

Исследование напряженно-деформированного состояния в процессах осесимметричного холодного прессования

А. С. Цыбенко, Е. В. Штефан, А. И. Быков (Киев)

Процессы прессования относятся к наиболее распространенным методам современной металлообработки [1]. Для определения и оптимизации их рабочих параметров используют экспериментальные и полужэкспериментальные методы [2], применение которых, однако, ограничено ввиду высокой стоимости и трудоемкости. Вместе с тем развитие методов математического моделирования позволяет эффективно исследовать процессы прессования расчетным путем. Наиболее детальный анализ возможен на основе численных методов, в частности на основе метода конечных элементов [3].

При построении математической модели процессов прессования, как правило, рассматривают установившуюся и не установившуюся стадии. В первом случае анализ характеристик течения металла проводят с помощью уравнений состояния для вязкопластических сред [4]. Для описания не установившейся стадии процессов используют дифференциальные модели теории пластического течения [5].

Настоящая работа посвящена исследованию не установившихся режимов процессов упруго-пластического деформирования металлов при осесимметричном редуцировании и гидропрессовании. В результате сопоставления данных численных и натуральных экспериментов произведена оценка точности и эффективности разработанного математического обеспечения.

Для построения математической модели процессов прессования применен стандартный конечно-элементный подход [6]. Уравнения равновесия для дискретной модели тела, состоящей из объединения конечного числа элементов с конечным числом узловых точек, представлены в инкрементальной форме [6]

$$[K_{ep}] \{\Delta q\} = \{\Delta R\}, \quad (1)$$

где $\{\Delta q\}$ — вектор приращений узловых перемещений; $\{\Delta R\}$ — вектор приращений эквивалентных узловых сил, отвечающих приращению объемных и поверхностных нагрузок; $[K_{ep}]$ — упруго-пластическая матрица жесткости системы элементов,

$$[K_{ep}] = \sum_1^{N_e} \int_V [B]^T [D] [B] dV; \quad (2)$$

N_e — число элементов; V — объем элемента; $[B]$ — матрица, связывающая деформации и уз-

ловые перемещения в элементе согласно соотношениям Коши [6]; $[D]$ — матрица, устанавливающая связь приращений компонент напряжений и деформаций в элементе:

$$\{\Delta \sigma\} = [D] \{\Delta \epsilon\}. \quad (3)$$

Для изотропно упрочняющегося материала Прандтля — Рейса [7] компоненты матрицы $[D]$ выражения (3), представленные в тензорной форме, имеют вид

$$D_{ijkl} = \begin{cases} 2G \left(\delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} - \frac{\sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{S} \right) \\ \text{при } \bar{\sigma} = \sigma_T, \quad d\bar{\sigma} \geq 0; \\ 2G \left(\delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} \right) \\ \text{при } \bar{\sigma} = \sigma_T, \quad d\bar{\sigma} \leq 0 \text{ или } \bar{\sigma} < \sigma_T, \end{cases} \quad (4)$$

где G , ν — модуль сдвига и коэффициент Пуассона соответственно; σ_T — предел текучести материала; $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$ — тензор-девиатор напряжений; $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}}$ — эквивалентное (по Мизесу) напряжение; $S = \frac{2}{3} \bar{\sigma}^2 \left(1 + \frac{H'}{3G} \right)$; H' — модуль упрочнения на диаграмме деформирования $\sigma_T = H(\epsilon^p)$; $\epsilon^p = \int d\epsilon^p$; $d\epsilon^p = \sqrt{\frac{2}{3} d\epsilon^p_{ij} d\epsilon^p_{ij}}$.

Приращения компонент пластической деформации согласно (4) равны

$$d\epsilon^p_{ij} = \frac{\sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{S} d\epsilon_{kl}.$$

Для расчета процесса упруго-пластического деформирования заготовки в процессе прессования цилиндрического стального образца через коническую матрицу применяли шаговый метод переменных жесткостей, аналогичный предложенному в работах [8, 9].

В силу осевой симметрии процесса в расчетной схеме рассматривали только половину меридионального сечения заготовки (рис. 1). На оси вращения задавали кинематические граничные условия шарнирного опирания. На поверхности контакта заготовки с матрицей вводили кинематическое ограничение в направлении нормали к поверхности DK :

$$v - u \operatorname{tg} \alpha = 0,$$

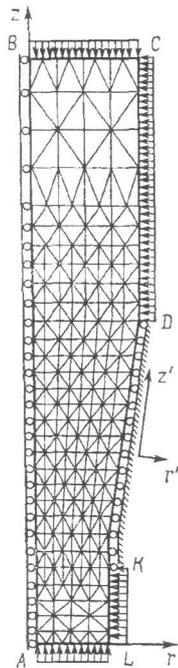


Рис. 1. Расчетная схема процессов прессования (дискретная модель содержит 250 узлов и 425 элементов).

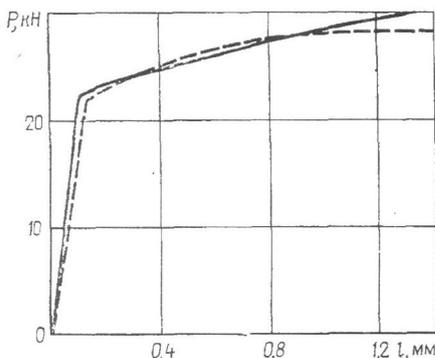


Рис. 2. Расчетная (сплошная линия) и экспериментальная (штриховая линия) кривые изменения усилия на верхнем торце заготовки в зависимости от его перемещения в процессе редуцирования.

где v и u — осевое и радиальное перемещения узлов; α — угол прессования.

Одновременно на поверхности DK учитывали сосредоточенные узловые нагрузки, обусловленные наличием сил Кулонова трения:

$$P_{\tau} = -\text{sign} u_{\tau} \mu P_n,$$

где u_{τ} — перемещение узлов сетки в направлении оси z' (рис. 1); μ — коэффициент трения; P_n — нормальное усилие на поверхности контакта, равное проекции на направление оси r' вектора узловых сил, отвечающих напряжениям в элементах.

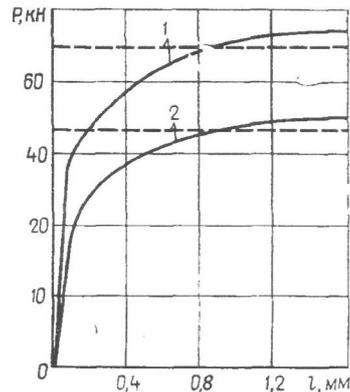


Рис. 3. Сравнение расчетных (сплошные линии) зависимостей перемещение — усилие верхнего торца заготовки с экспериментальными (штриховые линии) величинами усилий установившегося деформирования в процессе гидропрессования для степеней деформации 36 % (1) и 20 % (2).

Нагружение заготовки распределёнными нагрузками (рис. 1) соответствовало различным схемам прессования:

- обычное гидропрессование — нагрузка q_1 на поверхностях BC и CD ;
- гидропрессование с противодавлением — нагрузки q_1 на поверхностях BC и CD и q_2 на поверхностях AL и LK ;
- редуцирование — нагрузка q_1 на поверхности BC .

Для материала заготовки (сталь Р6М5) приняли следующие физико-механические характеристики: модуль Юнга $E = 2,02 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; предел текучести $\sigma_T = 420$ МПа; модуль упрочнения $H' = 1500$ МПа. Рассматривали несколько вариантов гидропрессования, отличающихся степенями деформации (10, 20, 36, 48 %).

Экспериментальные исследования проводили на установке для холодного гидропрессования с применением трехслойного контейнера и конической матрицы с двойным углом конуса 20° , собранной на базе гидравлического пресса [10], с максимальным усилием 2500 кН и скоростью рабочего хода 3 мм/с. Процесс редуцирования осуществляли на установке [9], оборудованной высокоточными датчиками перемещений и усилий, записывая на осциллографе зависимости перемещение — усилие верхнего торца заготовки для различных степеней деформации.

На рис. 2 сравниваются расчетная и экспериментальная зависимости перемещение — усилие верхнего (нагруженного) торца заготовки в случае редуцирования для степени деформации 20 %. Для перемещений торца, превышающих 1 мм, что соответствует переходу процесса в установившуюся стадию, наблюдается рассогласование кривых $p-l$.

В случае гидропрессования экспериментально получить кривую $p-l$ затруднительно вследствие сжимаемости рабочей жидкости на начальной стадии деформирования заготовки. На рис. 3 приведены экспериментальные усилия, соответствующие установившемуся режиму процесса, и расчетные зависимости перемещение—усилие. Результаты расчетов и данные экспериментов показывают, что независимо от величины приложенного противодействия усилие установившегося деформирования при гидропрессовании практически линейно возрастает с увеличением степени деформации (рис. 4).

Как видно из рис. 2—4, расчетные значения усилий для установившейся стадии процессов превышают экспериментальные. Это можно объяснить тем, что, во-первых, в расчетах процессов деформирования идеализированную диаграмму деформирования с постоянным модулем упрочнения и, во-вторых, при построении математической модели руководствовались упрощенными геометрическими зависимостями (соотношения Коши). Неучет геометрической нелинейности наиболее заметно сказывается на погрешности результатов расчетов вблизи поверхности заготовки у входа и выхода из матрицы, где происходит жесткий поворот элементов на величину угла прессования α . Использование в этом случае соотношений Коши занижает значения деформаций по сравнению, например, с нелинейными соотношениями Грина. В результате происходит искусственное увеличение жесткости заготовки, приводящее к завышению расчетных значений усилий деформирования.

Развитие пластической зоны при гидропрессовании начинается от нижней кромки матрицы и распространяется в радиальном направлении до оси заготовки (рис. 5). Затем пластическая зона постепенно расширяется и охватывает весь объем очага деформации. Этому состоянию отвечает переход процесса в установившуюся стадию деформирования.

Следует отметить, что при обычном гидропрессовании возникают значительные осевые растягивающие напряжения как на оси заготовки, так и на ее поверхности (рис. 6, а). Они могут достигать критических значений и вызывать разрушение материала [5]. Повышение уровня сжимающих напряжений в результате наложения противодействия позволяет снизить или совершенно устранить эффект растяжения материала и тем самым повысить качество получаемых изделий. Так, в случае гидропрессования с противодействием 7 Кбар при степени деформации 20 % во всем объеме деформируемого металла имеют место только сжимающие осевые напряжения (рис. 6, б).

Таким образом, наложение противодействия при холодном гидропрессовании инструменталь-

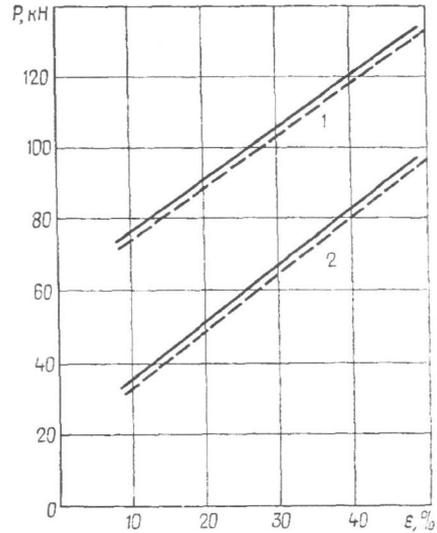


Рис. 4. Изменение расчетных (сплошные линии) и экспериментальных (штриховые линии) усилий установившегося деформирования в зависимости от степени деформации в процессах гидропрессования с противодействием 7 Кбар (1) и 3 Кбар (2).

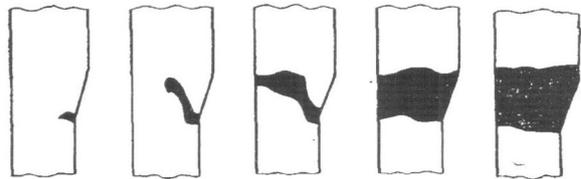


Рис. 5. Распространение пластической зоны в заготовке при гидропрессовании.

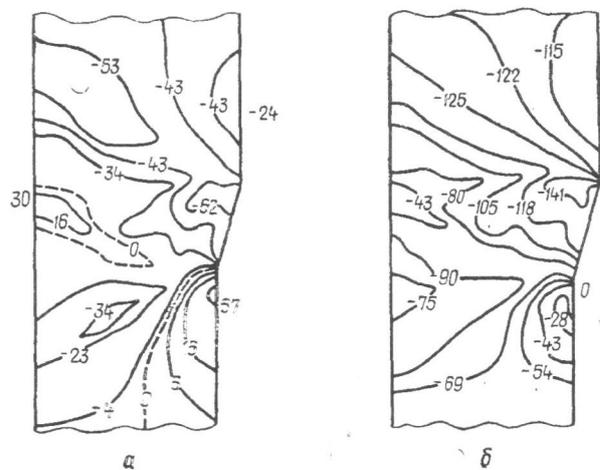


Рис. 6. Распределение осевых напряжений в заготовке на установившейся стадии процесса обычного гидропрессования (а) и гидропрессования с противодействием 7 Кбар (б).

ных сталей существенно изменяет напряженно-деформированное состояние заготовки, повышая уровень всесторонних сжимающих напряжений в очаге деформации. Это способствует «залечиванию» микропустот — зародышей трещин, тем самым повышая пластичность деформируемого металла.

Summary

Calculation and experimental study of different flow charts of axisymmetric pressing is carried out. Hypotheses of the theory of flow with isotropic hardening underlie a mathematical model of the unsteady process stage. A method of finite elements is used as a body of numerical simulation. Contact friction on working surfaces is taken into account in calculations. Calculation results and experimental data are compared. Effect of the deformation degree and backpressure on the stress-strained state of a billet is evaluated in the process of hydraulic pressing.

1. Гун Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением (теория пластичности). — М.: Металлургия, 1980.—456 с.
2. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением / П. И. Полухин, В. К. Воронцов, А. Б. Кудрин, Н. А. Чиченев. — М.: Металлургия, 1974.—336 с.

3. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унков, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др. — М.: Машиностроение, 1983.—598 с.
4. Tayal A. K., Natarajan R. Extrusion of rate-sensitive materials using a viscoplastic constitutive equation and the finite element method. — Int. J. Meth. Sci., 1981, 23, N 1, p. 89—98.
5. Iwata K., Osakada K., Fujina S. Analysis of hydrostatic extrusion by the finite element method. — Trans. ASME. Ser. B, 1972, 94, p. 697—703.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975.—541 с.
7. Larsson S. G., Harkegard G. On the finite element analysis of crack and inclusion problems in elastic-plastic materials. — Computers and Structures, 1974, N 4, p. 293—305.
8. Yamada Y., Yoshimura N., Sakurai T. Plastic stress-strain matrix and its application for the solution of elastic-plastic problems by the finite element method. — Int. J. Mech. Sci., 1968, 10, N 4, p. 343—354.
9. Расчетно-экспериментальное исследование осадки цилиндрических образцов / Ю. Ф. Черный, А. С. Цыбенко, Е. В. Штефан, А. И. Быков. — Пробл. прочности, 1983, № 8, с. 98—103.
10. Черный Ю. Ф., Спцканюк В. З., Лядская А. А. Влияние геометрии матрицы на технологическую пластичность заготовок, структуру и свойства быстрорежущих сталей при холодном гидропрессовании. — Кузнеч.-штамповоч. пр-во, 1973, № 6, с. 11—14.

Киев. политехн. ин-т

Поступила 10.05.84