

ния. Следовательно, в настоящее время метод позволяет практически в любой точке определять напряженное и деформированное состояние.

4. Показаны возможности и эффективность использования предлагаемого метода на примере процесса осадки. С использованием созданного программного продукта и компьютерного моделирования был выполнен анализ влияния основных технологических факторов, таких как коэффициент контактного трения – μ_A , величина относительной деформации – δ и относительная высота исходной заготовки – h_0/b_0 , на протекание и результат процесса осадки.

Литература

1. Мамаев В.Б. Расчет контура свободной поверхности в процессах осадки и центрирование заготовок в ручьях штампов // Заготовительные производства в машиностроении, № 8, 2007. С. 34 - 37.
2. Мамаев В. Б., Мамаев М. В. Анализ напряженного состояния при пластической деформации элементарного объема тела / Научно-технические технологии в машиностроении и авиастроении: Материалы IV Международной научно-технической конференции. В 2-х частях. – Рыбинск: РГАТУ им. П. А. Соловьева, 2012. – Ч. II. – 498 с., С. 127 – 132.
3. Мамаев В. Б., Мамаев М. В. Разработка основ метода траекторий главных направлений / Научно-технические технологии в машиностроении и авиастроении: Материалы IV Международной научно-технической конференции. В 2-х частях. – Рыбинск: РГАТУ им. П. А. Соловьева, 2012. – Ч. II. – 498 с., С. 132 – 137.

Моделирование эволюции очага деформации при различных схемах выдавливания

д.т.н. проф. Рябичева Л.А., к.т.н. доц. Усатюк Д.А.

*Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина
resource.saving@gmail.com*

Аннотация. В результате моделирования определены оптимальные соотношения размеров и пористость порошковых прессовок, а также величины противодействия, рекомендуемые для производства равноканальным угловым выдавливанием заготовок с высокоплотным очагом деформации, размеры которого достаточны для последующего прямого выдавливания порошковых деталей с высокими механическими свойствами. Исследованием ресурса пластичности установлена предельная глубина полости при прямом выдавливании. Разработана технология изготовления высокоплотных деталей типа «стакан» с последовательным применением равноканального углового и прямого выдавливания.

Ключевые слова: порошковая прессовка, равноканальное угловое выдавливание, заготовка, прямое выдавливание, пористость, напряжение, деформация, противодействие, плотность.

Введение

Для получения равноплотных деталей с высокими механическими свойствами из порошковых материалов эффективно использование различных схем выдавливания [1,2]. Переход радиального течения металла в вихревое при выдавливании увеличивает неравномерность напряженно-деформированного состояния, способствует формированию дефектов течения металла, ограничивая возможности изготовления изделий машиностроения сочетанием сложных схем деформирования [1]. Авторами исследовано влияние формы и размеров порошковых заготовок, противодействия, глубины полости и толщины стенки на равноплотность деталей типа «стакан», полученных прямым выдавливанием [2]. Увеличение очага деформации за счет выбора оптимальных размеров, формы, начальной пористости заготовок и противодействия способствует получению высокоплотных изделий с мелкозернистой структурой и необходимыми механическими свойствами [2,3].

Целью работы является исследование влияния соотношений размеров порошковых прессовок, начальной пористости и противодействия на величину очага деформации и распределение плотности при равноканальном угловом выдавливании (РКУВ) по результатам конечно-элементного анализа.

Моделирование выдавливания

Моделирование выдавливания выполняли на основе закономерностей теории пластичности пористых тел. При этом вариационный функционал для устойчивых течений сжимаемого пористого тела имеет вид [4]:

$$\Phi = \min \left\{ \int_V \sigma_s \Gamma dV - \int_{S_k} F_i v_i dS \right\}, \quad (1)$$

где σ_s – предел текучести при сжатии; Γ – интенсивность скоростей деформаций сжимаемого пористого тела с учетом сдвиговой и объемной деформации; F_i – результирующая внешних сил на i -ом участке поверхности контакта; v_i – действительное поле скоростей, для которого достигается минимум функционала (1).

Вязкое и пластическое течения существуют независимо друг от друга, а их совместное действие состоит в суммировании скоростей деформации, возникших в элементе пористого тела под действием одной и той же системы приложенных напряжений [4]:

$$\dot{e}_{ij} = \dot{e}_{ij}^v + \dot{e}_{ij}^p, \quad (2)$$

\dot{e}_{ij} – интенсивность скоростей деформации внутри элемента, индексы v и p относятся к вязкой и пластической составляющим соответственно.

В процессе вязкого течения происходит изменение пористости, описываемое кинетическим уравнением [4]:

$$\frac{d\theta}{dt} = (1-\theta) \frac{\sigma^0}{\zeta}, \quad (3)$$

где θ – пористость, σ^0 – гидростатическое давление, ζ – коэффициент объемной вязкости.

Пластические компоненты находили из следующих выражений [4]:

$$\sigma_{ij} = \frac{2\sigma_s \dot{e}_{ij}^p}{\psi \Gamma^p}, \quad \sigma^0 = \frac{\sigma_s \dot{e}^p}{\varphi \Gamma^p}, \quad \tau_i = \frac{\sigma_s H^p}{\psi \Gamma^p}, \quad (4)$$

где $\Gamma^p = \sqrt{\frac{H^{p2}}{\psi} + \frac{e^{p2}}{\varphi}}$ – интенсивность скоростей пластической деформации; $\psi = \psi(\theta)$,

$\varphi = \varphi(\theta)$ – функции пористости; H^p – пластическая составляющая интенсивности скоростей деформации сдвига; e^p – пластическая составляющая интенсивности деформации внутри элемента.

Связь между вязкими и пластическими составляющими скоростей деформации представлена выражениями [4]:

$$\dot{e}_{ij}^v = \dot{e}_{ij}^p \frac{\sigma_s}{\eta \psi \Gamma^p}, \quad \dot{e}^v = \dot{e}^p \frac{\sigma_s}{\zeta \varphi \Gamma^p}, \quad \Gamma^v = \Gamma^p \frac{\sigma_s}{\eta \psi \Gamma^p}, \quad (5)$$

η – коэффициент сдвиговой вязкости.

В процессе РКУВ и последующего прямого выдавливания возникают внутренние моменты, которые приводят к вращательному движению совокупностей частиц в очаге деформации с заметным искривлением линий тока. Это способствует переходу к вихревому течению металла и, как результат, ускоренному исчерпанию ресурса пластичности материала. Такое поведение материала в очаге деформации приводит к асимметрии тензора напряжений, для определения которой применили производные тензора моментных напряжений по координатам [4]:

$$\sigma_{ij} - \sigma_{ji} = a \left(\frac{d\tau_{ij}}{dx_j} - \frac{d\tau_{ji}}{dx_i} \right), \quad (6)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений; τ_{ij} – тензор моментных напряжений; a – множитель усреднения и перехода к макроскопическим параметрам пластической деформации.

Ресурс пластичности Ψ определяли по выражению [5]:

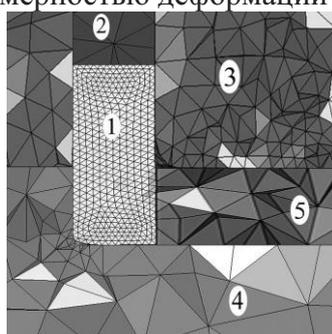
$$\Psi = \int_0^e n \frac{e_i^{n-1}}{e_p (\eta_2, \mu_\sigma)^n} de_i \leq 1, \quad (7)$$

где e_p – предельная деформация до разрушения; e_i – интенсивность деформаций;

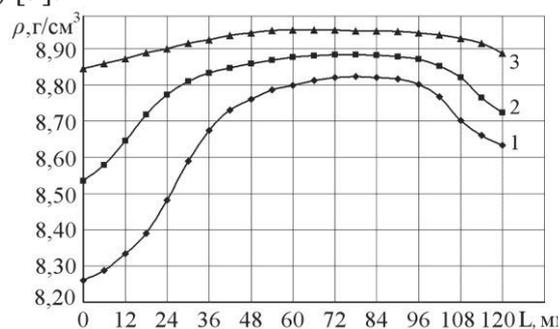
$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ – параметр Надаи-Лоде по напряжениям; $\eta_2 = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3}}{\sigma_i}$ – коэффициент

жесткости напряженного состояния; $n = 1 + b \cdot \arctg(d\eta_2 / de_i)$ – показатель жесткости напряженно-деформированного состояния.

На первом этапе исследовали РКУВ порошковых заготовок диаметром $d = 28$ мм из медных спеченных пресовок начальной пористостью θ_0 от 10% до 40%. Отношение длины заготовки L к диаметру d после РКУВ составляло 2 - 6. Моделирование РКУВ выполнено методом конечных элементов с использованием программы-решателя LS-DYNA 971. Материал заготовки упругопластический: модуль упругости $1,24 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона 0,35. Использована модель трения по Кулону, коэффициент трения 0,05. Противодействие варьировали от 100 МПа до 140 МПа. Входной и выходной каналы матрицы пересекаются под углом 90° . Внутренний радиус закругления каналов матрицы составил 1,5 мм, а внешний равен 5 мм. Модель заготовки представлена сеткой из 80768 элементов с характерным размером элемента 0,5 мм (рисунок 1, а). Рассматривали установившуюся стадию течения, когда заготовка находится в выходном канале. Длина заготовок после РКУВ составляла от 30 до 150 мм. В порошковой заготовке после РКУВ выделены центральная равноплотная область – очаг деформации, а также концевые области с пониженной плотностью и значительной неравномерностью деформаций (рисунок 1, б) [3].



а



б

Рисунок 1. Конечно-элементная модель РКУВ – а (1 – пресовка; 2 – пуансон; 3,4 – верхняя и нижняя полуматрицы; 5 – контрпуансон) и распределение плотности по длине заготовки – б (1 – $P_{пр} = 100$ МПа; 2 – $P_{пр} = 130$ МПа; 3 – $P_{пр} = 150$ МПа)

При увеличении длины пресовки относительная длина очага деформации увеличивается до $L/d = 5$ при $\theta_0 = 40\%$, и до $L/d = 4$ при $\theta_0 = 20\%$ и 10% (рисунок 2).

При уменьшении пористости и противодействии 130 МПа давление выдавливания возрастает с 340 до 470 МПа. Повышение противодействия до 150 МПа ведет к увеличению давления выдавливания до 530 МПа при незначительном увеличении плотности очага деформации (рисунок 1, б) и отрицательно влияет на стойкость матрицы [3]. Оптимальная длина заготовки, полученной РКУВ пресовок начальной пористостью 20% с противодействием

130 МПа, равна 4 диаметра. Экспериментальное исследование распределения плотности в объеме порошковых заготовок методом гидростатического взвешивания показало соответствие результатам моделирования с относительной погрешностью 5%.

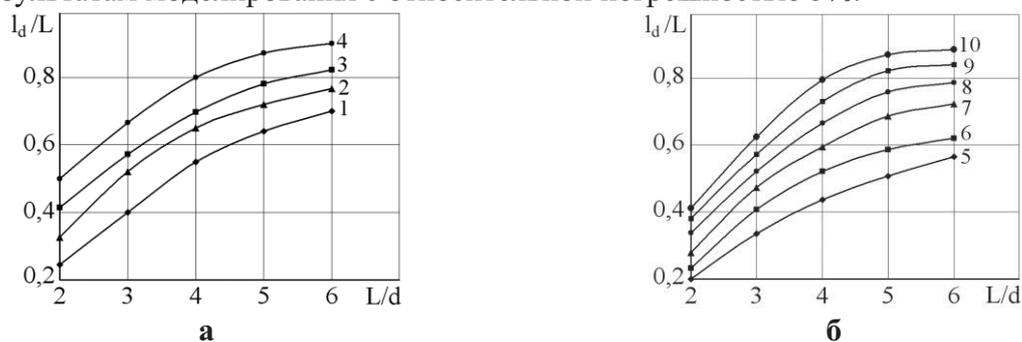


Рисунок 2. Зависимости относительной длины очага деформации: а - от начальной пористости и длины прессовки (1 – $\theta_0 = 40\%$; 2 – $\theta_0 = 30\%$; 3 – $\theta_0 = 20\%$; 4 – $\theta_0 = 10\%$); б - от величины противодействия при $\theta_0 = 20\%$ (5 – $P_{пр} = 100$ МПа; 6 – $P_{пр} = 110$ МПа; 7 – $P_{пр} = 120$ МПа; 8 – $P_{пр} = 130$ МПа; 9 – $P_{пр} = 140$ МПа; 10 – $P_{пр} = 150$ МПа)

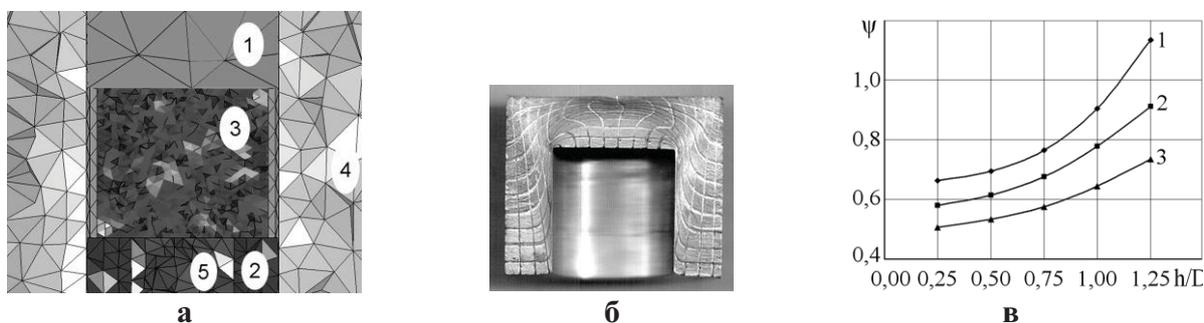


Рисунок 3. Конечно-элементная модель прямого выдавливания – а (1 – пуансон верхний; 2 – противодействие; 3 – порошковая пористая заготовка; 4 – матрица с бандажом; 5 – контрпуансон); заготовка с координатной сеткой – б; ресурс пластичности при холодном выдавливании – в (1 – угловое сечение; 2 – осевое сечение донной части; 3 – по толщине стенки)

Исследовали прямое выдавливание деталей типа «стакан» из высокоплотных заготовок $h/D = 0,25-1,25$, полученных РКУВ (рисунок 3, а). Диаметр полости в детали $D = 14$ мм, предельная глубина $h = 14$ мм, толщина стенки $b = 7$ мм, коэффициент трения 0,05. Противодействие варьировали от 130 МПа до 150 МПа. Анализировали ресурс пластичности в осевом сечении донной части, угловом сечении и по толщине стенки заготовки (рисунок 3, б). В области наиболее интенсивного пластического течения, находящейся в месте перехода от дна к стенке, начинается вихревое течение материала, что подтверждается заметным искривлением линий координатной сетки (рисунок 3, б) и ведет к исчерпанию ресурса пластичности при $h/D=1,25$ (рисунок 3, в). Вследствие этого прямое выдавливание не позволяет изготовить деталь с полостью, глубина которой превышает ее диаметр.

Выполненные исследования использованы для разработки технологии изготовления деталей типа «стакан» из порошковых прессовок.

Выводы

Проведено моделирование эволюции очага деформации в процессе РКУВ порошковых заготовок начальной пористостью от 10 до 40%, длина которых после выдавливания составила от 30 до 150 мм. Установлено, что для РКУВ рационально использовать прессовки начальной пористостью 20%, у которых отношение длины к диаметру после РКУВ равно 4. При этом размеры очага деформации достаточны для изготовления заготовок под последующее прямое выдавливание. Установлена предельная глубина полости, равная ее диаметру, при прямом выдавливании деталей типа «стакан». Разработана технология получения деталей из порошковых прессовок, основанная на последовательном применении РКУВ с противодействием 130 МПа и прямом выдавливании с противодействием 150 МПа.

Литература

1. Евстратов В.А. Анализ процессов выдавливания с использованием модели вихревого течения / В.А. Евстратов, Г.А. Кротенко, В.Н. Левченко // Кузнечно-штамповочное производство. – 2010. – №4. – С. 3 – 10.
2. Рябичева Л.А. К определению противодействия при прямом выдавливании порошковых пористых заготовок / Л.А. Рябичева, Д.А. Усатюк // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2012. №1 (13). – С. 211 – 219.
3. Евстратов В.А. Принцип расширения очага пластической деформации/ В.А. Евстратов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Краматорськ, 2006. – С. 256 – 258.
4. Штерн М.Б. Феноменологические теории прессования порошков / Штерн М.Б. [и др.] - К.: Наукова думка, 1982. – 140 с.
5. Огородников В.А. Энергия. Деформации. Разрушение / В.А. Огородников, В.Б. Киселев, И.О. Сивак. – Винница: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 204 с.

Критерий поврежденности для проектирования процессов ОМД

д.т.н. проф. Трофимов В.Н., Кузнецова Т.В.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
89124823470, tvn_perm@mail.ru

Анотация. При проектировании процессов обработки металлов давлением широкое применение получила линейная модель накопления поврежденности и скалярный критерий разрушения. Процесс пластической деформации можно описать кинетическим уравнением нелинейной динамики для систем с сильной положительной связью. Получены критерий разрушения и условие деформирования без разрушения при многоэтапном процессе пластической деформации. Проверка применимости критерия показала, что он может быть использован для решения практических задач обработки металлов давлением.

Ключевые слова: пластическая деформация, поврежденность, критерий разрушения, обработка металлов давлением

Одной из основных задач при проектировании технологических процессов ОМД является получение изделий с нормируемым уровнем поврежденности структуры микротрещинами и микропорами. Это позволяет исключить разрушение изделия при последующей обработке, а также обеспечить требуемые характеристики при его эксплуатации.

Для решения указанной задачи широко используют скалярные критерии поврежденности и разрушения [1,2].

Для получения таких критериев авторы работ [1,2] разработали феноменологические линейные и нелинейные модели накопления поврежденности Ψ с использованием кинетических уравнений, описывающих зависимость изменения величины Ψ от достигнутой степени пластической деформации сдвига Λ . Критериальное уравнение – критерий разрушения, имеет вид $\Psi \leq \Psi_{кр}$, где $\Psi_{кр}$ – предельное значение величины поврежденности, зависящее от напряженно-деформированного состояния металла в очаге пластической деформации. Для практического применения критерия Ψ авторами получены диаграммы пластичности $\Lambda_p = \Lambda_p(k, \mu_\sigma)$ для многих металлов и сплавов, где Λ_p – критическое значение степени деформации сдвига, соответствующее моменту разрушения; k – показатель напряженного состояния; μ_σ – показатель Лоде.

Экспериментальная проверка моделей [1,2] показала, что при проектировании процессов ОМД лучшие результаты дает нелинейная модель, основанная на степенной зависимости поврежденности Ψ от степени деформации сдвига Λ . Однако для практического использо-