

В.В. Драгобецкий, проф., д-р техн. наук, О.Д. Коноваленко, доц., канд. техн. наук, Н.Н Мороз, доц., канд. техн. наук

*Кременчугский государственный политехнический университет
имени Михаила Остроградского*

Выбор параметров деформации листовых заготовок в процессе вытяжки

Разработана математическая модель процесса вытяжки деталей сложной формы. Предложена методика расчета оптимальных деформационных параметров по критерию минимума разностенности полученной детали.

сложная форма, вытяжка детали, деформационные параметры

Введение. Совершенствование и разработка новых ресурсосберегающих технологий формоизменения направлено на сокращение затрат на подготовку производства. В значительной мере это связано с экономией материальных ресурсов и совершенствованием метода расчета процесса деформирования и поиска эффективных методов повышения качества получаемых изделий. Такие исследования актуальны и выполняются в соответствии с законом Украины про приоритетные направления науки и техники в Украине ст. 7 п.6 «Новітні технології в енергетиці, промисловості, агропромисловому комплексі». Процессам листоштамповочного производства присущее многообразие задач теории оптимального управления. Их основное предназначение состоит в том, чтобы дать возможность специалистам выбрать такие управляющие воздействия, которые бы обеспечивали получение более высокой производительности, минимальных затрат, лучших качественных показателей получаемых деталей и т.д.

В настоящее время решен ряд оптимизационных задач для процесса вытяжки осесимметричных деталей. Разработаны методики выбора оптимального профиля деформирующего инструмента, которые использовали в качестве критериев оптимизации как минимум поверхностной нагрузки [1] на участках контакта с заготовкой, так и минимум площади поверхности контакта заготовки с инструментом [2]. Решена задача определения оптимальной толщины смазочного слоя при жидкостном трении на фланце заготовки в случае, если не будет образования гофр, неполного обжатия заготовки по пуансону, обрыва дна или фланца заготовки [2]. Анализ исследований в области оптимизации параметров процесса формоизменения листовых заготовок показал, что до настоящего времени решены задачи, в которых целевая функция зависела только от одного параметра.

Однако реальные задачи оптимизации листоштамповочного производства многопараметрические, причем некоторые из параметров не являются независимыми. Следует также заметить, что найдя оптимальные значения отдельных параметров процесса (однопараметрические задачи оптимизации), экстремума конкретного критерия оптимизации, или целевой функции, мы не получаем. Кроме того, существует комплекс мероприятий, позволяющих существенно интенсифицировать процесс формоизменения и управлять им. Эти интенсифицирующие факторы при решении оптимизационных задач можно назвать ресурсами и оценить их влияние на целевую функцию. Поэтому предлагаемое исследование имеет целью решение многопараметрической задачи оптимального управления процессом формоизменения листовых заготовок.

Постановка задачи. Общая постановка задачи оптимального формообразования формулируется следующим образом. Пусть заготовка в процессе формоизменения описывается поверхностью:

$$y_3 = Z(y_1, y_2, t), \quad (1)$$

конечная конфигурация изделия (детали) определяется поверхностью матрицы:

$$y_3 = F(y_1, y_2), \quad (2)$$

конечное деформированное состояние описывается уравнением:

$$P_j = P_j^*(y_1, y_2). \quad (3)$$

Тогда функционал состояния заготовки можно представить в виде

$$I_p = \int_{(\Sigma)} (P_j(y_p, t_q) - P_j^*(y_p))^2 d\Sigma, \quad (4)$$

где t_q – время деформирования заготовки;

y_p – инерциальная система координат, в которой задается положение штампуемой заготовки.

Решение задачи сводится к минимизации функционала

$$L = I_L - I_L^{\min} \quad (5)$$

на семействе функций управления $\varphi_k, \psi_k, \omega_k, F_{jikm}$ при заданных ограничениях, где φ_k – геометрические параметры матрицы и пуансона; F_{jikm} – зазор между пуансоном и матрицей; ω_k – давление прижима фланца заготовки; F_{jikm} – дополнительное локальное силовое нагружение (дополнительные функции управления); подстрочные индексы соответствуют вариантам технологического процесса ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Методика исследования. Задача относится к классу задач нелинейного программирования в силу нелинейного характера оптимизируемой функции и, в общем случае, нелинейных ограничений. Пока не существует общего метода решения нелинейных задач оптимизации, такого как, например, симплексный алгоритм, разработанный для линейного программирования. Поэтому при решении подобного рода задач сравнивают различные частные алгоритмы, составляются программы и проводится проверка результатов применения этих алгоритмов для конкретных задач.

В данной работе предложен для решения задачи оптимизации метод наискорейшего спуска.

Метод наискорейшего спуска обладает двумя существенными недостатками:

а) может закончиться в стационарной точке, а не в точке минимума, поэтому результаты счета необходимо проверить;

б) скорость сходимости может быть слишком малой (в данной конкретной задаче время счета оказалось достаточно небольшим).

Поскольку применяется метод наискорейшего спуска, то следует отметить, что он зависит от выбора масштаба оптимизируемых переменных. И еще: если исследуемое пространство вытянуто так, что образует "хребет" или "овраг", процедура наискорейшего спуска сходится слишком медленно, чтобы быть эффективной. Чтобы этого избежать, в программах предусмотрено ряд мер:

- проводится оптимизация величины шага по выбранному направлению (поиск оптимального шага проводится по методу одномерного поиска "золотого сечения");

- применяется симплекс - модификация метода: шаг осуществляется по координате, по которой производная функционала максимальна, при этом все остальные координаты остаются неизменными;

- при довольно малом шаге по какой-либо координате последующий шаг осуществляется по другой координате.

Напряженное состояние при вытяжке сложных деталей характеризуется существенной неоднородностью как по длине срединной поверхности заготовки в продольном и поперечном сечениях, так и по ее толщине. Для оценки и прогнозирования качества детали по основным показателям (точность геометрических параметров; состояние поверхности детали; отсутствие локальных дефектов, связанных с локальной потерей устойчивости и нарушением сплошности) на стадии проектирования технологического процесса необходимо иметь достоверную информацию о состоянии заготовки в любой момент процесса формоизменения. То есть необходимы данные о текущих геометрических параметрах деформируемой заготовки, ресурсе пластичности металла в каждой точке заготовки, значение контактных напряжений в зонах соприкосновения заготовки с матрицей и пуансоном. Получить такую информацию в необходимом объеме возможно путем математического моделирования технологического процесса.

Для анализа формоизменения заготовки использована механико-математическая модель, в которой исходные уравнения краевой упруго-пластической задачи деформирования решают методом конечных разностей (МКР). Основное преимущество МКР, без детального изложения всех преимуществ и недостатков метода по сравнению с другими численными методами – сравнительная простота, наглядность и естественность решения задачи формоизменения.

Принятая система уравнений теории пластического потенциала отражает упругопластическое поведение деформируемой заготовки, анизотропию пластических свойств (в соответствии с моделью трансверсально-изотропного тела) и степень упрочнения материала заготовки. Основные допущения: предполагается выполненной первая часть гипотезы Кирхгофа-Лява; в пластической области возвращение вектора напряжений осуществляется по нормали к поверхности текучести; деформирующий инструмент и матрица считаются абсолютно жесткими телами; трение на участках контактного скольжения описывается обобщенным законом трения (граничное+жидкостное). Вычисление деформаций заготовки проводим на базе многослойной модели. Заготовка состоит из четырех слоев равной толщины, в которой сконцентрирован ее материал и которые работают в условиях плоского напряженного состояния. Эти слои расположены на равном расстоянии друг от друга и разделены материалом, который обладает абсолютной жесткостью на сдвиг в поперечном направлении. Нестационарность процесса учитывается организацией пошаговой процедуры последовательных нагружений. Условием окончания моделирования, кроме нормального завершения операции, может быть исчерпание ресурса пластичности в каких-либо точках заготовки, контролируемое автоматически, или утонение заготовки, превышающее пятую часть (20%) исходной ее толщины.

Разработанная модель процесса штамповки учитывает всю совокупность действующих факторов, необходимых для проектирования такого варианта технологии, который был бы близок по выбранному критерию к оптимальному. Для оценки варианта технологического процесса принимаем такой вариант, который максимально удовлетворяет требованиям к качеству штампуемого изделия и обеспечивает минимальный вес полученной детали (элемента конструкции). Минимальная разностенность детали есть критериальность получения конструкций минимального веса для корпусных деталей аэрокосмической техники и наземного транспорта. Кроме того, вес транспортного средства является разновидностью экономического критерия. В этой связи существенное значение при вытяжке деталей сложной формы приобретает задача снижения разностенности изделия. Это связано с тем, что чрезмерное утонение стенки штампуемой заготовки в процессе формообразования ведет к необходимости увеличивать толщину ее для выполнения требований конструктивной прочности. Последнее, в свою очередь, приводит к увеличению расхода металла и массы деталей, что крайне нежелательно для деталей транспортных средств.

Для каждого k -го варианта технологического процесса рассчитываем разностенность полученной детали

$$\Delta G_{kj} = \frac{(t_{kj})_{\max} - (t_{kj})_{\min}}{t_{oj} + \sum_{n=1}^k \Delta t_{kj}}, \quad (6)$$

где ΔG_{kj} – относительная поперечная разностенность готовой детали;

$t_{k \max}, t_{k \min}$ – максимальная и минимальная толщина стенки;

t_{oj} – толщина исходной заготовки, соответствующая равнопрочности детали;

Δt_k – абсолютное изменение средней толщины стенки при формоизменении.

Для k -го варианта расчета величина ΔG_{kj} является функцией распределения ресурса $z^r = \sum_{k=1}^k z^r$ для каждого варианта процесса. Если при использовании функций управления ресурс пластичности исчерпан или распределение утонений не удовлетворяет конструктивным требованиям, используем дополнительные функции управления: дифференцированный нагрев; изменение профиля радиальных сечений периферийных участков заготовки; введение дополнительных связей; предварительное упрочнение металла дрессировкой, натяжение листа; формовка с дополнительным нагружением и т.д.

Методика и результаты расчета. В качестве примера рассмотрен случай формообразования коробчатых деталей. Для получения оптимального решения использован метод динамического программирования, т.е. метод градиентов второго порядка. Необходимый (требуемый) геометрический параметр определяется и задается конструктором из условий равнопрочности детали и задается в виде таблицы, где x_j^1 ; x_j^2 ; x_j^3 – коэффициенты j -ой точки на заготовке в декартовой системе координат.

Обозначим $\Delta G_{pj}(x_{jk}^i)$ требуемое значение относительной разностенности в j -ой точке, где x_{jk}^i – координаты определяемого геометрического параметра при k -ом варианте формоизменения.

Решение задачи производится из условия минимума функционала L , характеризующего отличие между действительным и требуемым значениями геометрического параметра в определенных элементах заготовки. В качестве функционала L выбираем квадратичный функционал вида

$$L = \sum_{j=1}^{j=k} (\Delta G_{nj} - \Delta G_{pl})^2, \quad (7)$$

доказательства непрерывности и дифференцируемости по координатам которого представлены в специальной литературе [4].

В дальнейшем под функционалом будем понимать поле L , представляющее собой матрицу с n измерениями, составленную по принципу:

$$L = (\ell_{an}), \quad (8)$$

где $a = \varphi, \psi, \omega, F$;

$n = 1, 2, 3, \dots$;

ℓ_{an} – элемент матрицы.

При решении задачи в зависимости от конструктивных особенностей пуансона и матрицы или детали на параметры (элементы матрицы функционала) необходимо наложить ограничения

$$(\ell_{an}) \leq (\bar{\ell}_{an}), \quad (9)$$

где $(\bar{\ell}_{an})$ – ограничения на элементы матрицы.

Задача формулируется следующим образом: найти поле L , удовлетворяющее условию (9) и обеспечивающее минимальное значение функционала в заданной области. Решение задачи производится по многошаговому методу нахождением последовательности секторов L , сходящихся к L_{opt} (оптимальное значение функционала).

Последовательность строим на каждом шаге приближения в окрестности L_{q-1} . Значение шага определяется в результате минимизации функционала (7), разложенного в ряд Тейлора по разности $(L_q - L_{q-1})$. Оптимальное решение записываем как сумму

$$L_{opt} = L_0 + \sum_{q=1}^m \Delta L_q, \quad (10)$$

где m – число итераций;

q – номер шага приближения;

L_0, L_{opt} – начальное и оптимальное значение функционала.

Если оптимизация технологических параметров $(\varphi_k, \psi_k, \omega_k)$ не приводит к необходимому значению разностенности детали, то функционал L дополнительно минимизируется на семействе $R(F_{jikm})$. Здесь F_{jikm} – функции управления.

При $k=1$, F_{ji1m} – соответствует дополнительному локальному силовому нагружению (например, эластичный подпор торца заготовки); при $k=2$, F_{ji2m} –

дополнительное термическое воздействие (дифференцированный нагрев); при $k=3$, $F_{j\dot{z}m}$ – дополнительное вибрационное воздействие (вибропластический эффект) и т.д.

Поиск F_{jikm} производится также градиентным методом.

Выводы.

1. Разработана математическая модель процесса вытяжки деталей сложной формы из тонколистовых заготовок, учитывающая изменение ее толщины, упругопластическое поведение и упрочнение материала заготовки, геометрические параметры инструмента, зазор между пуансоном и матрицей, а также контактный характер взаимодействия с инструментом.

2. На основе разработанной математической модели предложена методика расчета оптимальных деформационных параметров при вытяжке по условию минимума разностенности полученной детали. Использование методики на стадии проектирования технологического процесса позволяет прогнозировать получение детали минимального веса максимально приближенной к равнопрочной.

Список литературы

1. Blascik F., Linhardt P., Strelesky I. Deep drawing without blankholder // Sheet Metal Industries. 1987. V. 64. N 3. - P. 132-136.
2. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1980. - 456 с.
3. "Flight", 1968 v.62., №3079, p.324-328.
4. Gill P., Murray W., Wright M. Practical optimization. Academic Pres. 1981. – p.p. 200-212.
5. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
6. Marciniak Z. Mechanika procesu walczenia blach. Wydawitwa Naukowo – techniczne. Warszawa, 1971.- 271 s.

Розроблена математична модель процесу витягування деталей складної форми. Запропонована методика розрахунку оптимальних деформаційних параметрів за критерієм мінімуму різностінності отриманої деталі.

The mathematical model of process extend of details of the complex form is developed. The technique of account optimum change the form of parameters by criterion of a minimum different thickness of a wall of the received detail is offered.