politechnika Częstochowska, ²Akademia im. Jana Długosza

METODOLOGIA OKREŚLENIA NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH NA PRZYKŁADZIE PROCESU KALIBROWANIA PRĘTÓW

Streszczenie

Naprężenia własne są to naprężenia mechaniczne występujące w wyrobie bez oddziaływania jakichkolwiek sił z zewnątrz. Polegają one na zmianie położenia równowagi atomów, zmianie ich odległości między sobą, a także na zmianie kątów walencyjnych w łańcuchach cząsteczek. Do powstawania naprężeń własnych m. in. prowadzi nierównomierna szybkość chłodzenia poszczególnych warstw w przekroju ścianki wypraski, gdyż powierzchnia ścianki chłodzi się szybciej niż jej środek. Prowadzi to do powstania naprężeń własnych ściskających na powierzchni, natomiast wewnątrz wypraski naprężeń własnych rozciągających oraz ciśnienia szczątkowego wewnątrz wypraski, które powstaje na skutek nadmiernego ciśnienia docisku. W przypadku tworzyw amorficznych prowadzi to do powstania mikropęknięć w warstwie zewnętrznej. Celem pracy jest przedstawienie metodyki określenia wartości naprężeń własnych poprzez budowanie modelu matematycznego dla konkretnego procesu przeróbki plastycznej z uwzględnieniem wpływu temperatury, geometrii narzędzia i prędkości wyciskania na wysokość naprężeń własnych. Do określenia konkretnych wartości naprężeń w wybranych strefach kalibrowanego pręta zastosowano teorię małych odkształceń w powiązaniu z zagadnieniem termo-sprężysto-plastyczności.

Słowa kluczowe: naprężenia własne, procesy kalibrowania

Wstęp

Naprężenia własne pojawiają się praktycznie po wszystkich procesach obróbki mechanicznej i cieplnej (obróbce plastycznej, skrawaniem, spawaniu, odlewaniu, hartowaniu itp.). Wartość naprężeń własnych może osiągnąć nawet dwukrotną wartości granicy plastyczności (σ_p). W zależności od znaku naprężeń (rozciąganie lub ściskanie) naprężenia te mogą mieć pozytywny lub negatywny wpływ na dalszą eksploatację otrzymanych wyrobów.

Pozytywny wpływ na eksploatację wyrobów metalowych odgrywają naprężenia własne otrzymywane np. w procesie powierzchniowej obróbki plastycznej (powierzchniowe kalibrowanie na zimno, obróbka rolkami roboczej powierzchni i przejściowych stref). W procesach tych obecność ściskających naprężeń na powierzchni podwyższa wytrzymałość zmęczeniową materiału [1]. Dla przykładu wytrzymałość lufy armatniej oraz zbiorników wysokociśnieniowych podwyższano za pomocą wykonania tulei dwuwarstwowych przez naciąganie [2].

Bardzo negatywny wpływ mają duże naprężenia własne o wartościach ujemnych. Np. obecność naprężeń własnych w dwuteowniku otrzymywanym przez walcowanie na gorąco spowodowało zmniejszenie nośności kolumn wykonanych z tych dwuteowników o 30% [4]. Naprężenia własne mogą powodować zmianę kształtu profilu, skrzywienia, zniszczenia i zmniejszyć wytrzymałość na obciążenia cykliczne. Korozyjne zniszczenie też zależy od wielkości naprężeń własnych. Istnieje wiele sposobów zmniejszenia naprężeń własnych i należą do nich: obróbka cieplna oraz prostowanie mechaniczne, jednak nie są one pozbawione wad. Naprężenia własne, po zastosowaniu wyżarzania w celu ich usunięcia, nie znikają zupełnie a wartości znacznie zależą od temperatury, czasu wyżarzania, gatunku materiału i masy wyrobu. Następuje zmiana kształtu i wymiarów wyrobu, a w niektórych gatunkach materiałów zachodzi szybciej starzenie odkształcalne i pojawienie się nowych naprężeń własnych. Przy zastosowaniu w celu zmniejszenia naprężeń własnych sposobu prostowania wyrobu wielkość zakrzywień zmniejsza się, jednak naprężenia własne przekształcają się ponownie, a czasami nawet rosną.

Istota powstawania naprężeń własnych

Naprężenia własne pojawiają się w wyniku niezgodności odkształceń sprężystych. Ta niezgodność jest wynikiem nierównomierności rozkładu pola odkształceń i pola rozkładu temperatur obserwowanych w procesie przeróbki plastycznej i chłodzenia. Do ilościowego określenia tych niezgodności niezbędne jest właśnie rozwiązanie brzegowego zagadnienia termo-sprężysto-plastyczności.

Czym większe są niezgodności odkształceń sprężystych, tym większe naprężenia własne w ciele odkształcalnym. Podstawowymi przyczynami pojawienia się naprężeń własnych jest niejednorodność odkształceń plastycznych i pola temperatur w czasie obróbki plastycznej i chłodzenia. W przypadku walcowania lub ciągnięcia profili większy wpływ na pojawianie się naprężeń własnych ma niejednorodność rozkładu pola temperatur w czasie chłodzenia tych profili. Co do procesów wyciskania profili to największą rolę odgrywa niejednorodność odkształceń oraz pola temperaturowego w czasie procesów przeróbki plastycznej, ponieważ po wyciskaniu profili w większości przypadków nie są one prostowane, a końcówki wyrobu są odcinane.

W celu określenia naprężeń własnych otrzymanych po procesie wyciskania przeanalizowano proces kalibrowania prętów i poddano ocenie wpływ temperatury, geometrii narzędzia i prędkości wyciskania na wysokość naprężeń własnych.

Postawienie zadania

Do określenia naprężeń własnych zastosowano metodykę rozwiązywania zagadnień brzegowych sprężysto – plastycznych zgodnie z [2]. Metodyka ta pozwala na określenie pól odkształceń, naprężeń, temperatur oraz stref sprężystości i plastyczności, daje również możliwość wyznaczenia ilościowego wykorzystania zapasu plastyczności w sposób dynamiczny w czasie procesu odkształcania.

Jako przykład rozwiązano zagadnienie termo–sprężysto–plastyczności dotyczące procesów kalibrowania prętów przez matrycę z małymi kątami nachylenia $\alpha = 8^\circ$ i 20° .

Proces kalibrowania (redukowania) stosuje się w celu podwyższenia dokładności wymiaru średnicy pręta oraz własności mechanicznych powierzchni pręta.

W praktyce często proces kalibrowania jest operacją wykańczającą. Dlatego obecność naprężeń własnych i ich wielkość mają wpływ na charakterystykę eksploatacji wyrobów.

Ponieważ kąty stożkowatości matrycy oraz stopień odkształcenia są małe, również odkształcenia liniowe i postaciowe są niewielkie. W związku z tym możemy wykorzystać w celu budowy modelu matematycznego procesu kalibrowania teorię małych odkształceń [1]. Wówczas zagadnienie termo–sprężysto–plastyczności może być postawione w postaci:

równanie równowagi:

$$\sigma_{ij,i} + F_i = 0, \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad \forall \bar{x} \in \Omega = \Omega^p \cup \Omega^e \quad (1)$$

zależności geometryczne:

$$\zeta_{ij} = \frac{1}{2}(V_{i,j} + V_{j,i}), \quad \forall \bar{x} \in \bar{\Omega} \quad (2)$$

równania fizyczne:

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma = \lambda \xi_{ij} \quad \forall x \in \bar{\Omega}^p \quad (3)$$

równanie nieściśliwości:

$$\xi_{ij} \cdot \delta_{ij} = 0, \quad \forall x \in \bar{\Omega}^e \quad (4)$$

gdzie: $\lambda = \phi(l)/3H$

Ω – strefa odkształceń w kotlinie,

Ω^p – strefa odkształceń plastycznych,

Ω^e – strefa odkształceń sprężystych,

$\phi(l)$ – granica umocnienia materiału,

l – długość łuku trajektorii odkształceń,

e_{ij} – składowe tensora prędkości odkształceń.

Dla stref sprężystych zamiast równań (3), (4) należy stosować równania:

$$S_{IJ}^* = 2G\xi_{IJ}, \quad \forall x \in \Omega^e \quad (5)$$

$$\xi_{IJ} = K\sigma\xi_{IJ}, \quad \forall x \in \Omega^e \quad (6)$$

Warunki brzegowe w postaci ogólnej:

$$v_n = \overset{\wedge}{v_n}, (\sigma_\tau)_k = \left(\overset{\wedge}{\tau_\tau}\right)_k \quad (k = 1, 2) \quad \forall \bar{x} \in \bar{S}_A \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} \cdot n_j = 0 \quad \forall \bar{x} \in \bar{S}_B \quad (8)$$

gdzie: n – normalna do powierzchni,

t – składowa styczna.

Do liczbowego określenia naprężeń własnych wykorzystano metodykę budowy modelu matematycznego procesu kalibrowania, podstawą której jest ogólna teoria procesów sprężysto–plastycznych A. A. Iluszyna [1]. Metodyka ta pozwala na uzyskanie wyczerpującej informacji o procesie odkształcania niezbędnej do określenia czynników mających wpływ, na jakość wyrobów oraz parametrów siłowo–energetycznych [2]. W odróżnieniu od znanych metod, model matematyczny pozwala uwzględnić historię odkształcenia każdej cząstki metalu, i otrzymać informację o stanie naprężeniowo odkształcalnym, zapasie

plastyczności w każdym etapie procesu, rozkładzie stref sprężystych i plastycznych, a głównie określić te wartości z uwzględnieniem temperaturo-wo-prędkościowych zjawisk, co jest bardzo potrzebne do określenia naprężeń własnych.

Do określenia naprężeń własnych potrzebne jest rozwiązanie brzegowego zagadnienia termo-sprężysto-plastycznego.

W celu rozwiązania postawionego zagadnienia trzeba uwzględnić warunki brzegowe, odpowiadające badanemu procesowi kalibrowania.

Na rysunku 1 przedstawiony jest schemat procesu kalibrowania i aproksymacja badanego obszaru elementami skończonymi. Narzędziem roboczym (stemplem) można zadać wzdłużną składową wektora prędkości, równą prędkości ruchu stempla, a składową radialną przyrównać do zera.

Temperaturę na granicy S_1 , przyjmujemy równą początkowej temperaturze wstępniaka.

$$\theta = \theta_0, \quad V_z = \hat{V}_n, V_r = 0, \quad (r, z) \in S_1$$

Na granicy S_2 warunki brzegowe można zapisać w postaci:

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = -\alpha_k(\theta - \theta_k) + \frac{1}{2}W, \quad V_n = 0, \quad \tau_k = f\sigma_n; \quad (r, z) \in S_2$$

gdzie: α_k – współczynnik wymiany ciepła z pojemnikiem

θ_k – temperatura pojemnika

$W = W(\tau_k, V_s)$ – powierzchniowe źródło ciepła pojawiające się wskutek tarcia:

f – współczynnik tarcia.

Na części stożkowej matrycy S_3 warunki brzegowe mają postać:

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n} = -\alpha_m(\theta - \theta_m) + \frac{1}{2}W, \quad V_r = 0, \quad \tau_k = f \cdot \sigma_r, \quad (r, z) \in S_3$$

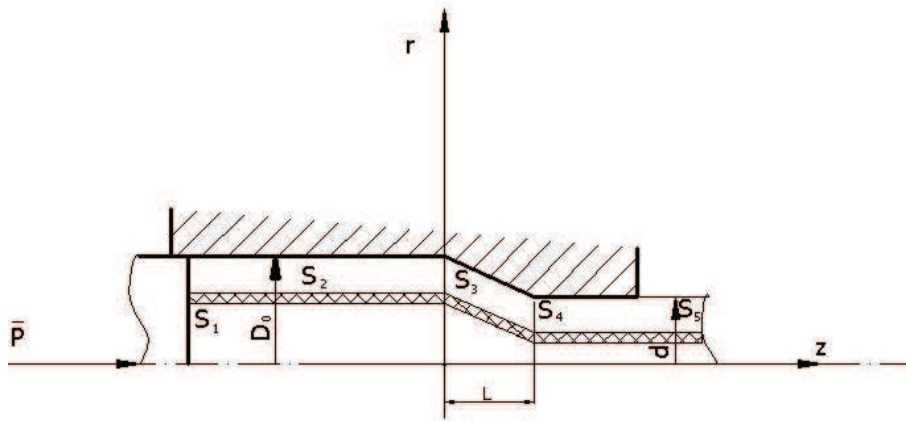
W strefie kalibrującej S_4 warunki brzegowe mają postać:

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = -\alpha_m(\theta - \theta_m) + \frac{1}{2}W, \quad V_r = 0, \quad \tau_k = f \cdot \sigma_r, \quad (r, z) \in S_4$$

gdzie indeks „m” oznacza matrycę.

Na swobodnej powierzchni S_5 :

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r} = -\alpha_s(\theta - \theta_s), \quad \sigma_r = 0, \quad \tau_{RZ} = 0, \quad (r, z) \in S_5$$



Rys. 1. Schemat procesu redukowania przekroju pręta

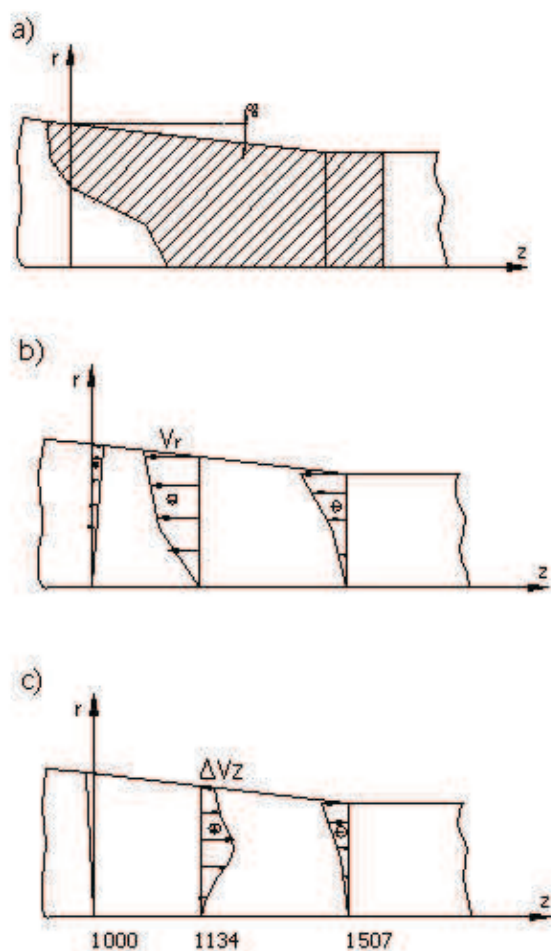
Wyniki

Po rozwiązaniu zagadnienia brzegowego termo–sprężysto–plastyczności metodą wariacyjną [3], otrzymano: pola prędkości przemieszczeń cząstek metalu strefy sprężystego i plastycznego odkształcenia, rozkład naprężeń wzdłużnych, promieniowych i obwodowych, wyczerpania zapasu plastyczności ψ , wskaźnika plastyczności ($\sqrt{3}\sigma/\sigma_i$) i rozkład naprężeń własnych. Badano proces kalibrowania wstępniaka ze stali 45 o wymiarach:

- średnica wstępniaka przed redukowaniem $D_0 = 25,0 \text{ mm}$,
- po redukcji przekroju $d = 20 \text{ mm}$,
- temperatura początkowa wstępniaka wynosiła:
 $\theta = 800^\circ\text{C}$ i $\theta = 20^\circ\text{C}$,
- początkowa prędkość kalibrowania $V_0 = 30 \text{ mm/s}$,
- wartość współczynnika tarcia $f = 0,3$.

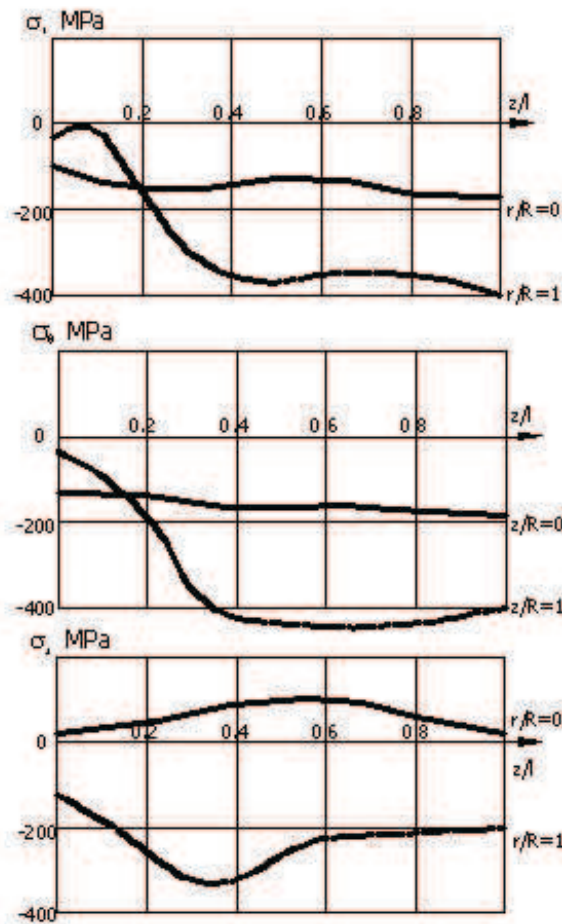
W trakcie badań zmieniano kąt stożkowatości matrycy: $\alpha = 8^\circ, 20^\circ, 35^\circ$, i początkową temperaturę.

Na rysunku 2a pokazano rozkład stref sprężystych i plastycznych przy kalibrowaniu pręta przez matryce z kątem stożkowatości $\alpha = 8^\circ$. Jak widać strefa plastyczna wychodzi za stożkową część matrycy na wejściu i wyjściu a w części środkowej wyraźnie pojawia się strefa sprężysta dochodząca prawie do połowy „kotliny” matrycy.



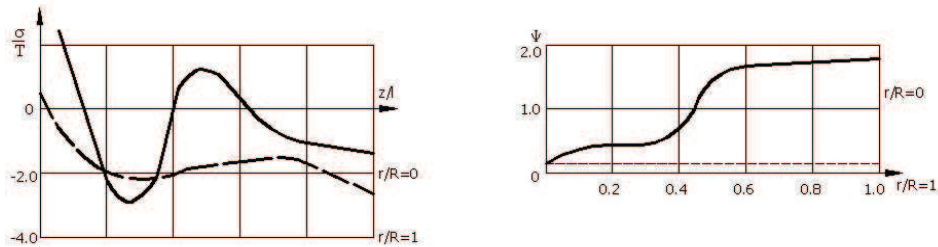
Rys. 2. Rozkład: a) stref sprężystych i plastycznych: b) prędkości płynięcia materiału w kierunku promieniowym c) prędkości płynięcia materiału w kierunku wzdłużnym

Zjawisko to zależy od rozkładu prędkości płynięcia metalu pokazanego na rysunku 2b i 2c, z których widać, że środkowe warstwy metalu przemieszczają się wolniej niż warstwy powierzchniowe. W skutek różnicy odkształceń w przekroju pręta po wyjściu z matrycy pojawiają się naprężenia rozciągające w warstwach środkowych i ściskające warstwach powierzchniowych (Rys. 3).



Rys. 3. Rozkład naprężeń w procesie redukowania pręta

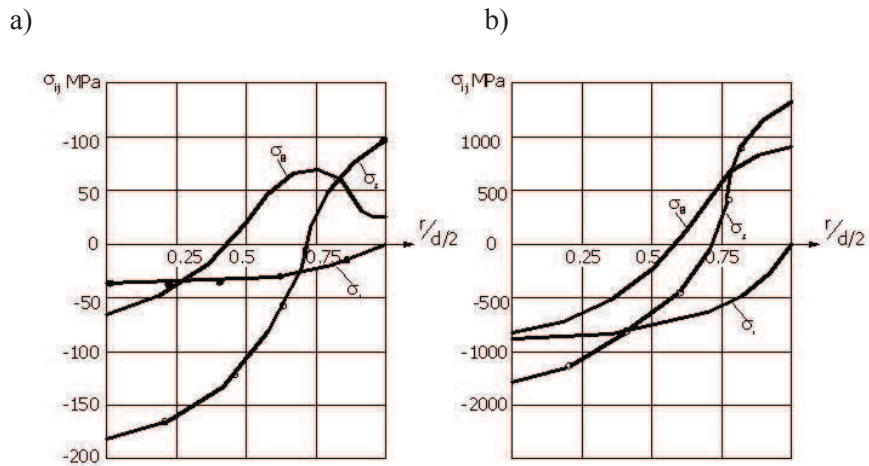
Obliczenia pokazały też, że przy takich parametrach kalibrowania możliwe jest pojawienie się pęknięć w warstwach środkowych pręta. Zapas plastyczności ψ zostaje wyczerpany przy $z/l \approx 0,42$ (Rys. 4)



Rys. 4 Rozkład wartości wskaźnika plastyczności σ/T i wyczerpania zapasu plastyczności Ψ w pręcie

Aby uniknąć zjawiska pęknięcia należy zwiększyć wartość kąta α do 20° lub więcej. Przy $\alpha = 20^\circ$ $\Psi \approx 0,3$, a przy $\alpha = 35^\circ$ $\Psi \approx 0,1$ w warstwach środkowych pręta na całej długości stożkowej części matrycy.

Naprężenia własne określono w momencie, gdy wszystkie obciążenia zewnętrzne są równe zero a rozkład temperatury jest równomierny, zgodnie z założeniem, że naprężenia własne są naprężeniami w obszarze badanym wynikającymi przy braku działań zewnętrznych. Wartość naprężeń własnych określono po wyjściu z pierścienia kalibrującego matrycy. Rozkład naprężeń własnych w przekroju pręta został przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Rozkład naprężeń własnych przy redukowaniu pręta na ciepło (a) i na zimno (b)

Wnioski

Naprężenia, które powstają w pręcie po wyjściu z narzędzia mogą się różnić od naprężeń, które powstaną po ochłodzeniu metalu przez powietrze. Jednakże interesujące wydaje się być prześledzenie powstawania naprężeń własnych bezpośrednio w wyniku niejednorodności deformacji plastycznych przy odkształcaniu. Na rysunku 5a pokazano wykresy wzdłużnych, obwodowych i promieniowych naprężeń własnych w pręcie po procesie półgorącego kalibrowania. Ostateczne naprężenia radialne pod względem wielkości są prawie o rząd mniejsze od naprężeń wzdłużnych. Na podstawie przedstawionych wyników widać, że przy różnych temperaturach jakościowy rozkład naprężeń zostaje zachowany. Na powierzchni pręta powstają rozciągające wzdłużne i obwodowe naprężenia własne, natomiast w warstwach środkowych – ściskające.

Po wyjściu z narzędzia zewnętrzne warstwy dążą do wydłużenia, wskutek czego powstają w nich naprężenia rozciągające. Warstwy wewnętrzne mają tendencję do skrócenia, co prowadzi do pojawienia się naprężeń ściskających.

Wartości naprężeń własnych, uwarunkowane niejednorodnością deformacji, przy kalibrowaniu na półgorąco są niewielkie i nie przekraczają 200 MPa. Podczas następującego po tym chłodzenia naprężenia własne w istotny sposób mogą wzrosnąć.

W przypadku odkształcenia na zimno naprężenia własne wzrastają w warstwach zewnętrznych i mogą osiągać 1500 MPa, co ilustruje rysunek 5b.

Literatura

- [1] Iliuszyn A. A., *Plastyczność*, Akademia Nauk, Moskwa 1963.
- [2] Pozdeev A. A., Niaszyn Ju. J., P. Trusov V., *Naprężenia własne*, Nauka, Moskwa 1982.
- [3] Kolmogorov V. L., *Mechanika obróbki materiałów przez wyciskanie*, Metalurgia, Moskwa 1986.
- [4] Deviatov V. V., Dyja H. S., Stolbov V. Y. i in., *Matematyczne modelowanie i optymalizacja procesów wyciskania*, Prace Naukowe Politechniki Częstochowskiej Seria Metalurgia nr 38, Częstochowa 2004.
- [5] Deviatov V. V., Michalczyk J.: *Analityczna optymalizacja procesów przeróbki plastycznej*, [w:] *Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej* red. J. Siwka (i in.), WIPMiFS Politechniki Częstochowskiej 2004. str. 282–287,

Witalij Devjatov, ¹Jacek Michalczyk, ²Zygmunt Potęga

¹Politechnika Częstochowska, ²Akademia im. Jana Długosza

THE METHODOLOGY OF DETERMINING THE INTERNAL STRESS ON EXAMPLE OF PROCESS IRONING THE BARS

Summary

Internal stress are then mechanical stepping out in article without influence from outside any strengths tensions. They depend on change of position of equilibrium atoms, change of their distance between me and also on change of valency angles in chains of particles. To formation of internal stress for example the unequal speed of cooling in section of side the individual layers stamping leads it because the surface of side was cooled was more quickly than her centre it leads to rise of internal tensions squeezing on surface however inside the stamping of own tensions spreading the as well as residual pressure inside the stamping which comes into being on result of excessive pressure the pressure. This in case of amorphous materials leads to rise the micro - crack in external layer. The performance of methodology of qualification value internal stress is the aim of work across building for concrete process of plastic alteration the mathematical model from regard the influence of temperature, geometry of tool and speed of extrusion on height of internal tensions. It the zones of calibrated rod to qualification of concrete values of stress in chosen were applied was the theory of small deformations in connection with question hot springs–elastic–plasticity.

Keywords: internal stresses, calibration processes