

УДК 621.983.3:519.863

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК В ПРОЦЕССЕ ВЫТЯЖКИ

Драгобецкий В.В., д.т.н., проф., Загурняк В.Е.

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского
39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20*

E-mail: scenter@polytech.poltava.ua

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

Ключові слова: листовая штамповка, розрізненість, оптимізація.

The mathematical model of the drawing process of items with complex configuration is developed. The method of calculation of optimal deformation parameters by the criterion of the minimum of variation in wall thickness of the received item is offered.

Key words: sheet pressworking, variation in wall thickness, optimization.

Введение. Процессам листоштамповочного производства присуще 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.

Анализ предыдущих исследований. 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, су-

ществует 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.

Цель работы – решение многопараметрической задачи оптимального управления процессом формоизменения листовых заготовок.

Материал и результаты исследования. 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; ψ_k – 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. 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 (гранич-

ное+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 является критерием получения конструкций минимального веса для корпусных деталей авиакосмической 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 равнопрочно-

сти деталі; Δt_k – абсолютне зменшення середньої товщини стінки при формозміненні.

Для k -го варіанта розрахунок величини ΔG_{kj} являється функцією розподілу ресурса $z^r = \sum_{k=1}^k z^r$

для кожного варіанта процесу. Якщо при використанні функцій управління ресурс пластичності виснажені або розподілені утонення не задовольняють конструктивним вимогам, використовуємо додаткові функції управління: диференційований нагрів; зміна профілю радіальних периферійних ділянок заготовки; введення додаткових зв'язей; попереднє упрочнення металу дресировкою, натягнення листа; формівка з додатковим навантаженням і т.д.

В якості прикладу розглянемо випадок формоутворення коробчатих деталей. Для отримання оптимального рішення використано метод динамічного програмування, тобто метод градієнтів другого порядку. Необхідний (вимаганий) геометричний параметр визначається і задається конструктором з умов рівнопрочності деталі і задається в формі таблиці, де $x_j^1; x_j^2; x_j^3$ – коефіцієнти j -ої точки на заготовці в декартовій системі координат.

Обозначимо $\Delta G_{pj}(x_{jk}^i)$ вимагане значення відносної різниченості в j -ої точці, де x_{jk}^i – координати визначуваного геометричного параметра при k -ом варіанті формозміненні.

Розв'язання задачі проводиться з умови мінімуму функціоналу L , що характеризує відміння між дійсними і вимаганими значеннями геометричного параметра в визначених елементах заготовки. В якості функціоналу L вибираємо квадратичний функціонал виду:

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

доказательства неперервності і диференційованості по координатам якого представлені в спеціальній літературі [4].

В подальшому під функціоналом будемо розуміти поле L , що представляє собою матрицю з n вимірювань, складену за принципом:

$$L = (\mathbf{I}_{an}), \quad (8)$$

де $a = \varphi, \psi, \omega, F$; $n = 1, 2, 3, \dots$; \mathbf{I}_{an} – елемент матриці.

При розв'язанні задачі в залежності від конструктивних особливостей пуансона і матриці або деталі на параметри (елементи матриці функціоналу)

необхідно накласти обмеження

$$(\mathbf{I}_{an}) \leq (\bar{\mathbf{I}}_{an}), \quad (9)$$

де $(\bar{\mathbf{I}}_{an})$ – обмеження на елементи матриці.

Задача формулюється наступним чином: знайти поле L , що задовольняє умові (9) і забезпечує мінімальне значення функціоналу в заданій області. Розв'язання задачі проводиться по багатокроковому методу знаходження послідовності секторів L , що сходяться до оптимального значення L_{opt} функціоналу.

Послідовність будемо будувати на кожному кроці наближення в околицях L_{q-1} . Значення кроку визначається в результаті мінімізації функціоналу (7), розкладеного в ряд Тейлора по різниці $(L_q - L_{q-1})$. Оптимальне рішення записуємо як суму:

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

де m – кількість ітерацій; q – номер кроку наближення; L_0, L_{opt} – початкове і оптимальне значення функціоналу, відповідно.

Якщо оптимізація технологічних параметрів $(\varphi_k, \psi_k, \omega_k)$ не приводить до необхідного значення різниченості деталі, то функціонал L додатково мінімізується на родині $R(F_{jikm})$. Тут F_{jikm} – функції управління.

При $k=1$ величина F_{jikm} – додаткове локальне силове навантаження (наприклад, еластичний підпор торця заготовки); при $k=2$ величина F_{ji2m} – додаткове термічне вплив (диференційований нагрів); при $k=3$ величина F_{ji3m} – додаткове вібраційне вплив (вібропластичний ефект) і т.д.

Поиск F_{jikm} проводиться також градієнтним методом.

На основі викладеного вище підходу розроблена програма чисельного розрахунок, що дозволяє проводити пошук оптимальних параметрів процесу. Використовуємо запропоновану методіку для корекції існуючого технологічного процесу формозміненні деталі типу «обшивка» з листового матеріалу – алюмінію АМц2 товщиною 1,2 мм.

Параметри штампової оснастки, що відповідають загальноприйнятим рекомендаціям [5, 6] наступні: радіуси закруглення R_w і R_b , відповідно між вертикальними стінками, а також вертикальної стінкою і дном складали

$R_w = R_b = 5$ мм; радіус сопряжения фланца с вертикальной стенкой $R_f = 3$ мм; радиусы углового закругления матрицы $R_d = 6,2$ мм и пуансона $R_p = 5$ мм; зазор между пуансоном и матрицей – 1,3 мм; давление прижима $Q = 50$ кг/мм²; разностенность детали до корректировки – $\Delta G_k = 0,28$, а максимальное утонение – 20-22%.

Для обеспечения соответствия полю требуемых значений разностенности детали расчеты по предлагаемой методике производились в 100 точках на заготовке.

В результате расчета были получены оптимальные параметры процесса: $R_w = R_b = 4,9$ мм, $R_d = 6$ мм, $R_p = 4,8$ мм, зазор между пуансоном и матрицей 1,35 мм, давление прижима $Q = 39$ кг/мм²; разностенность составила $\Delta G_k = 0,096$; максимальное утонение не превышало 5%.

Таким образом, благодаря использованию предложенной методики обеспечивается существенное повышение прочностных показателей полученной детали и снижается толщина исходной заготовки до 1 мм, а масса детали – на 20%.

Распространение методики на изготовление всего комплекта деталей планера бескрылого летательного аппарата позволяет снизить его массу на 15-20%, а на весь комплект корпусных и штампованных деталей автомобиля «КрАЗ 6510» – на 4-5%.

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.

ЛИТЕРАТУРА

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. Gill P., Murray W., Wright M. Practical optimization. Academic Pres. 1981. – p.p. 200-212.
4. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – Л.: Машиностроение. 1979. – 520 с.
5. Marciniak Z. Mechanika procesu walczenia blach. Wydawitwa Naukowo – techniczne. Warszawa, 1971. 271 s.

Стаття надійшла 15.04.2008 р.