

УДК 621.8:539.32

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЗОНЫ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В НАЧАЛЕ ГОРЯЧЕЙ КОВКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ*

Базайкин В.И., д.т.н., профессор кафедры высшей математики

Темляцнев М.В., д.т.н., профессор, проректор по научной работе и инновациям (ucheb.otdel@sibsiu.ru)

Базайкина О.Л., к.т.н., доцент кафедры высшей математики

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Поставлена и решена задача моделирования зоны пластического течения в начальной стадии горячей протяжки цилиндрической заготовки в кузнечном прессе с комбинированными бойками. Получено поле интенсивности напряжений для тензора суммарных упругих напряжений (нагрузки и термических). По напряжениям нагрузки решена задача плоской деформации для заготовки круглого сечения, к которому приложены три сосредоточенных погонных усилия. Зона пластического течения определяется значением предела текучести материала как ограничением интенсивности упругих напряжений. Показано, что растягивающие окружные термические напряжения вовлекают в зону пластического течения приповерхностный слой заготовки, что облегчает процесс ковки. Рассмотрен численный пример формирования напряжений нагрузки и термических напряжений при протяжке после биллетировки 7-т слитка из стали марки 40ХН с радиусом среднего сечения $R = 0,35$ м; его нижняя (880 °С) граница допустимых ковочных температур достигается через 20 мин после выноса из печи с температурой 1180 °С. Представлены графики распределения компонент тензоров напряжений нагрузки и термических напряжений, а также соответствующих интенсивностей напряжений по сечению заготовки.

Ключевые слова: ковка, комбинированные бойки, сталь, цилиндрическая стальная заготовка, напряжения нагрузки, температурные напряжения, начало пластического течения, графики напряжений, область течения в сечении заготовки.

Напряжениям и деформациям, возникающим в теле стальной цилиндрической заготовки при ее протяжке в комбинированных бойках, посвящен ряд работ [1 – 3]. Усилия и последовательность обжатий заготовки во многом зависят от размера зоны пластического течения в сечении заготовки. В настоящей работе строится модель формирования этой зоны, использующая предельные значения интенсивности тензора упругих напряжений, обусловленных как действием сосредоточенных усилий на бойках, так и термических напряжений, возникающих при остывании массивной заготовки.

Модель напряжений нагрузки в схеме плоской деформации была построена ранее [4], геометрия нагрузки и параметров сечения заготовки представлена на рис. 1. Расчет [4] напряженного состояния является развитием решения задач Мичела для упругого клина и Фламана для полубесконечной пластины, обзор которых представлен в работе [5]. Как оказалось, тензор напряжений нагрузки в любой точке поверхности цилиндра радиусом R , обусловленный усилиями P , $P/(2\cos\gamma)$ на единицу длины цилиндра, приложенными в точках A , B и C сечения цилиндра, является постоянным и шаровым (γ – угловая координата точек B и C контакта сечения цилиндра с вырезным бойком). Эта особен-

ность тензора нагрузки в точках поверхности цилиндра позволила выдержать граничные условия (равенство нулю напряжений нагрузки на поверхности заготовки) в задаче по определению напряжений в любой точке Q сечения заготовки путем наложения на поле напряжений в сечении заготовки постоянного тензора:

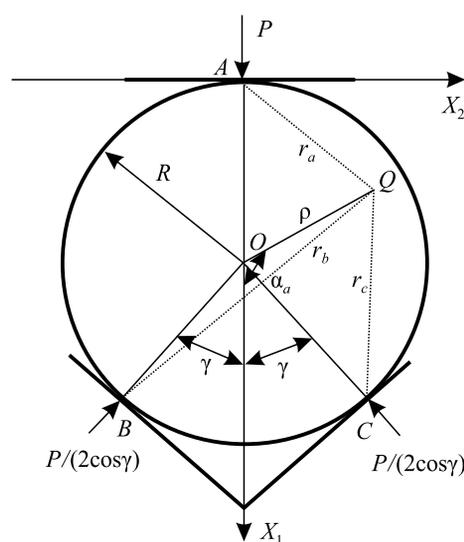


Рис. 1. Схема нагружения сечения цилиндрической заготовки при протяжке в кузнечном прессе

Fig. 1. The loading scheme of cross-section of a cylindrical workpiece at drawing in a forge press

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 14-08-00686а).

$$\Sigma_r = \frac{P}{\pi R} \frac{\cos^2 \frac{\gamma}{2}}{\cos \gamma} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Введем в сечении заготовки полярную систему координат: α – полярный угол, $0 \leq \alpha < 2\pi$; ρ – полярный радиус; $\xi = \rho/R$, $0 \leq \xi \leq 1$ – безразмерный полярный радиус точки Q . Тогда компоненты поля тензора упругих напряжений в поперечном сечении тела цилиндрической заготовки в началековки в комбинированных бойках, когда изменением формы сечения заготовки можно пренебречь, определяются по следующим уравнениям:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^H = & -\frac{P}{\pi R} \left[\frac{2(1 + \xi \cos \alpha)^3}{(1 + \xi^2 + 2\xi \cos \alpha)^2} + \frac{(1 - \xi \cos(\alpha + \gamma))^3}{\cos \gamma (1 + \xi^2 - 2\xi \cos(\alpha + \gamma))^2} + \right. \\ & \left. + \frac{(1 - \xi \cos(\alpha - \gamma))^3}{\cos \gamma (1 + \xi^2 - 2\xi \cos(\alpha - \gamma))^2} - \frac{\cos^2 \frac{\gamma}{2}}{\cos \gamma} \right]; \\ \sigma_{22}^H = & -\frac{P}{\pi R} \left[\frac{2(1 + \xi \cos \alpha) \xi^2 \sin^2 \alpha}{(1 + \xi^2 + 2\xi \cos \alpha)^2} + \frac{(1 - \xi \cos(\alpha + \gamma)) \xi^2 \sin^2(\alpha + \gamma)}{\cos \gamma (1 + \xi^2 - 2\xi \cos(\alpha + \gamma))^2} + \right. \\ & \left. + \frac{(1 - \xi \cos(\alpha - \gamma)) \xi^2 \sin^2(\alpha - \gamma)}{\cos \gamma (1 + \xi^2 - 2\xi \cos(\alpha - \gamma))^2} - \frac{\cos^2 \frac{\gamma}{2}}{\cos \gamma} \right]; \\ \sigma_{12}^H = & -\frac{P}{\pi R} \left[\frac{2(1 + \xi \cos \alpha)^2 \xi \sin \alpha}{(1 + \xi^2 + 2\xi \cos \alpha)^2} - \frac{(1 - \xi \cos(\alpha + \gamma))^2 \xi \sin(\alpha + \gamma)}{\cos \gamma (1 + \xi^2 - 2\xi \cos(\alpha + \gamma))^2} - \right. \\ & \left. - \frac{(1 - \xi \cos(\alpha - \gamma))^2 \xi \sin(\alpha - \gamma)}{\cos \gamma (1 + \xi^2 - 2\xi \cos(\alpha - \gamma))^2} \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Напомним, что компоненты тензора представлены в локальном декартовом базисе окрестности любой точки сечения заготовки, такой базис соосен глобальной декартовой системе координат X, Y ; компоненты тензора выражены через безразмерные полярные координаты точки плоскости сечения заготовки с полюсом в центре сечения. В задаче плоской деформации нормальные к плоскости поперечного сечения заготовки напряжения σ_{33}^H определяются по следую-

щим формулам: $\sigma_{33}^H = \nu(\sigma_{11}^H + \sigma_{22}^H)$ – в упругих областях; $\sigma_{33}^H = 0,5(\sigma_{11}^H + \sigma_{22}^H)$ – в пластической области заготовки; здесь ν – коэффициент Пуассона материала заготовки. Предельные значения интенсивности напряжений

$$\sigma_i^H = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(\sigma_{11}^H - \sigma_{22}^H)^2 + 4(\sigma_{12}^H)^2},$$

как инварианта девиатора тензора напряжений могут быть использованы для разделения этапов упругого и пластического деформирования.

Для построения графиков напряжений с использованием математического пакета Maple компоненты уравнения (1) и интенсивность σ_i^H должны быть выражены в глобальных безразмерных декартовых координатах x/R и y/R .

При горячей протяжке термически массивной цилиндрической заготовки на напряжения от усилийковки накладываются термические напряжения, обусловленные градиентом температурного поля, существующим в остывающей заготовке. В этом случае для любого момента времени τ протяжки в допустимом интервале температур можно получить распределение температур $t(\rho, \tau)$ вдоль полярного радиуса ρ цилиндрической заготовки как решение задачи для уравнения теплопроводности в длинном цилиндре с граничными условиями III рода методом разложения решения по собственным функциям задачи (функциям Бесселя) [6]:

$$\frac{t(\rho, \tau) - t_c}{t_0 - t_c} = \theta = \sum_{i=1}^{\infty} A_i J_0 \left(\mu_i \frac{\rho}{R} \right) e^{-\mu_i^2 Fo}, \quad (2)$$

где t_c и t_0 – температуры воздушной среды в местековки и равномерного нагрева заготовки перед ее выносом из печи; θ – безразмерная температура; $J_0(s)$ и $J_1(s)$ – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков аргумента s ; μ_i – корни уравнения $Vi J_0(\mu) = \mu J_1(\mu)$; $Vi = \alpha R/\lambda$ – число Био; α – коэффициент теплообмена между материалом цилиндра радиусом R и окружающей его средой; λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности материала цилиндра; $Fo = a\tau/R^2$ – число Фурье.

Коэффициенты A_i вычисляются по формуле

$$A_i = \frac{2J_1(\mu_i)}{\mu_i [J_0^2(\mu_i) + J_1^2(\mu_i)]}.$$

Компоненты σ_r, σ_α тензора термоупругих напряжений можно получить, проведя процедуру перевода:

– осесимметричного уравнения равновесия

$$\frac{d\sigma_r}{d\rho} + \frac{\sigma_r - \sigma_\alpha}{\rho} = 0;$$

– закона Гука связи напряжений с линейными деформациями ϵ_r и ϵ_α , обусловленными градиентом температур в цилиндре:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_\rho &= \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{1-\nu}{1-2\nu} \varepsilon_\rho + \varepsilon_\alpha \right) - \frac{\beta E}{1-2\nu} (t_0 - t_c) \theta; & -\mu_i J_0(\mu_i \xi) \cos^2 \alpha \Big]; \\ \sigma_\alpha &= \frac{E}{1+\nu} \left(\frac{1-\nu}{1-2\nu} \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\rho \right) - \frac{\beta E}{1-2\nu} (t_0 - t_c) \theta; & \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_\rho + \sigma_\alpha) - \beta E (t_0 - t_c) \theta. \end{aligned} \right. \quad (3) \quad \sigma_{12}^T = \frac{\beta E}{1-\nu} (t_0 - t_c) \sum_{i=1}^{\infty} M_i \left[\mu_i J_0(\mu_i \xi) - \frac{2}{\xi} J_1(\mu_i \xi) \right] \times \\ \times \sin \alpha \cos \alpha, \quad \sigma_{33}^T = \sigma_z.$$

где $\varepsilon_\rho = \frac{du_\rho}{d\rho}$; $\varepsilon_\alpha = \frac{u_\rho}{\rho}$; u_ρ – термоупругое смещение (смещение компонента тензоров напряжений и деформаций представлено в локальном базисе цилиндрической системы координат и является главным); β – коэффициент термического линейного расширения; E – модуль упругости первого рода материала заготовки; в обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 u_\rho}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{du_\rho}{d\rho} - \frac{u_\rho}{\rho^2} = \beta \frac{1+\nu}{1-\nu} (t_0 - t_c) \frac{d\theta}{d\rho}. \quad (4)$$

Общее решение уравнения (4) содержит две произвольные постоянные, значения которых определены из граничных условий для напряжений:

- на оси цилиндра (при $\rho = 0$) значения σ_ρ и σ_α совпадают;
- на поверхности цилиндра (при $\rho = R$) радиальные напряжения σ_ρ равны нулю.

В результате получаем выражения главных напряжений уравнения (3) в цилиндрических координатах:

$$\begin{aligned} \sigma_\rho &= \frac{\beta E}{1-\nu} (t_0 - t_c) \sum_{i=1}^{\infty} M_i \left[J_1(\mu_i) - \frac{R}{\rho} J_1\left(\frac{\mu_i}{R} \rho\right) \right]; \\ \sigma_\alpha &= \frac{\beta E}{1-\nu} (t_0 - t_c) \sum_{i=1}^{\infty} M_i \left[J_1(\mu_i) + \frac{R}{\rho} J_1\left(\frac{\mu_i}{R} \rho\right) - \mu_i J_0\left(\frac{\mu_i}{R} \rho\right) \right]; \\ \sigma_z &= \frac{\beta E}{1-\nu} (t_0 - t_c) \sum_{i=1}^{\infty} M_i \left[2\nu J_1(\mu_i) - \mu_i J_0\left(\frac{\mu_i}{R} \rho\right) \right]; \\ M_i &= \frac{A_i}{\mu_i} e^{-\mu_i^2 F_0} = \frac{2J_1(\mu_i)}{\mu_i^2 [J_0^2(\mu_i) + J_1^2(\mu_i)]} e^{-\mu_i^2 F_0}. \end{aligned}$$

В локальном декартовом базисе, соосном в каждой точке сечения заготовки с глобальной декартовой системой координат X, Y, Z , термические нормальные $\sigma_{11}^T, \sigma_{22}^T, \sigma_{33}^T$ и единственное касательное σ_{12}^T напряжения выражаются через компоненты тензора напряжений в базисе цилиндрических координат и принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^T &= \frac{\beta E}{1-\nu} (t_0 - t_c) \sum_{i=1}^{\infty} M_i \left[J_1(\mu_i) - \frac{1}{\xi} J_1(\mu_i \xi) \cos 2\alpha - \right. \\ &\quad \left. - \mu_i J_0(\mu_i \xi) \sin^2 \alpha \right]; \\ \sigma_{22}^T &= \frac{\beta E}{1-\nu} (t_0 - t_c) \sum_{i=1}^{\infty} M_i \left[J_1(\mu_i) + \frac{1}{\xi} J_1(\mu_i \xi) \cos 2\alpha - \right. \end{aligned}$$

Заметим, что вышеуказанные компоненты тензорного поля зависят от полярных координат сечения заготовки. В силу осевой симметрии заготовки такое представление более удобно для анализа. Однако для построения графиков с использованием математического пакета Maple компоненты выражений (5) необходимо выразить в глобальных декартовых координатах.

Исходя из принципа сложения действия напряжений нагрузки и термических напряжений, получаем поле тензора суммарных напряжений

$$\begin{aligned} \Sigma(\rho, \alpha) &= \begin{pmatrix} \sigma_{11}^H + \sigma_{11}^T & \sigma_{12}^H + \sigma_{12}^T & 0 \\ \sigma_{12}^H + \sigma_{12}^T & \sigma_{22}^H + \sigma_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33}^H + \sigma_{33}^T \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Рассмотрим интерпретацию полученных результатов. Участвующая в выражениях компонент тензора Σ величина P/R в задаче плоской деформации имеет размерность напряжения, так как P – усилие, действующее на единицу длины линии контакта вдоль заготовки. В расчетах материал заготовки принимается упругим. В настоящей работе рассматривается момент перехода материала в состояние пластического течения. Как и в работе [4], примем величину P/R за интенсивность упругих напряжений при одноосном растяжении материала заготовки. Определим предельное значение интенсивности упругих одноосных напряжений $\sigma_{пред} = P/R = E\varepsilon_{пред}$ и отождествим предельную интенсивность упругих одноосных деформаций $\varepsilon_{уп}$ с техническим пределом текучести $\varepsilon_{0,2} = 0,002$. Это же ограничение определяет переход материала в пластическое состояние в случае поля объемного тензора напряжений:

$$\sigma_i^H = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{(\sigma_{11}^H - \sigma_{22}^H)^2 + 4(\sigma_{12}^H)^2} = \sigma_{пред}.$$

Оценка значения модуля упругости E поверхностного слоя заготовки при протяжке остывающей заготовки после ее биллетировки требует конкретизации исследуемого процесса.

Выберем оптимальный для вырезного бойка угол $\gamma = 60^\circ$. Обрабатывается 7-т слиток из стали марки 40XH с радиусом среднего сечения $R = 0,35$ м, выне-

сенный из печи с начальной температурой $t_0 = 1180\text{ }^\circ\text{C}$ в воздушную среду с температурой $t_c = 30\text{ }^\circ\text{C}$, нижняя граница допустимых ковочных температур $880\text{ }^\circ\text{C}$. В интервале температур $880 - 1180\text{ }^\circ\text{C}$ материал заготовки имеет следующие свойства: $\alpha = 100\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$; $\lambda = 35\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $a = 6,88 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$; $\beta = 14 \cdot 10^{-6}\text{ 1/К}$; $\nu = 0,32$ [7, 8]. Для рассчитанного числа $Bi = 1,00$ получены первые восемь собственных чисел μ_i : 1,2558; 4,0795; 7,1558; 10,2710; 13,3984; 16,5312; 19,6667; 22,40 и, соответственно, коэффициентов A_i : 1,2071; -0,2901; 0,1289; -0,0756; 0,0509; -0,0372; 0,0287; -0,0230.

На рис. 2, а представлено распределение температуры заготовки по ее сечению через 20 мин после выноса из печи. На рис. 2, б показаны зависимости температуры оси слитка (верхняя кривая) и его поверхности (нижняя кривая) от времени при охлаждении слитка на воздухе, полученные из формулы (2). Видим, что нижняя ($880\text{ }^\circ\text{C}$) граница ковочных температур на поверхности заготовки достигается через 20 мин после выноса из печи, наибольший перепад температур между осью и поверхностью заготовки наблюдается спустя 50 мин после выноса из печи, что соответствует температуре $725\text{ }^\circ\text{C}$.

Определившись с температурами процесса охлаждения, используя справочные данные [9], оценим модуль упругости стали марки 40ХН при температуре $880\text{ }^\circ\text{C}$: $E = 90\text{ ГПа}$. Отсюда значения параметра $P/(\pi R)$ в момент перехода материала заготовки в пластическое состояние без изменения формы ее поперечного сечения следующее: $P/(\pi R) = (1/\pi)E_{\text{уп}} = (1/\pi) \cdot 90 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 57,32\text{ МПа}$ и предела текучести материала $\sigma_{\text{пред}} = 180\text{ МПа}$.

На рис. 3, а – в показаны распределения компонент тензора напряжений нагрузки из уравнения (1) по сечению упругой заготовки. Надо отметить большие

градиенты сжимающих напряжений в местах контакта заготовки с бойками. Рис. 4, а – в демонстрирует симметрию температурных напряжений из выражения (5) в сечении заготовки. Следует обратить внимание на большие значения растягивающих нормальных напряжений $\sigma_{11}^T, \sigma_{22}^T$ в приповерхностных слоях заготовки. Однако принимать во внимание надо интенсивности напряжений нагрузки σ_i^T , термических напряжений σ_i^H и полных напряжений $\sigma_i = \sigma_i^H + \sigma_i^T$, поскольку их предельные значения выделяют зоны сечения, находящиеся в пластическом состоянии в момент начала изменения формы сечения. Рис. 5, а, б показывает превышения графиков интенсивностей напряжений над уровнем предела текучести (окрашенные области), выделяются зоны, в которых может начаться пластическое течение. Конечно, для упруго-идеальнопластического материала заготовки интенсивность пластических напряжений в пластических зонах должна быть постоянной.

Температурные напряжения в приповерхностных слоях массивной заготовки выводят их интенсивность за пределы текучести, что заметно облегчает процесс протяжки. Если представить компоненты тензора термических напряжений в цилиндрических координатах, то можно констатировать, что большие растягивающие окружные термические напряжения σ_α в приповерхностных слоях заготовки выводят интенсивность напряжений за предел текучести материала.

Выводы. Поставлена и решена задача моделирования зоны пластического течения в начальной стадии протяжки цилиндрической заготовки в кузнечном прессе с комбинированными бойками. Получено поле интенсивности напряжений для тензора суммарных упругих напряжений (нагрузки и термических). Зона пластического течения определяется ограничением интенсивности упругих напряжений значением преде-

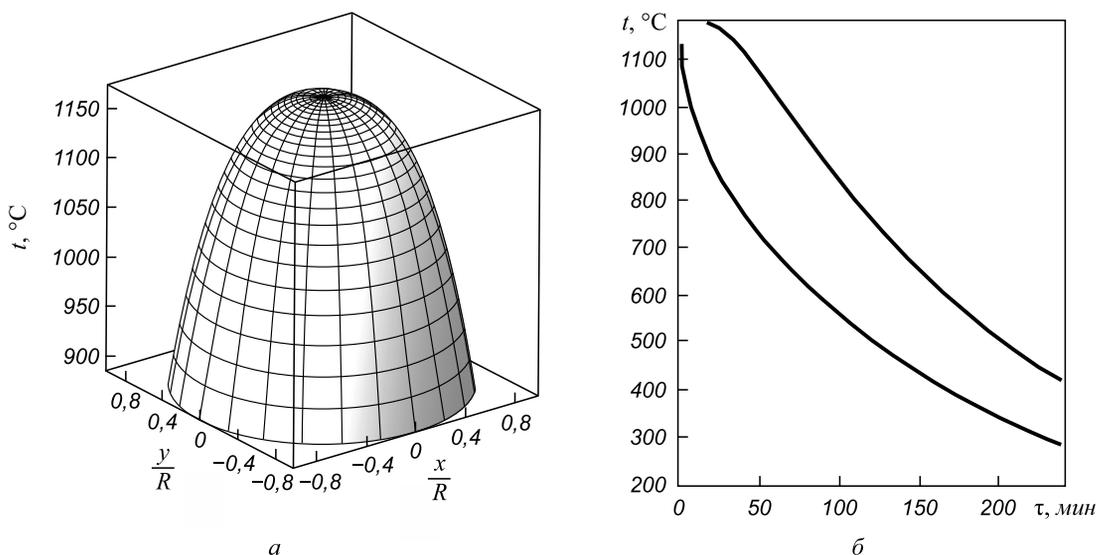
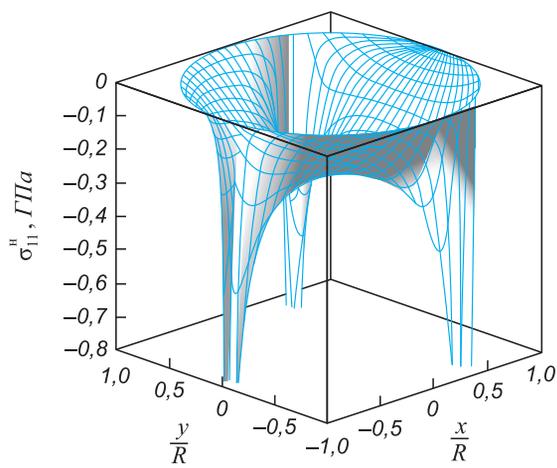
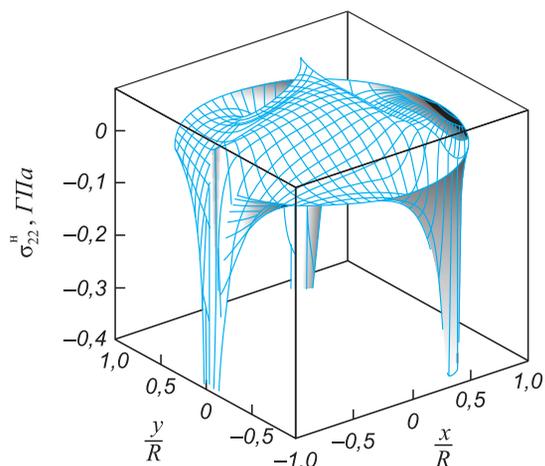


Рис. 2. Распределения температур в заготовке в процессе ее обработки

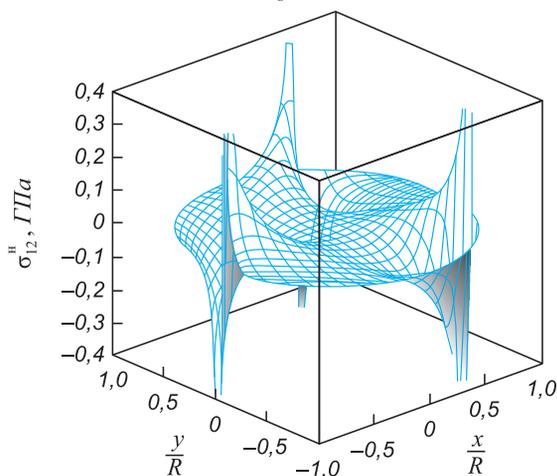
Fig. 2. Temperature distributions in a workpiece during its treatment



a



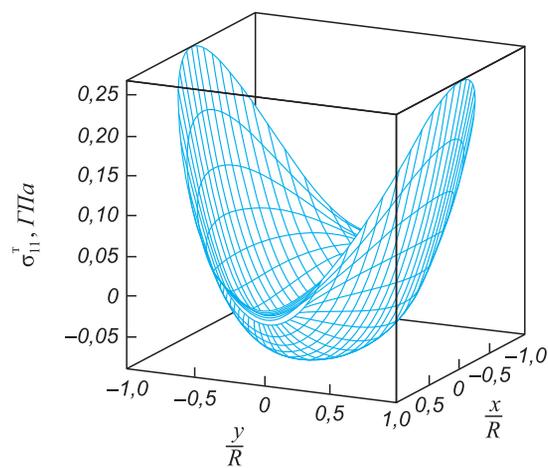
б



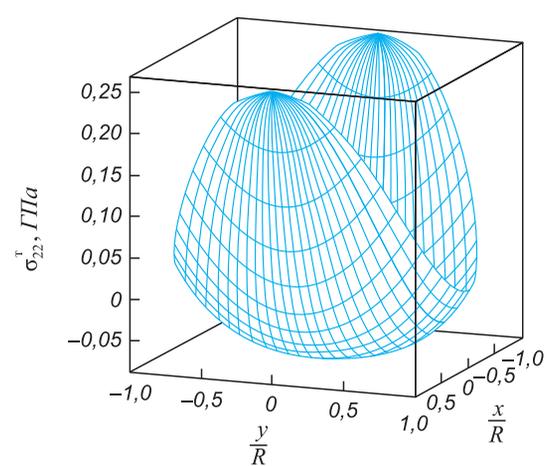
в

Рис. 3. Распределения компонент тензора упругих напряжений нагрузки σ_{11}^H (a), σ_{22}^H (б), σ_{12}^H (в) по сечению заготовки при температуре ее поверхности 880 °С

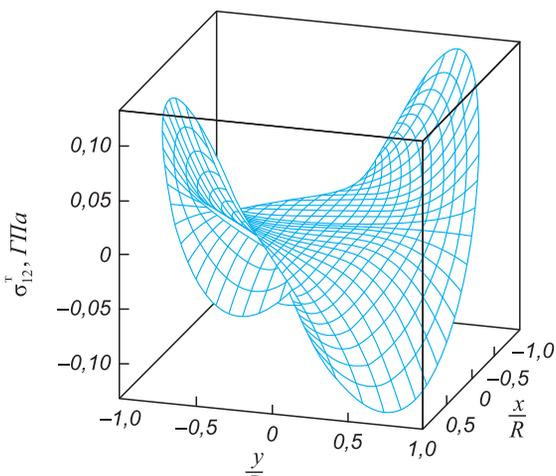
Fig. 3. Distributions of tensor components of elastic load stresses σ_{11}^H (a), σ_{22}^H (б), σ_{12}^H (в) along the cross-section of a workpiece at its surface temperature of 880 °С



a



б



в

Рис. 4. Распределение компонент тензора термических упругих напряжений σ_{11}^T (a), σ_{22}^T (б), σ_{12}^T (в) по сечению заготовки через 20 мин после выноса ее из печи

Fig. 4. Distribution of tensor components of thermal elastic stresses σ_{11}^T (a), σ_{22}^T (б), σ_{12}^T (в) along the cross-section of a workpiece in 20 minutes after its removal from the furnace

ла текучести материала. Показано, что растягивающие окружающие термические напряжения вовлекают в зону пластического течения приповерхностный слой заго-

товки, что уменьшает усилияковки по сравнению с их значениями, рассчитанными без учета термических напряжений.

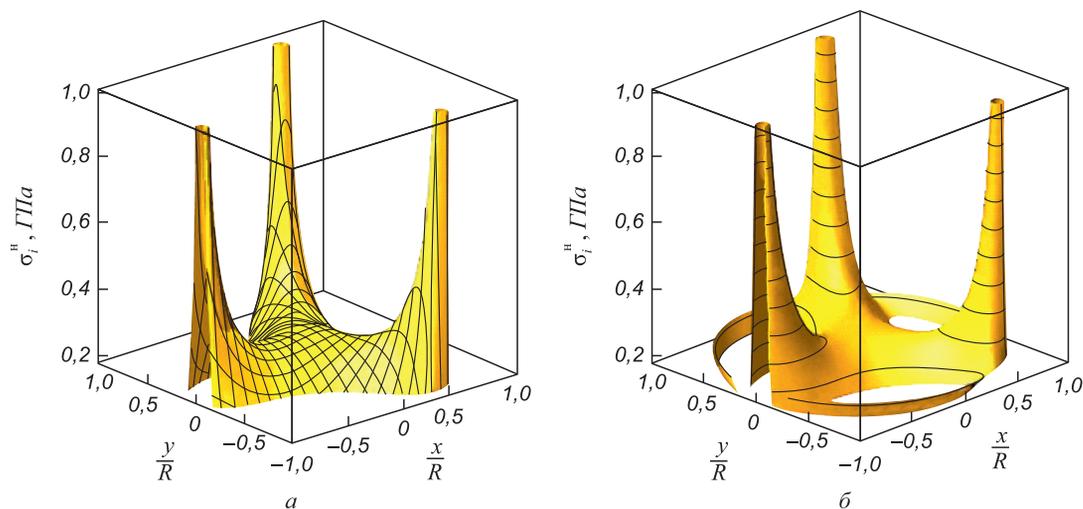


Рис. 5. Графики интенсивностей напряжений, значения которых превышают горячий предел текучести материала заготовки (окрашенные поверхности):

a – интенсивность σ_i^H напряжений нагрузки; *б* – интенсивность σ_i полных (суммарных) напряжений

Fig. 5. Graphs of stress intensities, which values exceed the hot yield point of a workpiece material (colored surfaces):

a – intensity σ_i^H of load stresses; *b* – intensity σ_i of complete (total) stresses

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Banaszek G., Steffanik A. Theoretical end laboratory modeling of the metallurgical defects during forming of a forging // Journal of Materials Processing Technology. 2006. № 177. pp. 238 – 242.
- Kun Chen, Yitao Yang, Guangjie Shao, Kejia Liu. Strain function analysis method for void closure in the forging process of the large-sized steel ingot // Computational Materials Science. 2012. № 51. pp. 72 – 77.
- Алиев И.С., Жбанков Я.Г., Таган Л.В. Моделирование кузнечной протяжки в комбинированных бойках несимметричной формы // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування. 2013. № 3 (69). С. 77 – 83.
- Базайкин В.И., Темлянец М.В., Бобров Б.Ю. Напряжения начала протяжки цилиндрической заготовки при горячей ковке в комбинированных бойках // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 2. С. 100 – 105.
- Демидов С.П. Теория упругости. – М.: Высшая школа, 1979. – 432 с.
- Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1970. – 707 с.
- Марочник сталей и сплавов / Под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
- Теплофизические и механические свойства сталей. Электронный ресурс: <http://sak.ru/reference/material/steel/steel1-2.html> (Дата обращения: 10.08.2014).
- Зависимость модуля упругости твердого тела от температуры. Электронный ресурс: <http://www.effects.ru/science/78/index.htm> (Дата обращения: 17.09.2014).

Поступила 16 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. No. 4, pp. 241–247.

INFLUENCE OF THERMAL STRESSES ON THE FORMATION OF THE PLASTIC FLOW ZONE IN THE BEGINNING OF HOT FORGING OF CYLINDRICAL WORKPIECE

Bazaikin V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of advanced mathematics

Temlyantsev M.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Vice President for Research and innovations (ucheb.otdel@sibsiu.ru)

Bazaikina O.L., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of advanced mathematics

Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

Abstract. The article presents the solution of the problem of plastic flow modeling in the initial stage of hot drawing of a cylindrical workpiece in a forging press with combined strikers. The intensity stress field for the tensor of total elastic stresses (load and thermal ones) has been received. The stress load has solved the problem of plane deformation for a workpiece of a circular cross section to which three lumped linear

efforts were attached. The zone of a plastic flow was determined by the value of the yield strength of the material as a limitation of the elastic stress intensity. It has been shown that the tensile thermal stresses involve a near-surface layer of the workpiece into a zone of a plastic flow; that facilitates the process of forging. The numerical example of the formation of stress loads and thermal stresses during drawing after roughing-up of 7-ton ingot of 40KhN steel with the radius of average cross-section $R = 0.35$ m; its bottom (880 °C) boundary of the admissible forging temperatures was reached in 20 minutes after removal from the furnace with a temperature of 1180 °C has been considered. The graphs of the component distribution of the tensor of stress loads and thermal stresses have been introduced, as well as the respective intensities of stresses in the cross-section of the workpiece.

Keywords: forging, combined anvil blocks, steel, cylindrical steel procurement, the tensor of elastic stresses, loadings stresses, temperature stresses, the beginning of a plastic flow, graphs of stresses, flow domain in cross-section of the billet.

REFERENCES

1. Banaszek G., Steffanik A. Theoretical and laboratory modeling of the metallurgical defects during forming of a forging. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, no. 177, pp. 238–242.
2. Kun Chen, Yitao Yang, Guangjie Shao, Kejia Liu. Strain function analysis method for void closure in the forging process of the large-sized steel ingot. *Computational Materials Science*. 2012, no. 51, pp. 72–77.
3. Aliev I.S., Zhabankov Ya.G., Tagan L.V. Modelling of forging drawing in combined strikers of an asymmetric form. *Visnik NTUU «KPI». Seriya Mashinobuduvannya*. 2013, no. 3 (69), pp. 77–83. (In Russ.).
4. Bazaikin V.I., Temlyantsev M.V., Bobrov B.Yu. Stresses of the beginning of drawing of a cylindrical workpiece at hot forging in combined strikers. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 2, pp. . (In Russ.).
5. Demidov S.P. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1979. 432 p. (In Russ.).
6. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoi fiziki: uchebnoe posobie* [Equations in partial derivatives of mathematical physics: tutorial]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970. 707 p. (In Russ.).
7. *Marochnik staley i splavov: monografiya* [Grade guide of steels and alloys: monograph]. Zubchenko A.S. ed. Moscow: Mashinostroyeniye, 2003. 784 p. (In Russ.).
8. *Teplofizicheskie i mekhanicheskie svoystva staley* [Thermophysical and mechanical properties of steels]. Available at: <http://sak.ru/reference/material/steel/steel1–2.html> (Accessed: 10.08.2014). (In Russ.).
9. *Zavisimost' modulya uprugosti tverdogo tela ot temperatury* [Dependence of elastic modulus of solids on temperature]. Available at: <http://www.effects.ru/science/78/index.htm> (Accessed: 17.09.2014). (In Russ.).

Acknowledgements. The work was partially supported by the grant of RFBR (project no. 14-08-00686a).

Received December 16, 2014