

непосредственно процесса вытяжки.

Выводы

В данной работе рассмотрены процессы глубокой вытяжки при получении осесимметричных изделий в матрицах с многосекционными поворотными дисками и разработан алгоритм расчета распределения толщины заготовки в процессе гофрирования. Заготовка разбивается на $\rho_{\max} / \Delta\rho$ элементов, для каждого из которых рассчитываются деформации, расчет геометрических параметров заготовки ведется поэлементно от центра заготовки, а поля напряжений – от края заготовки. Поле напряжений и деформаций определяется методом итераций с предварительно задаваемой точностью.

Предложенный алгоритм позволяет вносить корректировки при появлении дополнительных условий (изменение формы и диаметра исходной заготовки, количества поворотных дисков и др.) и может быть рекомендован для расчета параметров технологического процесса.

Литература

1. Штaмп для глубокой вытяжки полых изделий с фланцем: А.с. 844102 СССР, МКИ В21D 22/20 В.И. Ларин (СССР). -№ 2824588/25-27; Заявлено 02.08.79; Оpubл. 07.07.81, Бюл. №25. - 3с.
2. Способ вытяжки полых изделий: А.с. 1286320 А1 СССР, МКИ В21D 22/20 А.Г. Кац, П.И. Харитонов (СССР). -№ 3806816/25-27; Заявлено 30.10.84; Оpubл. 30.01.87, Бюл. №4. -2с.
3. Спосiб глибокого витягування: Патент 47766 А Україна, МКІ В21D 22/23 Т.Б. Коробко, Д.Г. Майоров, Г.І. Майоров, В.О. Луценко (Україна). -№2001096196; Заявлений 10.09.2001; Оpubл. 15.07.2002, Бюл. №7. -2с.
4. Коробко Т.Б., Майоров Г.И., Митичкина Н.Г. Напряженно-деформированное состояние заготовки при гофрировании фланца для глубокой вытяжки.// Сборник научных трудов. Выпуск 14. –Алчевск: ДГМИ, 2001. –С. 317-321.
5. Коробко Т.Б., Майоров Г.И. Анализ напряженно-деформированного состояния при получении кольцеобразного гофра на заготовке под вытяжку// *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Сб. науч. тр. – 2002. №8,9. – С.499-504.
6. Коробко Т.Б., Майоров Г.И., Луценко В.А. К расчету распределения толщины в процессе гофрирования осесимметричных деталей// *Удосконалення процесiв i обладнання обробки тиском в металургiї i машинобудуванні*. Зб. наук. пр. – Краматорськ. – 2003. – С.395-399.
7. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки// *Учебное пособие для вузов*. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1977. 278 с., ил.
8. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением// *Учебник для вузов*. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1977. 423 с., ил.

Анализ напряженного и деформированного состояния в элементарном объеме на примере процесса осадки

к.т.н. доц. Мамаев В.Б.

РГАТУ им. П. А. Соловьева

8-961-025-41-31, vmamaev51@yandex.ru

Аннотация. Приведены основные положения и результаты анализа напряженного состояния в элементарном объеме, а также влияния таких технологических параметров, как коэффициент контактного трения и величина относительной деформации на результаты процесса осадки.

Ключевые слова: элементарный объем; напряженное состояние; условие пластичности; главные направления; траектории направлений; процессы осадки.

Существующие теоретические представления о напряженном и деформированном состоянии (по крайней мере, в области пластических деформаций, а точнее – упругопластиче-

ских деформаций) и математические модели по своему уровню не отвечают задачам современности, тормозят возможности и снижают эффективность использования компьютерных технологий в области обработки металлов давлением, следовательно, нуждаются в совершенствовании.

Обзоры существующих аналитических методов анализа процессов пластической деформации, выполненные как отечественными, так и зарубежными исследователями, показывают, что эти методы наряду с теми или иными достоинствами обладают рядом характерных недостатков. В основном трудности вызывают такие взаимосвязанные вопросы и задачи, как условие пластичности, выбор и назначение граничных условий, адекватный учет сил контактного трения, определение границ раздела течения металла и границ между застойными областями и областями с интенсивным пластическим течением и ряд других.

Таким образом, на основании приведенного выше, основными задачами проводимых исследований являются анализ напряженного и деформированного состояния при пластической деформации элементарного объема тела, связи линейных напряжений с линейными деформациями и математическое моделирование. Конечной целью проводимой работы является разработка основ и совершенствование метода анализа процессов пластической деформации, по возможности свободного от недостатков указанных выше, создание его математической модели и программного продукта на его базе.

Анализ напряженного и деформированного состояния тела находящегося в пластическом состоянии и (или) выделяемого в нем элементарного объема (точки или конечного элемента) показывает, что, прежде всего, следует обратить особое внимание на то, что они обладают как общими свойствами, так и различающимися их особенностями. Поэтому некоторые понятия, приемы, схемы, упрощения и допущения, используемые при рассмотрении напряженного состояния тела, могут оказаться некорректными при его анализе в элементарном объеме и наоборот.

Твердое тело может быть представлено в виде совокупности некоторых элементарных объемов, обеспечивающих сплошность тела и имеющих малые, но конечные размеры.

Эти размеры в зависимости от условий и особенностей решаемой задачи могут находиться в довольно широком диапазоне, то есть от размеров отдельных геометрических элементов составляющих тело, моно- или поликристалла, зерен, до размеров, которыми оперируют в нанотехнологиях, по крайней мере, в качестве входных граничных условий. Величина размеров если и может являться необходимым признаком, но еще не является достаточным условием, определяющим сущность и границы применимости этого понятия. Достаточное условие вытекает из того, что напряженное и деформированное состояние точки математически описывается уравнением поверхностей второго порядка, которое в данном случае представляет математическую модель поверхности действительного эллипсоида. Следовательно, например, как показано на рисунке 1, все три главные нормальные напряжения: σ_1 , σ_2 , σ_3 , которые являются полуосями эллипсоида, должны быть или положительными, или отрицательными, то есть одного знака, иначе будет иметь место любая другая поверхность, отличная от поверхности действительного эллипсоида.

Прежде чем перейти к изложению материалов исследований и полученных в данной работе результатов, следует обратить внимание на ряд положений, которые были не просто использованы в данной работе, но и получили более широкое понимание и использование, чем это принято традиционно.

Например, понятие инвариантности подразумевает независимость напряженного состояния от выбора системы координат не только в трехмерном пространстве. Так, напряженное состояние может быть описано не только с помощью главных нормальных напряжений – σ_1 , σ_2 , σ_3 , а также нормальных напряжений – σ_Z , σ_Y , σ_X и соответствующих им касательных напряжений. При некотором повороте системы координат напряженное состояние может быть описано в линейном виде, то есть в виде полного напряжения – p_0 . Также, используя кроме понятия главных направлений такое понятие, как главная плоскость, напряженное состояние может быть представлено и в двумерном виде – σ_1 , $\sigma_{\Sigma 23}$ или – σ_1 , $\sigma_{\Sigma 23}$.

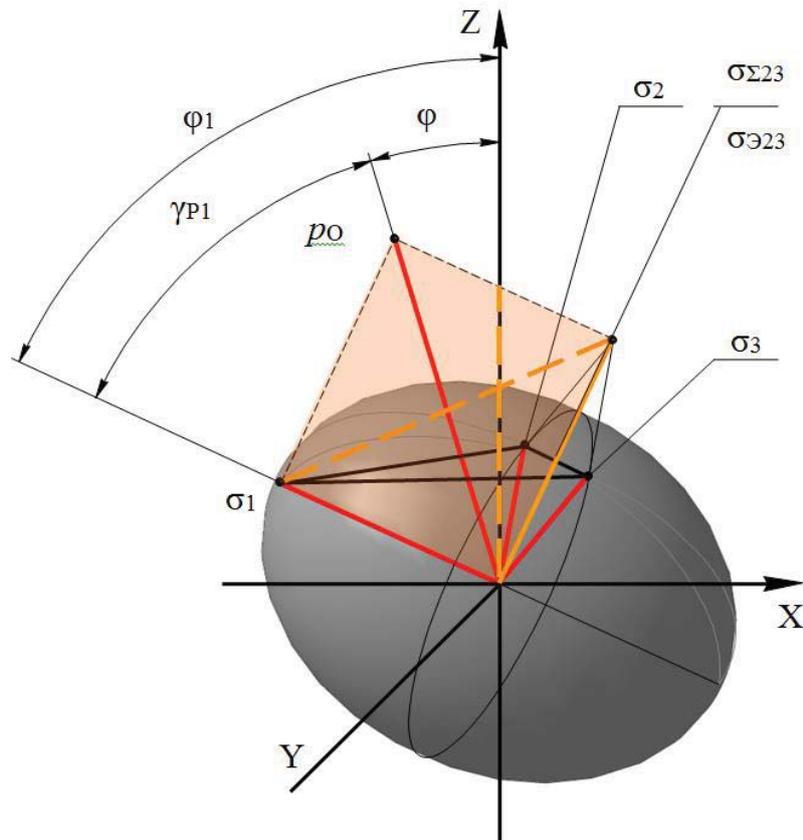


Рисунок 1. Эллипсоид напряжений и его сечение главной плоскостью: p_0 – полное напряжение; φ – угол между полным напряжением p_0 и осью Z ; φ_1 – угол между осью Z и напряжением σ_1 ; γ_{P1} – угол между полным напряжением p_0 и напряжением σ_1 ; $\sigma_{\Sigma 23}$, $\sigma_{\Theta 23}$ – геометрическая сумма главных нормальных напряжений σ_2 и σ_3 и эквивалентное им напряжение

При анализе напряженного и деформированного состояния при пластической деформации в элементарном объеме тела узловую роль играет условие пластичности. Результаты выполненных исследований позволяют согласиться с мнением Мизеса о том, что условие пластичности Треска – Сен-Венана является точным, а следовательно, его можно и нужно использовать без всяких поправок, независимо от величины среднего главного напряжения – σ_2 , то есть в виде:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_S = \sigma_{S13}. \quad (1)$$

Иначе говоря, среднее главное напряжение σ_2 при условии, что полное напряжение в точке p_0 – const, не влияет на условие пластичности.

При решении практических задач условие пластичности, как правило, принимается приближенным, что существенно снижает его адекватность. Поэтому в этом случае для них с учетом используемой системы координат и обозначений, принятых на рисунке 1, условие пластичности (1) может быть использовано в следующем параметрическом виде:

$$\begin{cases} \sigma_Z - \sigma_X = \sigma_S \cdot \cos \varphi_1; \\ \tau_{XZ} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_S \cdot \sin \varphi_1; \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{где } \varphi_1 = \gamma_{13} + \varphi; \quad \gamma_{13} = \arctg \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1} \right) = \frac{\pi}{4} - \gamma_{\sigma S 13}; \quad (3)$$

$$\phi = \operatorname{arctg}(2 \cdot \mu_A) = \arcsin \left(\frac{2 \cdot \mu_A}{\sqrt{1 + 4 \cdot \mu_A^2}} \right) = \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 4 \cdot \mu_A^2}} \right); \quad (4)$$

где $\gamma_{\sigma s 13}$ – угол соответствующий сопротивлению деформирования – σ_s ; ϕ – угол трения;
 μ_A – коэффициент трения по Г. Амонтону.

Таким образом, используя условие пластичности (2) и адаптируя его сначала к свободной, а затем и к контактной поверхности для характерных точек, была сформирована упорядоченная система, состоящая из целого ряда взаимосвязанных граничных условий.

Теоретическое обоснование и методика расчета контура свободной поверхности в процессах осадки [1] показало, что эта поверхность является геометрическим местом точек, представляющих собой траектории главных нормальных направлений. Контур свободной поверхности является траекторией главного нормального направления – 1, то есть в каждой точке этого контура главное нормальное напряжение $\sigma_1 = \sigma_s$ направлено по касательной к этому контуру под монотонно изменяющимся углом по отношению к вертикальной оси – ϕ_1 .

Таким образом, для реального практического использования условия пластичности (2) и других формул необходимо знать или уметь определять углы поворота главных направлений 1, 2 и 3 (главных напряжений и деформаций) по отношению к осям координат (в рассматриваемом случае вертикальная ось Z). То есть, другими словами, возникает необходимость знать или уметь определять углы поворота главных направлений ϕ_1 , ϕ_2 и ϕ_3 в конкретной точке тела [2]. Если объемную задачу решать поэтапно, то есть используя свойство инвариантности, свести ее к плоской или осесимметричной, то на первоначальном этапе можно определить, по крайней мере, угол поворота главного направления 1 – ϕ_1 . Далее используя такие понятия, как главная плоскость и результирующее главное эквивалентное направление – 23 (главных напряжений и деформаций), в силу ортогональности направлений определяется угол $\phi_{23} = \pi/2 - \phi_1$. После этого, на следующем этапе анализа опять же на основании инвариантности и результатов, полученных ранее, представляется возможным вернуться к объемной задаче и определить углы ϕ_2 и ϕ_3 .

В ходе математического моделирования стало очевидно, что во многих предлагаемых формулах для их практического применения должен быть известен угол между вертикальной координатной осью Z и главным направлением 1, то есть – ϕ_1 . Как показывали результаты исследований, этот угол может быть определен исходя из свойств и на основании разработанного метода траекторий главных направлений (нормальных напряжений и деформаций).

Созданный на основании предлагаемой математической модели программный продукт на примере процесса осадки позволяет в реальном режиме времени оценивать влияние основных технологических факторов на протекание и результат процесса осадки как визуально, так и численно. Сетка траекторий главных нормальных направлений позволяет выделить форму, границы и размеры как застойной области, так и областей пластической деформации, в том числе областей, где возможны разрыхления или даже расслоение, как это, например, можно увидеть на рисунке 2.

Анализ деформированного состояния в точке показывает, что связь между напряжениями и деформациями может быть выражена в виде функции траекторий главных направлений, где угол ϕ_1 служит в качестве аргумента.

С учетом приведенного выше на примере процесса осадки были сформулированы основные базовые положения, особенности, свойства и допущения метода траекторий главных нормальных направлений [3]. Разработанная математическая модель позволила создать программный продукт, позволяющий строить сетки главных нормальных напряжений (направлений) и эпюры напряжений на контактной поверхности.

На последующем этапе работы с помощью компьютерного моделирования был выполнен анализ процессов осадки, получены результаты влияния основных технологических

параметров на картину и характер изменения сетки траекторий главных направлений, а также на форму, границы и размеры как застойной области, так и области пластической деформации. Исследования показывают, что основным и решающим фактором, определяющим характер и картину сетки траекторий, является, прежде всего, коэффициент контактного трения – μ_A . Величина относительной деформации – δ оказывает меньшее, но, тем не менее, существенное влияние. Относительная высота исходной заготовки – h_0/b_0 или h_0/d_0 оказывает лишь косвенное влияние в связи с необходимостью изменения величины относительной деформации.

Например, на рисунке 2 показано детальное влияние величины коэффициента контактного трения – μ_A при его изменении в пределах от 0,1 до 0,4. Анализ эпюр напряжений на кон-

тактных поверхностях в исследуемом диапазоне показал, что среднее относительное напряжение σ_n/σ_s , а также нагрузка, требуемая для осадки, возрастают примерно в $2 \div 2,5$ раза.

В качестве заключения можно отметить, что по результатам теоретических исследований и компьютерного моделирования можно сделать общие выводы, которые сформулированы ниже.

1. На основании теоретических исследований на примере процессов осадки проведено обоснование и анализ математической модели для оценки напряженного состояния методом траекторий главных нормальных направлений (напряжений и деформаций).

2. Выполнен анализ условия пластичности и граничных условий, положенных в основу предлагаемого метода, сформулированы основные базовые положения, особенности, свойства и допущения метода, разработан программный продукт, позволяющий, что следует особо отметить – в реальном режиме времени, строить эпюры контактных напряжений, а также сетку траекторий главных нормальных направлений. Сетка траекторий главных нормальных направлений позволяет выделить форму, границы и размеры как застойной области, так и областей пластической деформации, в том числе областей, где возможны разрыхления или даже расслоение.

3. Анализ деформированного состояния в точке показывает, что связь

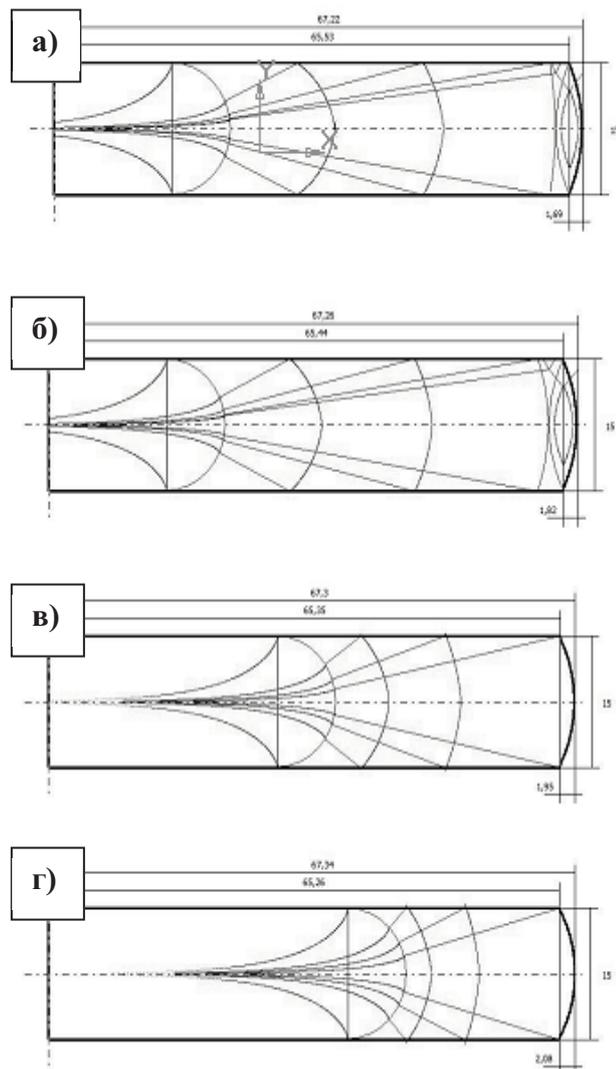


Рисунок 2. Влияние коэффициента контактного трения – μ_A на процесс осадки при $h_0 = 50$ мм; $b_0 = 40$ мм; $\delta = 0,7$;
а) $\mu_A = 0,1$; б) $\mu_A = 0,2$; в) $\mu_A = 0,3$; г) $\mu_A = 0,4$

между напряжениями и деформациями может быть выражена в виде функции траекторий главных направлений, где угол φ_1 служит в качестве аргумента. Предлагаемый метод позволяет определять углы наклона траекторий главных нормальных направлений в любой точке (элементарном объеме, конечном элементе) пластически деформируемого тела по всему его объему, за исключением застойных областей, находящихся в состоянии упругого нагруже-

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.
Восточнoукраинский 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].