

УДК 621.98.044.001.24.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ СВАРНЫХ ЗАГОТОВОК

*Драгобецкий В.В., д.т.н., проф., Бойко Ю.А., ас., Пузырь Р.Г., к.т.н., доц.
Кременчугский государственный политехнический университет
имени Михаила Остроградского
39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20
E-mail: kafea@polytech.poltava.ua*

Розглянуто питання визначення напружено деформованого стану циліндричної листової обичайки при профілюванні зі зварювальним швом. Отримано критерій руйнування.

Ключові слова: обичайка, критерій руйнування.

In the paper is shown, that questions of the determination of the stress-strain state of cylindrical sheet at grading from welded. Criteria of the destruction is received.

Key words: sheet, criteria received.

Введение. Все возрастающая сложность эмпирического пути отработки технологических процессов ставит на повестку дня вопрос о необходимости применения (ЭВМ). Последнее обстоятельство позволит сократить сроки отладки новых техпроцессов, повысить стойкость оснастки, уменьшить себестоимость деталей и увеличить их ресурс.

Однако широкое внедрение ЭВМ в практику технологических расчетов возможно только при наличии специализированных программ, позволяющих проводить поиск основных технологических параметров на основе численного моделирования.

В практике приближенных вычислений большое распространение получили вариационные и сеточные методы. Каждый из этих методов подразделяется на многочисленные схемные варианты и имеет свои особенности [1].

Анализ предыдущих исследований. Из численных методов метод конечных разностей исторически оказался наиболее подготовленным для ЭВМ. Его суть состоит в том, что для приближенного решения краевой задачи, описываемой рядом дифференциальных уравнений при заданных краевых условиях, исследуемая область разбивается на ячейки семействами координатных линий. Точки пересечения координатных линий называются узлами и подразделяются на внутренние и граничные. Искомая функция при этом заменяется совокупностью значений в узловых точках. Такое представление позволяет использовать понятия центральных конечных разностей, свести задачу к решению системы линейных алгебраических уравнений и найти численные значения искомой функции в узлах [2].

Метод конечных разностей положен в основу многих алгоритмов применительно к задачам прочности, устойчивости и колебаний и, несмотря на ряд существенных недостатков, хорошо зарекомендовал себя и позволил получить решения целого ряда важных для практики задач. С точки зрения оценки погрешностей, устойчивости и т.д. он является наиболее разработанным.

Не вдаваясь в более детальное изложение всех преимуществ и недостатков метода по сравнению с другими (их можно найти в работах [3-5]), отметим, что вследствие целого ряда положительных качеств метода конечных разностей, последний широко используется в настоящем исследовании как при расчетах формоизменения цилиндрической заготовки, так и при расчете оптимальной потребной нагрузки.

Цель исследования. Разработать теоретические подходы, описывающие процесс формоизменения сварной заготовки, позволяющие определить ее напряженно-деформированное состояние, прогнозировать появление предельного пластического состояния в околошовной зоне.

Материал и результаты исследований. При теоретическом рассмотрении деформирования заготовки в процессе радиально ротационного профилирования можно выделить три стороны вопроса:

- 1) динамическую, отражающую связь компонента тензора напряжений и вектора перемещений;
- 2) геометрическую, соответствующую связи деформации и конечных перемещений;
- 3) физическую, которая обуславливает соотношение компонент тензоров деформации и напряжений.

Эти три стороны описываются уравнениями, которые вместе с начальными и граничными условиями представляют собой замкнутую систему. Для задач импульсного деформирования заготовок, аналитическое решение системы уравнений довольно сложно, и поэтому обращаются к ее численному решению.

Рассмотрим основные допущения. Заготовка – тонколистовая оболочка. Задачу рассматриваем для осесимметричного случая, а это значит, что внешняя нагрузка и начальное положение заготовки, граничные условия деформирования осесимметричны относительно оси O_z . Сварная заготовка деформируется точно так же, как и без СШ, до момента разрушения. Критерием разрушения сварной заготовки принимаем достижения предельных деформаций в

СШ, соответствующих описанным в предыдущем разделе предельным напряжением.

При расчете деформирования заготовки со сварным швом необходимо на каждом временном шаге проводить сравнение возникающих деформаций ($e_1; e_2$) с кривой предельно допустимых деформаций.

На рис. 1 изображена схема разбиения заготовки на участки в цилиндрической системе координат.

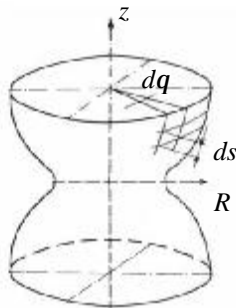


Рисунок 1 – Схема разбиения заготовки на участки в цилиндрической системе координат

Предполагаем выполненной первую часть гипотезы Киргофа-Лява. Нормаль в процессе деформирования остается нормалью к срединной поверхности заготовки. Задачу считаем геометрически линейной, материал заготовки - упругопластическим, деформационно и кинематически упрочняющимся [5].

Метод расчета основан на представлении всей оболочки в виде модели (что соответствует конечно-разностному подходу к решению дифференциальных уравнений). Заготовка разбивается на участки, масса каждого участка сводится в точку, полученные узлы соединены невесомыми растяжимыми звеньями, которые остаются прямыми между точками сосредоточения масс, внешние силы рассматриваются сосредоточенными в каждой массовой точке [5].

Давление профилирующего инструмента на заготовку аппроксимируется ступенчатой нагрузкой. В соответствии с принятой моделью, которая позволяет решать уравнения в конечно-разностной форме, весь изгиб концентрируется в точках расположения масс.

Следуя [4] запишем основные уравнения, по которым будет рассчитываться движение заготовки. Выделим элемент оболочки $R \times d\theta \times ds$, рассмотрим его равновесие. Считаем, что на элемент действуют мембранные растягивающие (сжимающие) силы $N_{\theta i}, N_{\theta j}$, поперечные силы $Q_{\theta i}, Q_{\theta j}$, моменты $M_{\theta i}, M_{\theta j}$.

На рис. 2 показаны усилия, действующие на элемент оболочки $R \times d\theta \times ds$, и проекции усилий моментов на оси координат OR и OZ.

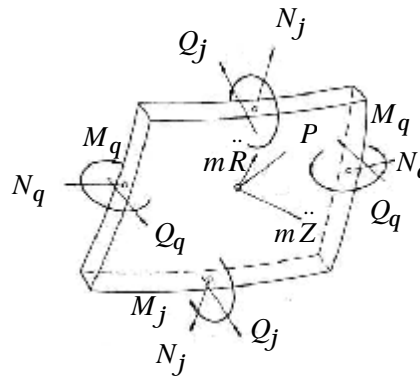


Рисунок 2 – Усилия, действующие на элемент оболочки

Уравнения движения (для узлов заготовки) примут вид:

$$\frac{d}{ds}(N_{\phi} R \cos \phi) - \frac{d}{ds}(Q_{\phi} \sin \phi) - N_{\theta} + F_r - \rho R \ddot{R} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d}{ds}(N_{\phi} R \sin \phi) + \frac{d}{ds}(Q_{\phi} \cos \phi) + F_z - \rho R \ddot{z} = 0, \quad (2)$$

где S - координата по образующей профиля заготовки; R - координата точки по оси OR; Z - координата точки по оси OZ; F_r - проекция внешней силы на ось OR; F_z - проекция внешней силы на ось OZ; N_{ϕ} - сила растяжения по образующей; N_{θ} - сила растяжения по окружности; Q_{ϕ} - поперечная сила; ϕ - угол между осью OZ и касательной к профилю заготовки; ρ - удельная масса заготовки (масса, отнесенная к площади).

Отметим, что условия равновесия сил записаны для массовых точек, стянутых в узлы модели, а уравнения моментов - для участка между массовыми точками. Уравнения (1) и (2) описывают движение многопараметрической модели заготовки.

Схема разбиения заготовки на слои по толщине оболочки представлена на рис. 3 как совокупность K слоев равной толщины, которые работают в условиях плоского напряженного состояния. Слои разделены материалом, обладающим бесконечной жесткостью на сдвиг в поперечном направлении.

Число слоев выбирается от 4 до 8. Предварительные расчеты показали, что дальнейшее увеличение количества слоев не приводит к существенному повышению точности вычислений и улучшению сходимости решения [5].

Уравнения движения (1) и (2) в конечно-разностной форме имеют вид:

$$N_{\varphi_i} R_i \cos \varphi_i - N_{\varphi_{i-1}} R_{i-1} \cos \varphi_{i-1} - Q_{\varphi_i} R_i \sin \varphi_i + Q_{\varphi_{i-1}} R_{i-1} \sin \varphi_{i-1} - N_{\varphi} \Delta S_i + P(t)_i R_i \Delta S_i - \rho_i R_i \ddot{R}_i \Delta S_i = 0, \quad (3)$$

$$N_{\varphi_i} R_i \sin \varphi_i - N_{\varphi_{i-1}} R_{i-1} \sin \varphi_{i-1} + Q_{\varphi_i} R_i \cos \varphi_i - Q_{\varphi_{i-1}} R_{i-1} \cos \varphi_{i-1} + P(t)_i Z_i \Delta S_i - \rho_i R_i \ddot{Z}_i \Delta S_i = 0, \quad (4)$$

где $P(t)_i$ - внешняя нагрузка на i -й элемент оболочки; ΔS_i - расстояние между точками, которое определяется из выражения:

$$\Delta S_i = \sqrt{(R_{i+1} - R_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2}, \quad (5)$$

$$\Delta \varphi_i = \sin \varphi_{i+1} \cos \varphi_i - \cos \varphi_{i+1} \sin \varphi_i, \quad (6)$$

$$\cos \varphi_{i+1} = \frac{(Z_{i+1} - Z_i)}{\Delta S_i}, \quad (7)$$

$$\sin \varphi_{i+1} = \frac{(R_{i+1} - R_i)}{\Delta S_i}. \quad (8)$$

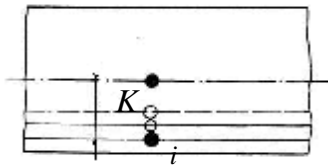


Рисунок 3 – Схема разбиения заготовки на слои

Рассмотрим уравнения связи перемещений и деформаций. Принимаем во внимание деформации, связанные с удлинением элемента под действием мембранных сил, и деформации, связанные с действием из гибких моментов.

Определив координаты точек, можно рассчитать величины деформаций в узлах по слоям:

$$\varepsilon_{\theta}^{ij} = \frac{(R_i - R_{oi})}{R_{oi}}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_z^{ij} = (\Delta S_i - \Delta S_{oi}) \Delta S_{oi} - f_k \frac{\Delta \varphi_i - \Delta \varphi_{oi}}{0,5(\Delta S_{oi+1} - \Delta S_i)}, \quad (10)$$

где $\varepsilon_{\theta}^{ij}$ - широтная деформация; ε_z^{ij} - меридиональная деформация; $\Delta \varphi_i$ - угол между звеньями i , $i+1$; 0 - индекс, указывающий, что величина определяется в недеформируемом состоянии конструкции; f_k - расстояние слоя от нейтральной оси, которое определяется по формуле:

$$f_k = \frac{\delta}{k} (i - 0,5(k+1)), \quad (11)$$

где δ - толщина оболочки; k - количество слоев; i - номер слоя.

На данном этапе расчета необходимо текущее значение широтных и меридиональных деформаций сравнить с предельными значениями деформаций сварной заготовки поперек и вдоль сварного шва.

Предельные деформации аппроксимируются зависимостью:

$$\tilde{\varepsilon}_{\theta} = a \tilde{\varepsilon}_z + b \tilde{\varepsilon}_z + c, \quad (12)$$

где $\tilde{\varepsilon}_{\theta}$ и $\tilde{\varepsilon}_z$ - предельные деформации поперек и вдоль сварного шва; a, b, c - аппроксимации кривых предельных деформаций.

Зона штампуемости определяется функцией коэффициенты квадратичной вида

$$F(\tilde{\varepsilon}) = a \left(\tilde{\varepsilon}_z \right)^2 + b \left(\tilde{\varepsilon}_z \right) + c - \tilde{\varepsilon}_{\theta}. \quad (13)$$

Для i -ой точки в j -й момент времени выражение можно представить как

$$F^{ij}(\varepsilon) = a \left(\varepsilon_z^{ij} \right)^2 + b \left(\varepsilon_z^{ij} \right) + c - \varepsilon_{\theta}^{ij}. \quad (14)$$

Значение функции $F^{ij}(\varepsilon)$ может быть >0 или ≤ 0 в зависимости от текущих значений деформаций.

Если $F^{ij}(\varepsilon) > 0$, то текущая величина деформаций меньше предельных для сварного соединения, т. е. можно производить дальнейший расчет, для чего определяем приращение деформаций всех слоев за временный шаг:

$$\Delta \varepsilon_{\theta}^{ij+1} = \varepsilon_{\theta}^{ij+1} - \varepsilon_{\theta}^{ij}, \quad (15)$$

$$\Delta \varepsilon_z^{ij+1} = \varepsilon_z^{ij+1} - \varepsilon_z^{ij}. \quad (16)$$

Определив величины деформаций в каждом узле и в каждом слое переходим к решению физической стороны задачи - вычисляем значения σ_{θ}^{ij} , σ_z^{ij} . При этом считаем материал заготовки в общем случае упруго-пластическим, деформационно и кинематически упрочняющимся. Расчеты напряжений по деформациям основаны на зависимостях математической теории пластического течения.

Методика расчета напряжений по деформациям использована в том виде, как она предложена в работах [4, 5]. Последовательность вычислений такова: определяем напряжения по известным деформациям из предположения, что материал деформируется упруго. Эти пробные напряжения (значения напряжений первого приближения) вычисляем, исходя из соотношений

$$\sigma_{\theta}^{ij+1} = \sigma_{\theta}^{ij} + \frac{E}{1+\gamma^2} (\Delta \epsilon_{\theta}^{ij+1} + \gamma \epsilon_z^{ij+1}), \quad (17)$$

$$\sigma_z^{ij+1} = \sigma_z^{ij} + \frac{E}{1+\gamma^2} (\Delta \epsilon_z^{ij+1} + \gamma \epsilon_{\theta}^{ij+1}). \quad (18)$$

Если деформации будут настолько малы, что происходит лишь упругое деформирование, то напряжения будут соответствовать действительности. В противном случае в результате расчета получаем завышенные значения напряжений.

Вводим критерий Мизеса-Генки и вычисляем величину критерия для каждого узла и каждого слоя:

$$\phi_k^{ij+1} = \left(\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_{\theta} + \sigma_{\theta}^2 - \sigma_0^2 \right)^{j+1}, \quad (19)$$

где σ_0 - предел текучести материала, который зависит в общем случае и от абсолютной величины деформаций, и от скорости ее изменения [5]. В этом случае, если $\phi_k^{ij+1} < 0$, пластическое течение отсутствует, действительные напряжения равны своим пробным значениям:

$$\sigma_{\theta I}^{ij+1} = \sigma_{\theta II}^{ij+1}, \quad (20)$$

$$\sigma_{zI}^{ij+1} = \sigma_{zII}^{ij+1}. \quad (21)$$

В случаи, если $\phi_k^{ij+1} = 0$, то пластическое течения только наступило, и время будет равно:

$$\tau = (j+1)\Delta t. \quad (22)$$

Если же $\phi_k^{ij+1} > 0$, то значит, что процесс деформирования происходит пластически и пробные напряжения не соответствуют действительности. Деформация слоя завышена. Поэтому значения напряжений необходимо уточнить.

Уточняем напряжение, т.е. вычисляем напряжения второго приближения:

$$\sigma_{\theta II}^{ij+1} = \sigma_{\theta I}^{ij+1} + \Delta \sigma_{\theta}^{\sim ij+1}, \quad (23)$$

$$\sigma_{zII}^{ij+1} = \sigma_{zI}^{ij+1} + \Delta \sigma_z^{\sim ij+1}, \quad (24)$$

предварительно определив приращения напряжений (уточняющие и приводящие напряжения к действительным значениям) по следующим формулам:

$$\Delta \sigma_{\theta}^{\sim ij+1} = -\lambda \left(\sigma_{\theta}^i + \gamma \sigma_z^i \right)_j, \quad (25)$$

$$\Delta \sigma_z^{\sim ij+1} = -\lambda \left(\sigma_z^i + \gamma \sigma_{\theta}^i \right)_j, \quad (26)$$

где λ - мера пластической деформации, которая определяется по формуле:

$$\lambda = -\frac{B}{2A} - \sqrt{\left(\frac{B}{2A} \right)^2 - \frac{C}{A}}, \quad (27)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \left[(\sigma_z' - \gamma \sigma_{\theta}')^2 - (\sigma_z' + \gamma \sigma_{\theta}') (\sigma_{\theta}' - \gamma \sigma_z') + (\sigma_{\theta}^i - \gamma \sigma_z^i) \right]^{ij}, \\ B &= -(\sigma_z' - \gamma \sigma_{\theta}')^{ij} (2\sigma_z - \sigma_{\theta})^{ij+1} - \\ &\quad - (\sigma_{\theta}' - \gamma \sigma_z')^{ij} (2\sigma_{\theta} - \sigma_z)^{ij+1}, \\ C &= (\sigma_z^2 - \sigma_z \sigma_{\theta} + \sigma_{\theta}^2 - \sigma_0^2)^{ij+1}, \quad (28) \\ \sigma_z^{ij+1} &= 2\sigma_z^{ij+1} - \sigma_z^{ij+1}, \\ \sigma_{\theta}^{ij+1} &= 2\sigma_{\theta}^{ij+1} - \sigma_{\theta}^{ij+1}. \end{aligned}$$

На рис. 4 изображена схема поиска истинных значений напряжений $\sigma_{\theta}, \sigma_z$ в случае пластического течения.

Поскольку уравнение движения записаны не для усилий (что связано с тем, что модель учитывает изгиб, но не рассматривает сжимающие по толщине напряжения), то запишем соотношения для вычисления усилий и моментов.

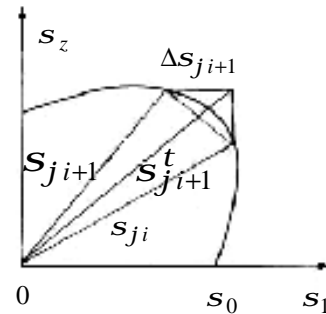


Рисунок 4 – Определение напряжений в случае пластического течения

$$N_{\phi}^{ij+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_z^{ij+1} \delta_e, \quad (29)$$

$$N_{\theta}^{ij+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_{\theta}^{ij+1} \delta_e, \quad (30)$$

$$M_{\phi}^{ij+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_z^{ij+1} \delta_e f_k, \quad (31)$$

$$M_{\theta}^{ij+1} = \sum_{l=1}^k \sigma_{\theta}^{ij+1} \delta_e f_k, \quad (32)$$

где δ_e - текущая толщина слоя пластины, которая вычисляется по формуле:

$$\delta_e = \exp(\epsilon_z) \delta_{01}, \quad (33)$$

где δ_{01} - начальная толщина слоя пластины.

Величину перерезывающей силы Q_ϕ определим из уравнения равновесия моментов:

$$\frac{d(M_\phi R)}{ds} - M_\theta \cos \phi = Q_{cp} R. \quad (34)$$

Далее цикл (1-34) повторяется до прекращения движения заготовки либо до наступления момента, когда пластические свойства материала преимущественно в ОШЗ приближается к предельным, для чего на каждом шаге сравниваем текущие значения деформации с предельными.

Если при сравнении

$$F(\epsilon)^{ij} = a(\epsilon_z^{ij})^2 + b(\epsilon_z^{ij}) + c - \epsilon_z^{ij} \leq 0, \quad (35)$$

то текущие значения деформаций в точке в последующий момент времени превышают значение предельных деформаций, поэтому необходимо применения тонких дополнительных накладок на сварной шов.

Этот технологический прием позволяет отштамповать детали при больших значениях главных деформаций, но возможности его ограничены.

Из рис.5 видно, что применение этого приема возможно лишь тогда, когда точка С, соответствующая достигнутым деформациям на цилиндрической заготовке, находится внутри области ограниченной точками ABD .

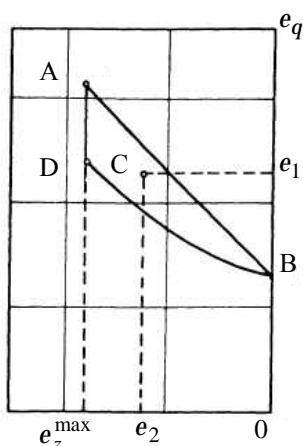


Рисунок 5 – Кривая предельных деформаций

Абсцисса точки С текущей деформации, находящейся выше кривой предельных деформаций BD не должна превышать максимальное значение ϵ_z^{\max} .

Точка С в то же самое время не должна находиться выше кривой АВ, т.к. за этой границей, технологический прием не дает положительного результата.

Выводы.

1. Представленный теоретический подход позволяет описать процесс формоизменения сварной заготовки, определить значения предельных напряжений и деформаций в околошовной зоне.

2. Сварная заготовка деформируется точно так же, как и без сварного шва, до момента разрушения. Критерием разрушения сварной заготовки принято достижение предельных деформаций в сварном шве.

3. Разработанная методика определения зоны штампуемости сварной заготовки позволяет прогнозировать появление предельных деформаций в околошовной зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Талымов Г.Б. Сварные деформации и напряжения. - Л.: Машиностроение. – 1973. – 218 с.
2. Мыхненко В.И. Расчетные методы исследования кинематики сварочных напряжений и деформаций. - К.: Наукова думка. – 1976. – 319 с.
3. Галков Ш.Г. Динамика взаимодействия элементов конструкций с волной давления и жидкости. - К.: Наукова думка. – 1977. – 178 с.
4. Галлиев Ш.Г. Динамика гидроупругопластических систем. - К.: Наукова думка. – 1981. – 276 с.
5. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці конструкцій: Нов. Посібник. - К.: НТУУ „КПІ”, 2007. – 379 с.

Стаття надійшла 25.02.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Саленко О.Ф.