

УДК 621.7.044

В.П. САБЕЛЬКИН, докт.техн.наук,  
И.Д. МАТЮШЕНКО, канд.техн.наук

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ  
ШТАМПОВКИ ЛИСТОВЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ  
ПАРАМЕТРОВ

При отработке нового технологического процесса всегда возникают трудности, связанные с определением оптимальных параметров этого процесса. Для импульсной штамповки с предварительным нагревом заготовок оптимизируемыми параметрами являются внешнее силовое импульсное воздействие, генерируемое посредством системы зарядов взрывчатого вещества, а также поле температур, реализуемое на деформируемой заготовке при помощи различного рода нагревателей. Многопараметричность процессов горячей импульсной штамповки сильно затрудняет проектирование таких процессов и требует проведения целых серий экспериментов, позволяющих подобрать параметры силового и температурного полей лишь для узкого круга деталей. Причем, полученные параметры далеки от оптимальных.

В последнее время становится все более реальной возможность проведения "теоретического" эксперимента с применением ЭВМ, позволяющего, например, с высокой степенью точности рассчитывать напряженное и деформированное состояние как в ходе процесса формовки, так и в конечном состоянии, и предсказывать возникновение критических ситуаций типа разрушения, неудовлетворительного распределения утонений, недоштамповку и т.д. При этом не требуется применение тонкой измерительной техники, больших затрат материальных средств, привлечения значительного числа высококвалифицированных специалистов как при проведении экспериментов на моделях, так и на натуральных деталях и элементах конструкций. Известен ряд трудов, в которых рассматриваются методы по определению оптимальных параметров поля нагрева деформируемой заготовки при горячей импульсной штамповке как плоских, так и цилиндрических заготовок [1, 2].

Причем, во всех указанных работах задача оптимизации разбивалась на две, т.е. сначала определялись необходимые параметры процесса как с точки зрения потребной для формообразования силовой нагрузки, так и потребного температурного поля, а затем, определялись оптимальные расчетные параметры. Такой подход к решению дан-

ной задачи был вызван ограниченными возможностями имевшихся в распоряжении ЭВМ, требовал большого количества машинного времени и, кроме того, требовал дополнительной информации о промежуточных состояниях тех или иных параметров для определения в конечном счете оптимальных значений этих параметров. Очевидно, что решение указанной проблемы методом одноступенчатой оптимизации, когда определяются сразу потребные и расчетные параметры процесса, позволяет автоматизировать проектирование таких процессов и существенно снизить стоимость их разработки.

Задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом: с помощью математического моделирования процессов горячей импульсной штамповки необходимо найти такие оптимальные параметры внешнего силового и температурного полей, при которых должно обеспечиваться максимальное прилегание всех точек полуфабриката к поверхности матрицы при штамповке деталей в оснастке. Кроме того, в отдельных случаях необходимо, чтобы скорости, с которыми точки заготовки подходят к поверхности матрицы, были минимально возможными.

Рассмотрим предварительно нагретую заготовку, штампуемую импульсным воздействием. Используем "узловую" схему, в которой все искомые величины определяем в узловых точках  $m$  расчетной сетки [3, 4]. Заготовка в общем случае подвергается температурному воздействию  $t(T_{mnl})$  и импульсному силовому воздействию  $J(P_{mnl})$ , где  $l$  — индекс времени. Расчет динамического поведения заготовки позволяет определить конечные прогибы и скорости подхода точек заготовки к матрице. Зная расчетный профиль матрицы, можно составить целевую функцию в задаче оптимизации в виде квадратичного функционала Гаусса:

$$\Gamma(P_{mnl}, T_{mnl}) = \sum_{m=1}^{m=N} \sum_{n=1}^{n=N} \alpha_N \left( \frac{N_{mnl}^{\zeta}}{N_{\zeta}^*} \right) + \alpha_Y \left( \frac{\dot{Y}_{mnl}^{\zeta}}{Y_{\zeta}^*} \right), \quad (1)$$

где  $\alpha_N, \alpha_Y$  — весовые коэффициенты ( $\alpha_N + \alpha_Y = 1$ );

$N_{mnl}^{\zeta}$  — длина нормали, восстановленной в  $m$  узле заготовки на  $\zeta$ -ом шаге приближения, до поверхности матрицы  $\Omega$ ;

$\dot{Y}_{mnl}^{\zeta}$  — скорость подхода  $m$ -ого узла заготовки к поверхности матрицы;

$N_{\zeta}^*, Y_{\zeta}^*$  — средние значения зазора между заготовкой и матрицей и скорости подхода заготовки к поверхности матрицы;

$$N_{mn}^{\zeta} = \left( (N_{mn}^{1\zeta})^2 + (N_{mn}^{2\zeta})^2 + (N_{mn}^{3\zeta})^2 \right)^{0,5}, \quad (2)$$

$$\dot{Y}_{mn}^{\zeta} = \left( (\dot{Y}_{mn}^{1\zeta})^2 + (\dot{Y}_{mn}^{2\zeta})^2 + (\dot{Y}_{mn}^{3\zeta})^2 \right)^{0,5}, \quad (3)$$

$$N_{\zeta}^* = \left( 1/mn \right) * \sum_{m=1}^{m=M} \sum_{n=1}^{n=N} N_{mn}^{\zeta}, \quad (4)$$

$$\dot{Y}_{\zeta}^* = \left( 1/mn \right) * \sum_{m=1}^{m=M} \sum_{n=1}^{n=N} \dot{Y}_{mn}^{\zeta}. \quad (5)$$

Часто для упрощения решения задачи оптимизации, сокращения требуемого машинного времени в выражении для целевой функции выбирают следующие значения весовых коэффициентов:  $\alpha_N = 1, \alpha_Y = 0$ .

На рис.1 представлена схема распределения температурного и

Схема распределения температурного, силового воздействия и остаточных прогибов на заготовке

импульсного силового воздействия, создаваемого соответственно различными источниками нагрева и системой зарядов на заготовке, при наличии остаточных прогибов.

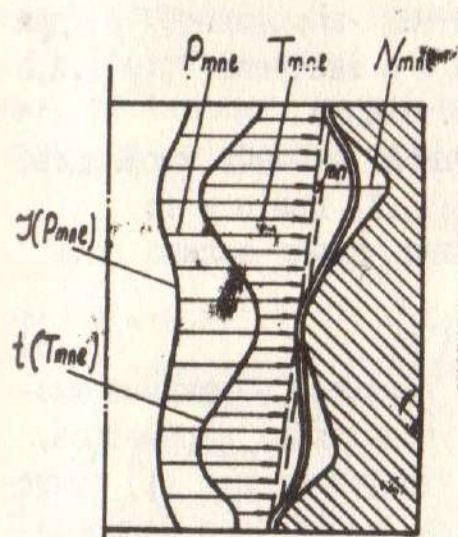


Рис.1.

Задача определения оптимальной прикладываемой к заготовке нагрузке сводится к минимизации функционала (1) на семействе кривых  $J(P_{mn})$  и  $t(T_{mn})$ . Для решения этой задачи можно использовать метод градиентов второго порядка [5] с модификацией при определении перемещения в направлении точки оптимума на каждом шаге. Необходимо отметить, что при решении задач нелинейного программирования при

отсутствии ограничений градиентные методы и методы, использующие вторые производные, сходятся быстрее остальных. Однако, эти методы требуют, чтобы исследуемые функции были, как минимум, дважды дифференцируемы, а улучшение целевой функции с каждым циклом гарантируется только в том случае, если матрица Гессе целевой функции положительно определена, что вызывает дополнительные неудобства.

Поэтому для решения поставленной задачи оптимизации целесо-

образно использование метода поиска, не требующего вычисления производных. Подобные методы не требуют регулярности и непрерывности целевой функции и существования производных на каждом шаге минимизации с последующим выбором максимальных градиентов. Кроме того, по сравнению с методами, использующими производные, предлагаемые методы требуют меньше времени на подготовку задачи к решению и практически не зависят от выбора начальной точки, например, от выбора начальных координат источников силового и теплового нагружения.

Рассмотрим так называемый поиск по методу деформированного многогранника. Рассматриваемый метод является исключением среди всех других методов поиска, поскольку для начала процесса оптимизации требуется не одна начальная точка, как, например, для метода градиентов, а на одну больше, чем число управляющих параметров. Другими словами, пусть  $Y_{j\zeta}^{\alpha 1}$  — управляющие параметры, причем  $\alpha = 1, 2$ ,  $j$ -ая координата 1-го источника на  $\zeta$ -ом шаге итерации. При  $\alpha = 1$  подразумевается импульсный силовой источник  $G$  (заряд БВВ), при  $\alpha = 2$  подразумевается тепловой источник  $Q$ . Соответственно  $j = 1, \dots, 4$ , которые при  $\alpha = 1$  обозначают при  $j = 1, 2, 3$  координаты декартовой системы координат, а при  $j = 4$  — массовую координату заряда; при  $\alpha = 2$  значение  $j = 1, 2, 3$  аналогично,  $j = 4$  — мощность теплового источника.

В общем случае, если обозначить  $I_F$  — число силовых источников,  $I_T$  — число тепловых источников, т.е.  $i = 1, \dots, I_F$  при  $\alpha = 1$ ;  $i = 1, \dots, I_T$  при  $\alpha = 2$ , то число начальных точек должно быть равным:

$$R = 4 ( I_F + I_T ) + 1 \quad (6)$$

Легко убедиться, что указанные точки являются вершинами многогранника в  $(R - 1)$ -мерном пространстве управляющих параметров.

Стратегия метода заключается в том, что функционал (1) вычисляется в вершинах полученного многогранника, после чего направление смещения к точке минимума определяется последовательной заменой вершины с максимальным значением функционала на улучшенную точку, где его значение меньше. Замена исходной вершины на новую приводит к деформированию исходного многогранника, что и определяет название метода. Процесс деформирования многогранника и его смещения продолжается до тех пор, пока центр тяжести последнего не приблизится к точке минимума на заранее заданную величину  $\epsilon$ .

Рассмотрим алгоритм более подробно. Пусть  $Y_{j\zeta}^{\alpha 1K}$  является

$K$ -ой вершиной многогранника на  $\zeta$ -ом этапе поиска, здесь  $K = 1, \dots, R$ ;  $\zeta = 1, 2, \dots$ ; и пусть значение функционала (1) в точке  $Y_{j\zeta}^{\alpha 1K}$  будет равно:

$$\Gamma( P_{mnl}, T_{mnl} ) \Big|_{\substack{n = 1, \dots, N \\ m = 1, \dots, M \\ l = 1, \dots, L}} = \Phi( Y_{j\zeta}^{\alpha 1K} ) \quad (7)$$

Отметим все вершины многогранника, в которых функционал  $\Phi$  достигает минимального и максимального значения. Предположим, что это точки с номерами  $H$  и  $\Theta$ :

$$\Phi( Y_{j\zeta}^{\alpha 1H} ) = \max( \Phi( Y_{j\zeta}^{\alpha 1K} ) ) \quad K = 1, \dots, R; \quad (8)$$

$$\Phi( Y_{j\zeta}^{\alpha 1\Theta} ) = \min( \Phi( Y_{j\zeta}^{\alpha 1K} ) ) \quad K = 1, \dots, R. \quad (9)$$

Обозначим через  $Y_{j\zeta}^{\alpha 1C}$  точку центра тяжести всех вершин многогранника, исключая  $Y_{j\zeta}^{\alpha 1H}$ . Ее координаты могут быть вычислены по формуле [5]:

$$Y_{j\zeta}^{\alpha 1C} = \frac{ ( Y_{j\zeta}^{\alpha 1K} - Y_{j\zeta}^{\alpha 1H} ) }{ (R-1) }, \quad (10)$$

здесь соглашение о суммировании сохраняется.

Определив точку центра тяжести, осуществляем операции отражения, растяжения, сжатия или редукции в зависимости от возникшей ситуации по соотношению:

$$Y_{j\zeta}^{\alpha 1v} = Y_{j\zeta}^{\alpha 1x} + \varphi_q ( Y_{j\zeta}^{\alpha 1w} - Y_{j\zeta}^{\alpha 1z} ), \quad (11)$$

(по  $v, x, w, z$  - суммирования нет)

где  $v = O, P, S, K$ ;  $x = C, \Theta$ ;  $w = C, O, H, K$ ;  $z = H, C, \Theta$ ;

$\varphi_q$  - константа операции;  $q = 1, \dots, 4$ ;

$O, P, S$  - точка отражения, растяжения, сжатия соответственно.

В качестве критерия окончания счета можно использовать требование минимальной разности значений функционала в вершинах и центре тяжести многогранника:

$$(( \Phi( Y_{j\zeta}^{\alpha 1K} ) - \Phi( Y_{j\zeta}^{\alpha 1C} ) )^2 / R)^{0,5} \leq \varepsilon \quad (12)$$

( по  $\zeta$  суммирования нет )

Очевидно, что с помощью операций растяжения или сжатия размеры и форма многогранника масштабируются так, чтобы они удовлетворяли топологии решаемой задачи. После того, как многогранник подходящим образом промасштабирован, его размеры должны поддерживаться неизменными, пока изменения в топологии задачи не потребуют

применения многогранника другой формы.

Определение оптимальных энергетических и геометрических параметров типовых техпроцессов термоимпульсной штамповки проводилось на примере детали "секция внутренняя" кожуха камеры сгорания. Заготовка детали представляет собой коническую оболочку из сплава ВТ5-1 плотностью  $\rho = 4420 \text{ кг/м}^3$  и толщиной 1,2 мм. Высота заготовки 420 мм, диаметр верхнего основания 226 мм, диаметр нижнего основания 136 мм. На рис.2 представлена геометрия детали, а на рис.3 изображен характер представления матрицы.

Геометрия детали

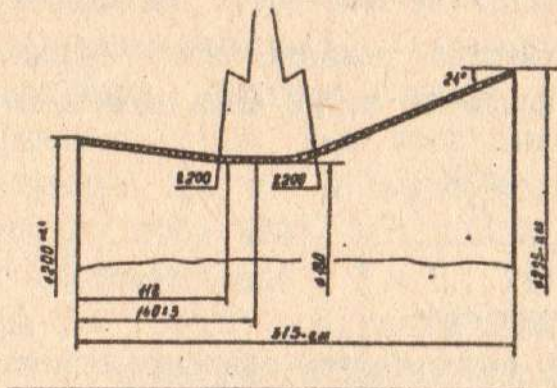


Рис.2

Представление матрицы

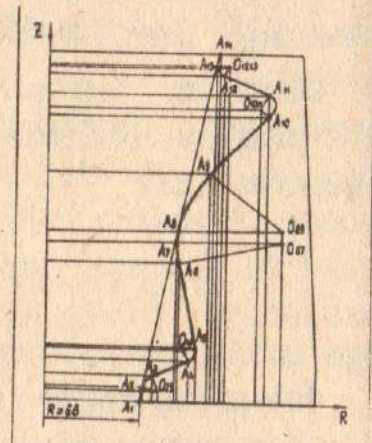


Рис.3.

Для рассматриваемой детали параметрами импульсного силового нагружения являются количество, вес и относительная высота расположения зарядов по отношению к заготовке. Количество зарядов целесообразно определять из технологических соображений для каждого конкретного случая штамповки. Поэтому для выбранной схемы штамповки в матрицу осесимметричной детали, имеющей два "оврага" по образующей, наиболее оправдано применение системы двух зарядов, расположенных по оси симметрии заготовки. Такая система характеризуется четырьмя параметрами - величинами зарядов и относительными высотами их расположения:  $Y_{10}^{11}$ ,  $Y_{10}^{12}$ ,  $Y_{20}^{11}$ ,  $Y_{20}^{12}$ .

Тепловое нагружение рассматриваемой детали целесообразно задавать в виде пересекающихся парабол (см. рис.1), так как это существенно снижает количество характерных параметров и упрощает решение задачи оптимизации. В этом случае тепловая нагрузка характеризуется абсциссой и ординатой максимума каждой параболы и общим свободным коэффициентом, т.е. пятью параметрами. Сохраняя единство обозначений для управляющих параметров, получим:  $Y_{10}^{21}$ ,  $Y_{20}^{21}$

- абсцисса и ордината максимума первой параболы;  $Y_{10}^{22}$ ,  $Y_{20}^{22}$  - абсцисса и ордината максимума второй параболы;  $Y_{\infty 0}^2$  - свободный коэффициент, характеризующий начальную мощность нагревателя. Причем, абсцисса максимума каждой параболы представляет собой отношение текущего значения координаты максимума к высоте заготовки.

Таким образом, общее количество характерных параметров для импульсного силового и температурного нагружений для указанной детали составляет девять единиц. Тогда в соответствии с выражением (6) число начальных точек (или вершин многогранника) должно быть равным десяти.

Метод деформируемого многогранника не накладывает никаких принципиальных ограничений на выбор начальных точек, что удобно при малом опыте горячей импульсной штамповки для расчетов параметров вновь разрабатываемых процессов. Однако всегда необходимо учитывать конкретные условия производства и реальные возможности используемого оборудования. Поэтому с учетом опыта экспериментальных исследований температурных и силовых полей для процессов термоимпульсной штамповки получим следующие граничные значения параметров: вес каждого заряда не должен превышать 50 г, удельная мощность нагревателя должна быть не более 170 кВт/м<sup>2</sup>, все относительные геометрические размеры должны находиться в пределах от нуля до единицы.

Пример начальных автоматически генерируемых значений оптимизируемых параметров термоимпульсной штамповки детали "секция внутренняя" приведен в таблице 1. Шаг генерации исходных данных для параметров силовой нагрузки в этом случае равен для величины зарядов - 10 г, для относительной высоты их расположения - 0,1.

Конкретно для каждой управляющей функции ограничения записываются в виде:

$$\begin{aligned}
 0 \leq Y_{10}^{11} \leq 1; & \quad 0,1 \leq Y_{\infty 0}^{12} \leq 50 \text{ г}; & \quad 0 \leq Y_{10}^{22} \leq 1; \\
 0 \leq Y_{10}^{12} \leq 1; & \quad 0 \leq Y_{10}^{21} \leq 1; & \quad 0 \leq Y_{20}^{22} \leq 170 \text{ кВт/м}^2; \\
 0,1 \leq Y_{\infty 0}^{11} \leq 50 \text{ г}; & \quad 0 \leq Y_{20}^{21} \leq 170 \text{ кВт/м}^2; & \quad 0 \leq Y_{\infty 0}^2 \leq 170 \text{ кВт/м}^2.
 \end{aligned}$$

Деформируемый многогранник адаптируется к топологии целевой функции, вытягиваясь вдоль длинных наклонных плоскостей, изменяя направление в изогнутых впадинах и сжимаясь в окрестностях минимума. Эти операции регулируются коэффициентами отражения, растяже-

ния, сжатия и редукации в выражении (11). При выборе коэффициента

Таблица 1.

## Начальные значения параметров

Параметры Начальные точки	$Y_{11}$ 10	$Y_{12}$ 10	$Y_{11}$ 40, Г	$Y_{12}$ 40, Г	$Y_{21}$ 10	$Y_{21}$ 20, кВт/м <sup>2</sup>	$Y_{22}$ 10	$Y_{22}$ 20, кВт/м <sup>2</sup>	$Y_2$ 40, кВт/м <sup>2</sup>
1	0	0,5	5	5	0,2	120	0,7	130	100
2	0,1	0,6	5	5	0,3	130	0,8	140	110
3	0,1	0,6	15	15	0,4	130	0,9	150	90
4	0,2	0,7	15	15	0,3	140	0,9	160	80
5	0,2	0,7	25	25	0,3	150	0,7	160	140
6	0,3	0,8	25	25	0,2	150	0,8	100	80
7	0,3	0,8	35	35	0,1	100	0,7	120	80
8	0,4	0,9	35	35	0,2	70	0,9	100	50
9	0,4	0,9	45	45	0,4	120	0,8	150	70
10	0,5	1,0	45	45	0,2	100	0,6	100	60

отражения  $\varphi$  учитывают то обстоятельство, что размеры деформируемого многогранника после начального масштабирования должны поддерживаться неизменными, пока изменения в топологии задачи не потребуют применения многогранника другой формы. Это возможно реализовать только при  $\varphi = 1$ , причем решение задачи оптимизации для такого  $\varphi$  требует меньшее количество вычислений функционала, чем при  $\varphi < 1$ . С другой стороны,  $\varphi$  не должен быть много больше единицы, поскольку деформируемый многогранник легче адаптируется к топологии решаемой задачи при меньших значениях  $\varphi$ , особенно, когда не-



обходимо изменять направление поиска. Столкнувшись с изогнутой впадиной и в области локального минимума, размеры многогранника должны уменьшаться, и большее  $\varphi$  в таких условиях замедлит сходимость. Таким образом, значение  $\varphi = 1$  выбирается как компромисс. Что касается остальных коэффициентов, то можно отметить, что влияние выбора коэффициента сжатия  $\varphi$  на эффективность поиска более заметно, чем влияние коэффициента растяжения  $\varphi$ . Для операции редукции, когда все векторы уменьшаются, используется коэффициент редукции  $\varphi$ . Обычно рекомендуемые диапазоны для этих коэффициентов следующие [5]:  $2,8 \leq \varphi \leq 3,0$ ;  $0,4 \leq \varphi \leq 0,6$ ;  $\varphi = 0,5$ .

Критерием окончания поиска является условие, когда центр тяжести деформируемого многогранника приблизится к точке минимума функционала на заранее заданную величину  $\varepsilon$  в выражении (12). Величина  $\varepsilon$  определяется из условий соблюдения допустимого отклонения профиля отштампованной детали от заданного (например, матрицей) в каждом расчетном узле, не превышающего 8...12%, а также из условий рационального использования машинного времени путем проведения ряда численных экспериментов. Для девяти управляющих параметров задачи оптимизации и заданного отклонения расчетного профиля детали от потребного величину  $\varepsilon$  рекомендуется выбирать в пределах:  $0,1 \leq \varepsilon \leq 0,15$ . Тогда время счета для персонального компьютера PC AT - 286 не превышает 3...4 часов.

Таким образом, задав начальные значения и определив ограничения на управляющие параметры, а также надлежащим образом промаштабирав деформируемый многогранник и определив условие окончания счета, можно вести расчет оптимальных параметров для детали "секция внутренняя". Результаты счета приведены в таблице 2.

Результаты расчета оптимальных параметров

Таблица 2

Оптимальные параметры	$Y_{10}^{11}$	$Y_{10}^{12}$	$Y_{40}^{11}, \Gamma$	$Y_{40}^{12}, \Gamma$	$Y_{10}^{21}$	$Y_{10}^{21}, 2$ кВт/м	$Y_{10}^{22}$	$Y_{20}^{22}, 2$ кВт/м	$Y_{40}^{22}, 2$ кВт/м
Первый переход	0,155	0,815	19,1	22,1	0,162	143	0,793	154	122
Второй переход	0,169	0,800	22,1	25,2	0,151	147	0,742	157	119

На рис.4. представлены результаты расчета оптимальных параметров импульсной силовой нагрузки, а на рис.5 - теплового нагружения.

### Оптимальные параметры силового нагружения

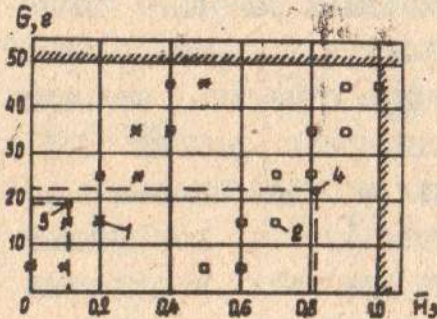


Рис. 4

1, 2 — начальные значения;  
3, 4 — оптимальные значения.

### Оптимальные параметры теплового нагружения

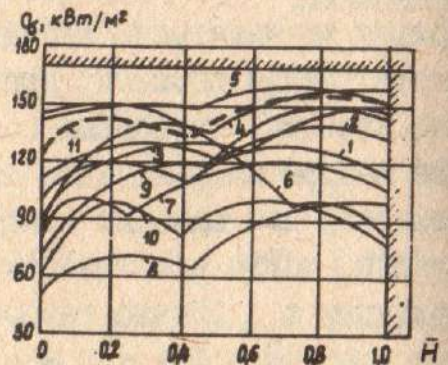


Рис. 5

1, ..., 10 — начальные профили  
тепловой нагрузки;  
11 — оптимальный профиль.

Таким образом, представленная модель определения оптимальных технологических параметров процессов термоимпульсной штамповки, а также алгоритмы и пакеты прикладных программ, реализующие теоретическую модель, позволяют улучшить параметры уже существующих технологий и дают возможность автоматизировать проектирование новых техпроцессов для оболочечных деталей сложной формы.

### Список литературы:

1. Сабелькин В.П., Матишенко И.Д. Определение оптимальных величин энергетических и геометрических параметров нагревателя при термоимпульсной штамповке листовых деталей. — Деп. ВНИТИ (ВНИИТЭМР), 1990, № 12, с.95.
2. Матишенко И.Д., Сабелькин В.П., Андриенко А.М. Определение оптимальных величин энергетических и геометрических параметров холодной штамповки листовых деталей. — Деп. ВНИТИ (ВНИИТЭМР), 1990, № 12, с.95.
3. Ямото Е. Аналитические решения и методы конечных разностей и конечных элементов. Нихон кикай гаккойси, 1971, т.74, № 629, с.696-703 (Перевод Ц - 24571).
4. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. — М.: Мир, 1972, с.415.
5. Хивмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. — М.: Мир, 1975. — 458с.