

ное усилие волочения  $P_B$  на выходе из волоки, определяемое прочностью материала и поперечным сечением заготовки, будет не менее усилия, необходимого для преодоления сопротивления течению металла в локализованном очаге деформации, т. е.

$$\sigma_m f \geq \xi \sigma_m F_{\text{л}},$$

где  $f$  — площадь поперечного сечения проволоки на выходе из волоки;  $F_{\text{л}}$  — площадь сосредоточенной пластической деформации.

Очевидно,  $F_{\text{л}}$  зависит от площади контакта  $F_{\text{к}}$ , которая в свою очередь определяется степенью деформации и формой сечения заготовки:

$$F_{\text{л}} = f(F_{\text{к}}) = f(e_i).$$

Если волочению подвергается упрочняющийся материал, неравенство имеет вид

$$f \sigma_m \geq \xi \sigma_m F_{\text{л}}.$$

Способ локализации очага деформации позволяет варьировать усилие волочения и тем самым уменьшать вероятность обрывов при волочении микропроволоки. Однако это преимущество, а также выигрыш в усилиях должны замениться работой пластической деформации, которую необходимо совершить для полного формообразования сечения заготовки путем дополнительного движения инструмента.

По кинематике возможно различное движение деформирующего инструмента, однако применительно к волочению проволоки оно должно обеспечивать перемещение зоны деформации по круговому контуру и осуществлять в конечном итоге пластическую обкатку заготовки. По такому принципу можно осуществлять процесс волочения с вращательным движением деформирующего инструмента относительно продольной оси заготовки или так называемое ротационное волочение. Другой способ основан на применении возвратно-поступательного перемещения в поперечном к оси протягивания заготовки направлении плоского или цилиндрического инструмента. Основанный на пластическом перекачивании цилиндрической заготовки способ наиболее эффективен при волочении проволоки малых диаметров.

УДК 621.78–536.212

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Э.А. ГУРВИЧ, Н.Л. МАНДЕЛЬ,  
П.В. СЕВАСТЬЯНОВ, Л.Г. ДЫМОВА, кандидаты техн. наук,  
С.Н. НЕСЕНЧУК (БПИ)

### АНАЛИЗ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА ПЕРЕД ПРОКАТКОЙ

Рассмотрим квазистатическую несвязанную задачу термоупругопластичности для реальных условий нагрева металла в кольцевой печи осепрокатного производства. Математическая модель нагрева в этом случае может быть

представлена в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right]; \quad (1)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad T \Big|_{\tau=0} = T_0; \quad (2)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha [T_n(\tau) - T \Big|_{r=R}] + \sigma(\tau) [T_n^4(\tau) - T^4 \Big|_{r=R}]; \quad (3)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L/2} = \alpha [T_n(\tau) - T \Big|_{z=L/2}] + \sigma(\tau) [T_n^4(\tau) - T^4 \Big|_{z=L/2}]. \quad (4)$$

Параметры внешнего теплообмена  $\alpha$  и  $\sigma$  определяются посредством параметрической идентификации на основании результатов экспериментальных исследований.

Решение задачи (1)–(4) осуществляется локально-одномерным численным методом с применением неявной разностной схемы на равномерной сетке [1].

Математическая модель для термических напряжений в соответствии с требованиями теории течения [2] имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Delta \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \Delta \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} &= 0; \\ \frac{\partial \Delta \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \Delta \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\Delta \sigma_{rz}}{r} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

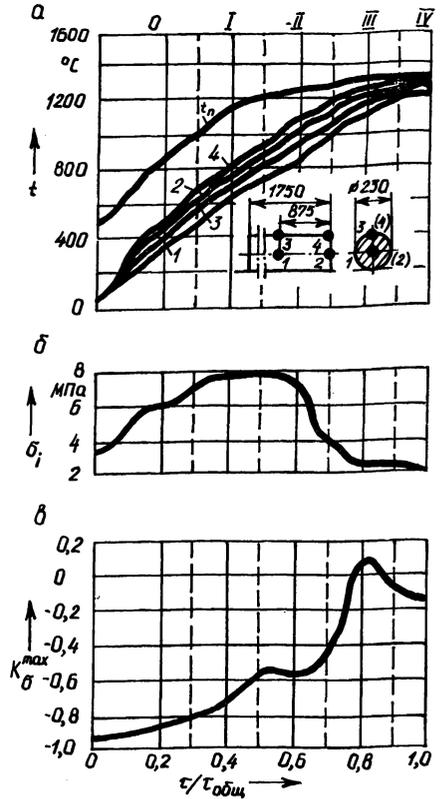
$$\left. \begin{aligned} \Delta \epsilon_r &= \frac{\partial \Delta u}{\partial r}; \quad \Delta \epsilon_\varphi = \frac{\Delta u}{r}; \quad \Delta \epsilon_z = \frac{\partial \Delta w}{\partial z}; \\ \Delta \epsilon_{rz} &= \frac{\partial \Delta u}{\partial z} + \frac{\partial \Delta w}{\partial r}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_r &= \frac{1}{E} [\Delta \sigma_r - \mu(\Delta \sigma_\varphi + \Delta \sigma_z)] - \frac{1}{E^2} \frac{dE}{dT} \Delta T [\sigma_r - \mu(\sigma_\varphi + \sigma_z)] - \\ &- \frac{1}{E} \frac{d\mu}{dT} \Delta T (\sigma_\varphi + \sigma_z) + \frac{d(\alpha T)}{dT} \Delta T; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \epsilon_{rz} &= \frac{1}{G} \Delta \sigma_{rz} - \frac{1}{G^2} \frac{dG}{dT} \Delta T \sigma_{rz}; \\ w \Big|_{z=0} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Рис. 1. Изменение температур (а), максимальных интенсивностей напряжений (б) и критериев напряженного состояния (в) при нагреве цилиндрической заготовки из стали 45:

1-4 — кривые изменения температуры в характерных точках заготовки; 0-IV — характерные зоны нагрева печи;  $t_{\text{п}}$  — изменение температуры по длине печи;  $T/T_{\text{общ}}$  — относительная длина печи



Уравнения для  $\Delta\epsilon_{\varphi}$ ,  $\Delta\epsilon_z$  могут быть получены путем циклической перестановки индексов  $r, z, \varphi$  в уравнении для  $\Delta\epsilon_r$ .

Решение задачи (5)–(8) с использованием полученных по модели (1)–(4) приращений  $\Delta T$  осуществлялось методом конечных элементов. В результате получены поля температур и напряжений.

На рис. 1 показана динамика нагрева осевой заготовки диаметром 230 мм и длиной 1750 мм (рис. 1, а) и изменение максимальных интенсивностей напряжений (рис. 1, б). Для оценки качества нагрева с позиции прочности использовался критерий напряженного состояния  $K_{\sigma}^{\max} = \max_{r,z} \frac{\sigma_i - \sigma_p}{\sigma_p}$

(рис. 1, в), где  $\sigma_i$  — интенсивность напряжения,  $\sigma_p$  — предел прочности материала. Качественный нагрев имеет место при  $K_{\sigma}^{\max} < 0$ .

Из рис. 1, в видно, что выбранный режим нагрева является неудовлетворительным, так как в III зоне (2-я сварочная)  $K_{\sigma}^{\max}$  принимает положительные значения, переходя порог прочности; в то же время максимальные значения интенсивности напряжений и перепадов температур имеют место в предыдущей зоне II (1-я сварочная зона). Отсюда следует, что максимальные пере-

пады температур и высокие напряжения не всегда являются критерием качества нагрева. В данном случае это может быть обусловлено тем, что при высоких температурах материала в IV зоне резко уменьшается предел прочности и, следовательно, даже незначительные интенсивности напряжений приводят к потере качества. Для того чтобы добиться качественного нагрева, необходимо во 2-й сварочной и томильной зонах понижать температуру печи, а максимальную интенсивность нагрева обеспечивать в предыдущих зонах. При этом в опасной зоне уменьшаются перепады температур и, следовательно, снижается интенсивность напряжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский А.А. Теория разнотных схем. — М., 1977.
2. Термопрочность деталей машин / Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. — М., 1975.

УДК 621.787.4

Т.В.КАЛИНОВСКАЯ, канд. техн. наук,  
Д.И. ДМИТРОВИЧ (ФТИ)

#### О ВЗАИМОСВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ РОЛИКОМ

В работе [1] показано, что правильное установление связи между физико-механическими и технологическими параметрами процесса поверхностного пластического деформирования (ППД) является залогом его научно обоснованной оптимизации, направленной на выбор режимов, обеспечивающих максимальный прирост долговечности упрочняемых ППД деталей. Эти связи, отражающие проявление принципов самоорганизации одновременно действующих законов упругого и пластического деформирования, получили вполне конкретную форму выражения. Так, ширина контактной площадки вдавливания в общем случае

$$b = A \rho \bar{\nu} \bar{\sigma}_n k n_1 n_2, \quad (1)$$

где  $\rho$  — приведенный радиус кривизны;  $\bar{\nu}$  — упругая постоянная пары индентор—деталь;  $\bar{\sigma}_n$  — безразмерное нормальное напряжение на контакте;  $k$  — предел текучести на сдвиг;  $n_1$  — коэффициент пластического приращения опорной площадки;  $n_2$  — коэффициент приращения площадки за счет волны

$$\rho = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4}, \quad (2)$$

где  $R_1, R_2, R_3, R_4$  — радиусы кривизны инструмента и детали в зоне контакта.

$$n_1 = \bar{\sigma}_n / \bar{\sigma}_{n1}, \quad (3)$$