

А.И. Рудской, Ю.И. Рыбин, В.Н. Цеменко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

За долгие годы своего развития теория обработки металлов давлением превратилась из чисто академической науки в прикладную, обусловившую возможность математического моделирования и проектирования технологических процессов обработки металлов давлением. Появились крупные компьютерные программы, решающие замкнутую систему уравнений теории пластичности и позволяющие проследить формоизменение и напряженно-деформированное состояние заготовки в процессах пластической обработки. Стало нормой математически моделировать формоизменение заготовки, прежде чем изготавливать технологическую оснастку.

Освоение процессов обработки давлением порошковых и пористых материалов поставило перед наукой очередную задачу – анализ уплотнения этих материалов при прессовании, экструзии, прокатке с той же целью – оптимизации технологических процессов, проектирования технологической оснастки и прогнозирования результатов обработки. При этом представлялось логичным опираться на известные теории, математический аппарат и, по возможности, на компьютерные программы, разработанные для моделирования процессов обработки давлением компактных материалов.

Основы механики процессов обработки давлением некомпактных материалов заложил В.Л. Колмогоров [1], значительный вклад в развитие теории внесли Г.Я. Гун [2], Б.А. Друянов [3]. В.Л. Колмогоров предложил условно отказаться от дискретного распределения массы по частицам в порошке или гранулах и считать ее распределенной в объеме непрерывным образом. Достоинство континуального представления некомпактного тела состоит в возможности использования математического аппарата дифференциального, интегрального и вариационного исчисления, ориентированного на анализ непрерывных функций.

При построении прикладной теории пластичности уплотняемых (пористых и порошковых) сред необходимо решить три основные задачи:

сформулировать условия пластичности уплотняемых сред;

построить уравнения, связывающие напряженное и деформированное состояния;

определить механические характеристики порошковых или пористых материалов.

В наших исследованиях для пористых материалов было использовано эллиптическое условие пластичности [4], для порошковых – параболическое [5]. Определяющие уравнения сформулированы на основе ассоциированных законов пластического течения. Механические характеристики пористого материала могут быть найдены расчетным путем [6], порошкового материала – определены экспериментально [7].

Математическая постановка задачи теории течения базируется на одном из известных дифференциальных вариационных принципов механики – начале виртуальных скоростей. Для любого кинематически возможного поля скоростей δU в произвольный момент времени справедливо следующее условие:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV = \int_S p_i \delta U_i dS,$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; $\dot{\epsilon}_{ij}$ – компоненты тензора скоростей деформации; p_i – компоненты внешних сил на поверхности площадью S .

Это уравнение, так называемое уравнение виртуальных мощностей, означает равенство мощностей внутренних сил (напряжений) в объеме тела V и внешних сил на произвольном (виртуальном) поле скоростей. В соответствии с основными положениями теории вязкопластического течения напряжения σ_{ij} можно представить как сумму девиаторной и шаровой части тензора: $\sigma_{ij} = S_{ij} + \delta_{ij} \sigma_0$.

Девиатор напряжений пропорционален девиатору скоростей деформаций:

$$S_{ij} = 2\mu \eta_{ij},$$

а гидростатическое напряжение связано с изменением объема:

$$\sigma_0 = K \dot{\epsilon}_0 \Delta t.$$

Здесь μ – коэффициент динамической вязкости;

$\eta_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \dot{\epsilon}_0$ – девиатор скоростей деформации;

ции; $\dot{\epsilon}_0 = \dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z$ – скорость объемной деформации; $\Delta\tau$ – интервал времени, за который происходит изменение напряженно-деформированного состояния.

Предполагается, что изменение объема носит упругопластический характер, следовательно, модуль объемной деформации (K) в случае уплотняемого материала не является упругой константой (k).

Мощность внутренних сил может быть представлена в виде

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV = \int_V S_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \delta_{ij} \sigma_0 \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV.$$

Поскольку $\delta_{ij} \sigma_0 \delta \dot{\epsilon}_{ij} = \sigma_0 \delta(\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z) = \sigma_0 \delta \dot{\epsilon}_0$, уравнение виртуальных мощностей может быть выражено следующим образом:

$$\int_V S_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \sigma_0 \delta \dot{\epsilon}_0 dV = \int_S p_i \delta U_i dS.$$

Левая часть равенства включает компоненты мощностей изменения формы и изменения объема. Мощность, расходуемая на изменение объема, представляет собой мощность упругих и пластических деформаций.

С ориентацией на численное решение задачи методом конечных элементов, заменив интегралы суммами интегралов по конечным элементам, получаем следующую систему уравнений, включающую условие изменения объема:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_r \left(\int_{V^r} S_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV^r + \int_{V^r} \sigma_0 \delta \dot{\epsilon}_0 dV^r \right) &= \sum_r \int_{S^r} p_i \delta U_i dS^r; \\ \sum_r \int_{V^r} \left(\dot{\epsilon}_0 - \frac{\sigma_0}{K \Delta\tau} \right) dV^r &= - \sum_r \int_{V^r} \frac{\sigma_0^*}{k \Delta\tau} dV^r, \end{aligned} \right.$$

где σ_0^* – среднее напряжение, достигнутое на предшествующем временном промежутке (на момент начала интервала $\Delta\tau$).

Эллиптическое условие пластичности пористых материалов (ПМ) имеет вид

$$\left(\frac{\sigma_0}{p_s^{\text{ПМ}}} \right)^2 + \left(\frac{T}{\tau_s^{\text{ПМ}}} \right)^2 = 1,$$

где T – интенсивность касательных напряжений.

Оно позволяет, используя ассоциированный закон пластического течения, прийти к уравне-

нию, которое связывает компоненты напряжений и скоростей деформаций в виде

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{1}{3} \dot{\epsilon}_0^p + \eta_{ij}^p = \frac{\sigma_0}{3k} \delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{2\mu}.$$

Это уравнение отличается от соответствующего соотношения для компактных материалов наличием слагаемого, учитывающего влияние гидростатического давления на скорость пластической деформации.

Решение технологических задач обработки давлением пористых материалов предполагает, таким образом, необходимость раскрытия еще одной нелинейности (помимо нелинейной связи девиаторов напряжений и скоростей деформации) – нелинейной связи шаровых компонент тензоров напряжений и скоростей деформаций.

Предложенная математическая постановка задачи требует сведений о пределах текучести пористого материала при его испытании на гидро-

статическое сжатие ($p_s^{\text{ПМ}}$) и чистый сдвиг ($\tau_s^{\text{ПМ}}$). Расчетное исследование зависимостей названных величин от пористости и предела текучести при растяжении материала матрицы выполнено на модельных кубических ячейках полидисперсной среды со сферическими пораами [6]. Кривые текучести, построенные на основании рассчитанных механических характеристик пористого материала, приведены на рис. 1.

Следует отметить, что толчком к активному развитию в СПбГПУ методов математического моделирования некомпактных материалов явилась разработка технологического процесса компактирования титановой стружки. Представлялось целесообразным осуществить горячую экструзию измельченной титановой стружки в металлической оболочке (капсуле), но проектирование оснастки натолкнулось на полное отсутствие каких-либо технологических рекомендаций.

В отличие от прессования порошковых и пористых материалов в закрытой матрице экструзия некомпактного материала, помещенного в металлическую капсулу, не предполагает свободного истечения деформируемого материала. В зависимости от толщины металлической оболочки, соотношения механических свойств оболочки и некомпактного материала и ряда других факторов возможно протекание процесса с сохранением целостности оболочки или с ее разрушением. Предсказать возможный вариант развития процесса можно лишь средствами математического моделирования.

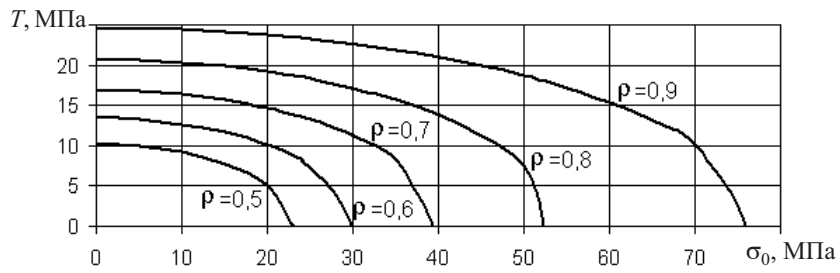


Рис. 1. Кривые предельного состояния некомпактного материала с пределом текучести материала матрицы $\sigma_s = 50$ МПа (ρ – относительная плотность)

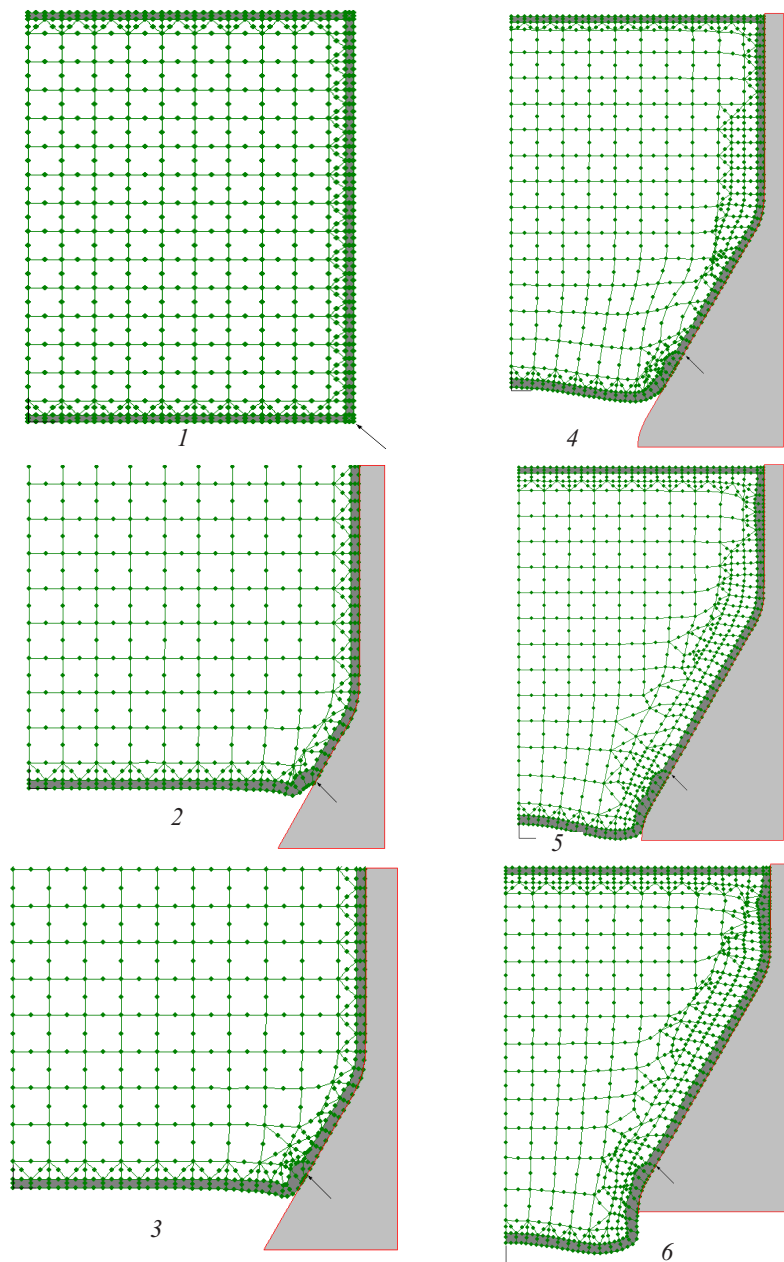


Рис. 2. Сетка конечных элементов: исходная (1) и по стадиям деформирования (2–6)

Разумеется, на нынешнем этапе не ставится задача выработки каких-либо рекомендаций к проектированию технологического процесса экструзии некомпактного материала в оболочке. Дается лишь предварительный анализ характера течения и уплотнения материала с формулировкой проблем, подлежащих дальнейшему рассмотрению и исследованию.

Первая попытка анализа процесса экструзии в капсуле базировалась на моделировании некомпактного материала несжимаемой жидкостью и, следовательно, сводилась к изучению деформирования оболочки. В этом случае типичным результатом является ее разрушение. Другим крайним случаем может быть деформирование незаполненной оболочки. Вероятным результатом такого процесса является потеря устойчивости. Таким образом, оба простейших крайних варианта имеют мало общего с реальным процессом экструзии в оболочке.

Моделирование процесса горячей экструзии рассматривается далее при следующих исходных данных:

размеры заготовки: $\text{Ø}80 \times 60$ мм; толщина стенки капсулы 1 мм;

диаметр очка матрицы – 40 мм; полуугол конуса $\alpha = 30^\circ$;

относительная плотность некомпактного материала $\rho = 0,5$;

коэффициент контактного трения $f = 0,1$;

механические характеристики материала оболочки: предел текучести $\sigma_s = 40$ МПа, модуль

Юнга $E = 50000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$;

предел текучести уплотняемого материала при относительной плотности $\rho = 1$ $\sigma_s = 50$ МПа (соответствующие кривые текучести – см. рис. 1).

При заданных условиях сплошность оболочки не нарушается. Уплотнение материала определяется уменьшением объема тела, заключенного в капсулу. На рис. 2 представлены исходная сетка конечных элементов (затемнены элементы, принадлежащие капсуле) и трансформация деформируемого объекта в ходе экструзии. Стрелками показаны точки границы дна и боковой поверхности цилиндрической капсулы. В ходе деформирования эти точки переходят на контактную поверхность, и толщина стенки в этом месте увеличивается.

На начальных стадиях экструзии пластически деформируется лишь дно капсулы и часть боковой поверхности, контактирующая с конусом матрицы (рис. 3, 1). Здесь интенсивность напряжений металла оболочки равна пределу текучести ($\sigma_i = \sigma_s = 40$ МПа). Цилиндрическая часть оболочки деформируется упруго. По мере продвижения заготовки в матрицу и нарастания усилия пресса начинает пластически деформироваться верхняя часть цилиндрической оболочки (рис. 3, 2). После того, как вся цилиндрическая часть капсулы перейдет в пластическое состояние, начнет деформироваться верхнее доньшко.

Интенсивность напряжений в объеме, занимаемом некомпактным материалом, значительно

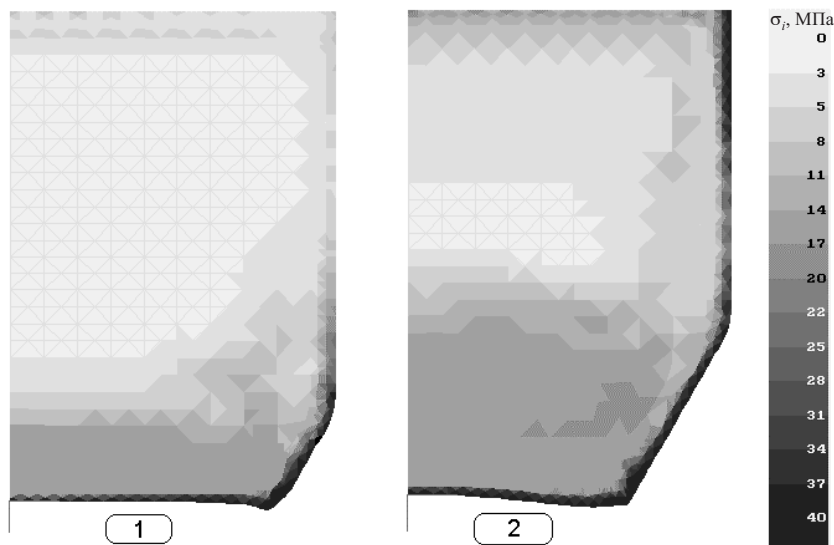


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений при деформировании: 1 – исходная стадия, 2 – стадия деформирования

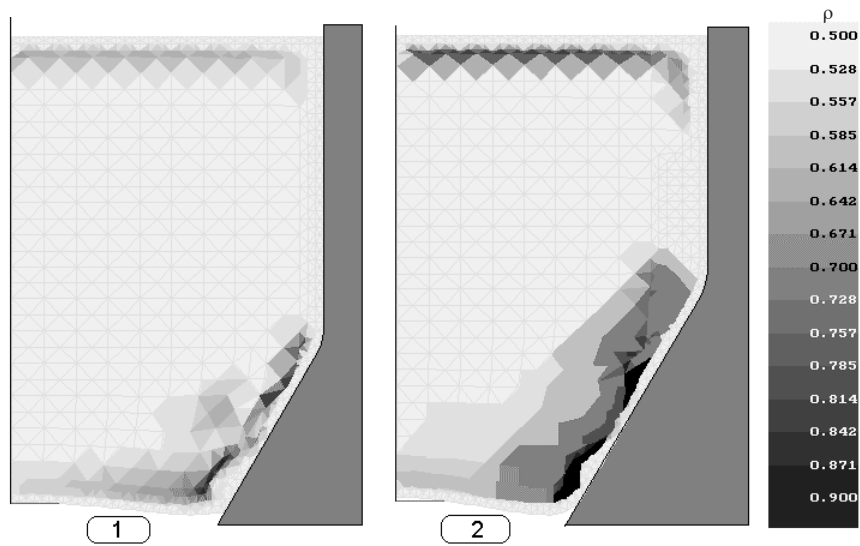


Рис. 4. Распределение относительной плотности по сечению заготовки:
1 – начало уплотнения, 2 – его продолжение

меньше, чем в материале капсулы. В соответствии с эллиптическим условием пластичности необратимые деформации уплотнения определяются совместным влиянием интенсивности напряжений (второго инварианта девиатора напряжений) и гидростатического напряжения. Уплотнение материала начинается со стороны конической поверхности матрицы (рис. 4, 1), где выше интенсивность касательных напряжений и немного выше гидростатическое давление. Далее формируется вторая область уплотнения – под пуансоном (рис. 4, 2). Она характерна для случая пресования порошковых и пористых материалов, где плотность уменьшается по мере удаления от пуансона.

В случае экструзии в капсуле повышение плотности материала под пуансоном является следствием не столько сил трения, сколько потерей жесткости стыка доньшка и боковой поверхности оболочки. Очевидно в зависимости

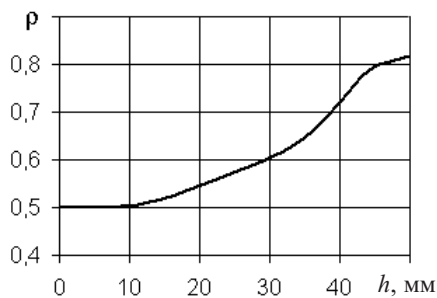


Рис. 5. Изменение средней относительной плотности в зависимости от хода пресса

от толщины стенки капсулы интенсивное уплотнение материала под пуансоном может наступать на разных стадиях процесса. Последние происходят (см. рис. 2) практически без осевого удлинения капсулы: уплотнение происходит исключительно за счет радиального обжатия. Выходной торец капсулы имеет вогнутую форму, плотность осевой части заготовки ниже, чем у поверхности. По мере уплотнения материала механические характеристики увеличиваются, и начинается продольная деформация оболочки.

Интегральная оценка уплотнения показана на рис. 5. Средняя относительная плотность ρ рассчитана как отношение объемов деформируемого тела в исходном и текущем состояниях (при заданной начальной относительной плотности $\rho = 0,5$). Объем тела вычисляется при интегрировании по площади конечных элементов. В начале процесса сжатия объем тела изменяется незначительно, происходит лишь локальное уплотнение. По мере заполнения конической части матрицы объем деформируемого тела уменьшается с интенсивным увеличением плотности. Далее процесс стабилизируется.

Представленные результаты показывают перспективы и возможности математического моделирования процессов деформирования некомпактных материалов, в частности, в металлических оболочках. Развитие методов математического моделирования позволяет получать необходимую информацию для разработки рекомендаций на стадии проектирования технологических процессов.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
2. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1980. 456 с.
3. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. М.: Машиностроение, 1989. 165 с.
4. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб.: Наука, 2004. 640 с.
5. Рудской А.И., Рыбин Ю.И., Цеменко В.Н. Условие пластичности порошковых материалов // Вестник Магнитогорского ГТУ им. Г.И. Носова. 2006. № 4. С. 93–98.
6. Александров А.Э., Рыбин Ю.И. Модель уплотнения пористого тела. Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005. С. 111–114.
7. Цеменко В.Н. Деформирование порошковых сред. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. 104 с.

Н.Г. Колбасников, Д.С. Савин

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ИЗМЕНЕНИИ РАЗМЕРОВ ЗЕРЕН ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

Интеллектуальные компьютерные технологии занимают все большее место в металлообработке и металлургии. В прокатном производстве активно внедряются программные продукты, предназначенные для расчета и прогнозирования механических свойств и структуры горячекатаных полос в зависимости от условий их обработки. Стали наиболее известными и хорошо себя зарекомендовали программы европейской фирмы Voest Alpine и американская программа Hot Strip Mill Model (HSMМ), разработанная American Iron and Steel Institute и компанией INTEG process group, inc.

Сильная сторона этих программ заключена в использовании мощных экспериментальных баз данных, отражающих для каждой из базовых марок сталей особенности следующих характеристик и процессов:

зависимостей кривых “напряжение – деформация” от температуры, степени и скорости деформации, от размера зерна аустенита;

процессов упрочнения-разупрочнения при горячей деформации;

изменения структуры при горячей деформации; дополнительных механизмов формирования структуры и свойств, в том числе выпадения дисперсных карбонитридных и интерметаллидных фаз; корреляций “структура – свойство”.

Экспериментальные исследования выполняются на дорогостоящем оборудовании, например

испытательных комплексах Gleeble, которые позволяют проводить исследования со скоростями деформации до 200 с^{-1} и нагрева-охлаждения до $10\,000 \text{ К/с}$.

Задача нашей работы – поиск закономерностей изменения размера зерна металла при кристаллизации из расплава, при изменении температуры деформации и во время фазовых превращений, что позволит значительно сократить, упростить и удешевить дорогостоящую экспериментальную часть работ по внедрению компьютерных программ управления свойствами металлов при горячей прокатке.

Известно, что на размер зерна при кристаллизации, горячей прокатке и фазовых превращениях влияет множество факторов, причем до настоящего времени все множество механизмов формирования свойств металлов охватить единым подходом не удавалось. Для решения поставленной задачей воспользуемся вероятностным подходом к формированию свойств металлов, который принес положительные результаты при оценке изменения этих свойств в результате различных видов обработки [1, 2]. Его основные идеи к описанию изменения размера зерна состоят в следующем:

дефектная структура металла, определяющая его свойства, представляет собой распределение по объему металла внутренних напряжений (упругой энергии искажений кристаллической ре-