

УДК 621.979.07(043)

Орлова Е. П.  
Даирбекова Г. С.

## АНАЛИЗ ТЕОРИИ РАСЧЕТА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ ПРИ ШТАМПОВКЕ ДЕТАЛЕЙ НА ЛИСТОШТАМПОВОЧНЫХ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ АВТОМАТАХ

Листовая штамповка позволяет получать сложные по форме и точные по размерам изделия при значительной экономии металла и высокой производительности труда.

С использованием разработанных в теории обработки металлов давлением способов приближенных решений удалось создать сравнительно стройную методику анализа формоизменяющих операций листовой штамповки, позволяющую учесть влияние многих факторов на процесс деформирования.

Изложение и обоснование методики учета влияния отдельных факторов на процесс деформирования в формоизменяющих операциях листовой штамповки можно найти в работах по теории обработки металлов давлением и, в частности, в работах [1, 2].

Целью данной работы является провести анализ теории расчета энергосиловых параметров процесса вытяжки при штамповке деталей на листоштамповочных многопозиционных автоматах.

Операциям листовой штамповки соответствуют определенные схемы напряженного состояния. При разделительных операциях напряженное состояние объемное и приближенно соответствует деформированию сдвигом. При формоизменяющих операциях без принудительного утонения, за исключением гибки, схемы напряженного состояния в очаге деформации близки к схеме плоского напряженного состояния. При операциях с принудительным утонением схема напряженного состояния объемная.

Оценка характера схем напряженного состояния важна для установления условий перехода от упругих деформаций к пластическим [3].

Математически строго решить задачу по отысканию полей напряжений и деформаций при листовой штамповке с учетом всех существенно влияющих факторов практически невозможно. Это объясняется нестационарностью процесса деформирования и множеством факторов, влияющих на поля напряжений и деформаций. Поэтому при анализе операций обычно используют ряд допущений, связанных с аппроксимацией изменения механических свойств аналитическими функциями материала заготовки и условий ее нагружения, а также с ограничением числа факторов, учитываемых в анализе и влияющих на процесс деформирования.

В общем случае при анализе операций листовой штамповки для решения задач по нахождению полей напряжений должны использоваться уравнения равновесия, уравнения пластичности, уравнения связи напряжений и деформаций, уравнения неразрывности деформаций.

Например, для таких операций, как вытяжка без утонения стенки, отбортовка, обжим, раздача, формовка, размеры очага деформации вдоль срединной поверхности заготовки и радиусы, кривизны срединной поверхности обычно значительно больше толщины заготовки. При таких размерных характеристиках очага деформаций величины напряжений, перпендикулярных к срединной поверхности заготовки, малы по сравнению с напряжениями, действующими параллельно касательным к срединной поверхности, и схема напряженного состояния с достаточной точностью может быть принята плоской [3].

Для плоского напряженного состояния уравнения равновесия имеют вид: в прямоугольной системе координат:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0;\end{aligned}\quad (1)$$

в полярных координатах:

$$\begin{aligned}\rho \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \sigma_\rho - \sigma_\theta &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \rho \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + 2\tau_{\rho\theta} &= 0.\end{aligned}\quad (2)$$

Из приведенных уравнений видно, что для плоского напряженного состояния дифференциальные уравнения равновесия представляют собой систему из двух уравнений с тремя неизвестными.

Рассмотрим кратко существующие формы записи уравнения пластичности, которые могут быть использованы при анализе операций листовой штамповки.

Для плоского напряженного состояния уравнения пластичности имеют вид:

$$\begin{aligned}\sigma_1 - \sigma_3 &= \pm \sigma_S \\ \sigma_1 &= \pm \sigma_S \\ \sigma_3 &= \pm \sigma_S.\end{aligned}\quad (3)$$

Первое уравнение относится к разноименной, а два других – к одноименным схемам напряженного состояния, где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – главные нормальные напряжения, действующие вдоль срединной поверхности заготовки.

Если принять  $\sigma_2 = 0$ , то по энергетической гипотезе получаем:

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2 = \sigma_S^2. \quad (4)$$

Упрощенная запись уравнения пластичности по энергетическому условию имеет вид, аналогичный уравнениям (3), но с введением коэффициента  $\beta$  перед напряжением текучести.

В координатах  $\sigma_1 - \sigma_3$  уравнения (3) представляют собой уравнения сторон шестиугольника, вписанного в эллипс, определяемый уравнением (4).

Уравнения пластичности для плоского напряженного состояния в компонентах тензора напряжений по гипотезе постоянства максимальных касательных напряжений имеют вид:

$$\begin{aligned}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 &= \sigma_S^2 \\ \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} &= \pm \sigma_S \\ \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} &= \pm \sigma_S\end{aligned}$$

Здесь, как и раньше, первое уравнение относится к разноименной, а два последующих – к одноименным схемам напряженного состояния.

Для этого же случая уравнение пластичности по энергетическому условию имеет вид:

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2 = \sigma_S^2.$$

При анализе операций листовой штамповки (в зависимости от условий деформирования) из приведенных уравнений пластичности следует выбрать то, которое даст более простое решение [4].

В работе [5] излагаются методы расчета на устойчивость формоизменяющих операций листовой штамповки. Рассматриваются вопросы влияния на устойчивость формообразования листовой заготовки напряженно-деформированного состояния и некоторых факторов технологического характера. В связи с тем, что при прокатке листового металла в нем возникает значи-

тельная пластическая анизотропия [6, 7], то вопросам влияния анизотропии на формообразование и устойчивость деформации листового металла в работе уделено большое внимание.

При изготовлении деталей на листоштамповочных многопозиционных автоматах наибольшее распространение получила вытяжка деталей с фланцем.

Работы [7] посвящены анализу энергосилового режима процесса вытяжки детали с фланцем.

Одним из способов, которым можно влиять на распределение усилий по ползуну является вытяжка с утонением стенки [8–10], которая может осуществляться без уменьшения и с уменьшением диаметра заготовки.

С целью рационального нагружения и перекоса ползуна, а также смещения инструмента в результате изменения усилий по длине и пути ползуна при штамповке деталей на листоштамповочных многопозиционных автоматах целесообразно осуществлять вытяжку с утонением стенки без уменьшения внутреннего диаметра. Усилия деформирования (рис. 1) определяются по формулам Е.А.Попова [4] для конусной матрицы при одинаковых ( $\mu_1 = \mu_2$ ) и разных ( $\mu_1 \neq \mu_2$ ):

$$P = \pi d_n s_i \sigma_m \left[ \ln \frac{s_{i-1}}{s_i} + \frac{\mu}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \left( 1 - \frac{1}{2} \ln \frac{s_{i-1}}{s_i} \right) \left( \frac{s_{i-1}^2 - s_i^2}{s_{i-1} - s_i} \right) + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right],$$

$$P = \pi d_n s_i \sigma_m \left[ \ln \frac{s_{i-1}}{s_i} + \frac{\mu_1 + \mu_2}{4 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \left( 1 - \frac{1}{2} \ln \frac{s_{i-1}}{s_i} \right) \left( \frac{s_{i-1}^2 - s_i^2}{s_{i-1} - s_i} \right) + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right]$$



Рис. 1. Схема вытяжки с утонением стенки:

а) через конусную матрицу, б) через радиальную матрицу

Вытяжка с проталкиванием является более предпочтительной по сравнению с предыдущими способами, так как применение этого способа вытяжки позволит наиболее равномерно распределить усилия по длине ползуна и добиться значительного уменьшения перекоса ползуна и смещения инструмента.

Схема штамповки деталей по этому способу возможна дном вниз или дном вверх. Как показали исследования авторов [4, 11] основными преимуществами вытяжки с проталкиванием по сравнению с обычной вытяжкой являются:

- уменьшение напряжений в наиболее нагруженной зоне (зона у дна полуфабриката);
- получение более равномерной толщины стенки;
- отсутствие специального прижимного устройства для фланца кроме первой вытяжки.

При этом способе вытяжки значительно облегчается силовой режим при определенном значении проталкивающей силы, а также возможно сокращение вытяжных операций.

Схемы деформированного состояния для вытяжки с проталкиванием и без практически совпадают, а напряженного состояния значительно отличаются.



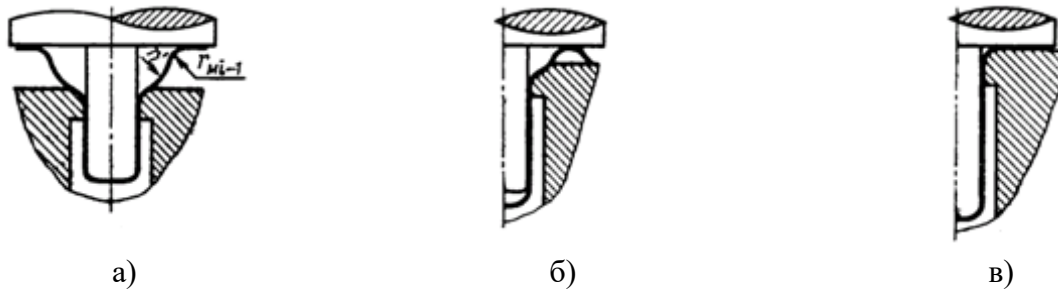


Рис. 3. Фазы деформирования при вытяжке с проталкиванием:

а) вторая фаза (проталкивание происходит при совпадении  $r'_i$  и  $r_{i-1}$ ); б) начало правки; в) калибровка (чеканка) фланца

Исследованиями авторов [8, 12] установлено, что на суммарную степень деформации без межоперационных отжигов решающее влияние оказывает объемное перераспределение металла по операциям. При проталкивании металл под действием сжимающей силы несколько утолщается и вытесняется во фланец, следовательно, для дальнейшего формоизменения на последующих операциях остается меньший объем, и, соответственно коэффициент объемного перераспределения металла  $\beta$  будет меньше 1.

По экспериментальным исследованиям И.А Норицына [11] (рисунок 3), значения коэффициента  $\beta_i = 0,96 \dots 0,98$ , причем:

$$\beta_i = \left( \sum_{k=1}^s l_k \rho_k \right)_i / \left( \sum_{k=1}^s l_k \rho_k \right)_{i-1}$$

где  $2\pi \left( \sum_{k=1}^s l_k \rho_k \right)_i$  – площадь поверхности полуфабриката в расчетной зоне на  $i$ -й операции;

$2\pi \left( \sum_{k=1}^s l_k \rho_k \right)_{i-1}$  – то же, на  $(i-1)$ -й операции (рис. 3).

Определение точного значения коэффициента  $\beta_i$  на вытяжных операциях является актуальной задачей, так как неправильный выбор его значения приводит либо к дефектам деталей из-за обрыва дна полуфабриката, либо к перерасходу материала.

Соппротивление деформированию для первой и второй зон (рис. 1) под действием сжимающих усилий равно:

$$q_1 = -1,1\sigma_m (1 - fA) \{ \ln(d_0 / d_{i-1}) + \ln[(a-1)/(a - \cos \alpha_n)] + fA \} \quad (5)$$

С учетом преобразования:

$$\ln \frac{d_0}{d_{i-1}} + \ln \frac{a-1}{a - \cos \alpha_n} = \ln \left[ m_i \frac{1 + (r_{mi} + 0,5s_i) / d_{i-1}}{1 + (1 - m_i) / 2m_i} \right]$$

Общее решение (1) имеет вид:

$$q_1 = -1,1\sigma_m (1 + fA) \ln \left[ 2m_i \frac{1 + (r_{mi} + 0,5s_i) / d_{i-1}}{1 + m_i} \right] + fA,$$

где  $A = \alpha_n - \frac{2a}{\sqrt{a^2 - 1}} - \arctg \left( \frac{a+1}{\sqrt{a^2 - 1}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)$ ;

$a = 1 + (d_1 + s_i) / (2r_{mi} + s_i)$ ;

$\cos \alpha_n = 1 - (d_{i-1} - d_1) / [4(r_{mi} + s_i)]$ ;

$\sigma_m$  – предел текучести с учетом упрочнения;

$f$  – коэффициент трения;

$d_{i-1}$ ,  $d_i$ ,  $s_{i-1}$ ,  $s_i$ ,  $\alpha_n$  согласно рис. 3.

Напряжения при изгибе оболочки в обеих зонах принимаются по формуле, предложенной Л.А.Шофманом [13]:

$$q_{uz} = \sigma_m s_i / [1/(2r_{ni} + s_i) + 1/(2r_i + s_i)], \quad (6)$$

где  $r_i$  – радиус свободного изгиба.

Исследованиями [13] установлено, что радиус вынужденного изгиба меньше радиуса свободного изгиба (2), который определяется:

$$r'_i = (r_{mi} + s_i) \left[ 1 - e^{m_i/(m_i-1)} \right].$$

Этот радиус и нужно учитывать при определении сопротивления изгибу (2).

Усилие вытяжки от  $q_1$  и  $q_2$  равно:

$$P_{q1+q2} = \pi(d_{i-1} + s_i)s_i\sigma_m \left\{ \begin{aligned} & [s_i(1/(2r_{mi} + s_i) + 1/(r'_i + s_i)) - \\ & - 1,1(1 + fA)] \left[ \ln(2m_i \frac{m_i + 2(r_{mi} + 0,5s_i)/d_{i-1}}{m_i + 1}) + fA \right] \end{aligned} \right\}$$

Для определения напряжения изгиба в конечный период вытяжки с проталкиванием, который характеризуется увеличением сопротивления деформированию вследствие появления дополнительных усилий, необходимых для спрямления стенки полуфабрикатов с радиусов  $r'_i$  и  $r_{mi-1}$  на общую касательную к окружностям, описанными ими.

Напряжение изгиба определяется по формуле Шофмана Л.А.:

$$q_3 = s_i\sigma_m [(2 + m_{si}) / 3(2r'_i + s_i) + m_{si} / (2r_{mi-1} + s_i)]. \quad (7)$$

Добавочное усилие от изгиба [15] равно:

$$P_{q3} = \pi s_i^2 (d_{i-1} + 0,726r_{mi-1})\sigma_m m_{si} / (2r_{mi} + s_i) + \sigma_m s_i^2 \pi [(2 + m_{si}) / 3(r'_i + s_i)] \times \\ \times [0,5d_{i-1}(1 + m_i) - 0,363r'_i + 1,7s_i + r_{mi}(1 - \cos\alpha_n)]$$

Полное усилие вытяжки с проталкиванием:

$$P_{max} = P_{q1+q2} + P_{q3}. \quad (8)$$

Уточненная формула (8) для определения усилия вытяжки с проталкиванием позволит правильно оценить суммарное усилие многопереходной штамповки, а также рационально распределить операционные усилия по длине ползуна.

## ВЫВОДЫ

Анализ литературных источников показывает, что исследованию рационального использования ЛМА при многопереходной штамповке с одновременным повышением точности деталей уделялось мало внимания. Это позволяет сделать следующие выводы:

- технологические процессы разрабатывались в основном для конкретных или типовых деталей без системного анализа функций;
- количество возможных вариантов процессов определялось простым перебором без использования методов математической комбинаторики;
- за критерий оптимизации принималось условие минимума момента относительно геометрической середины ползуна от действия усилий на позициях штамповки или минимума смещения инструмента на отдельных позициях в условиях статического нагружения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Расширение функциональных и технологических возможностей листоштамповочных многопозиционных прессов-автоматов / Материалы совещания по безмуфтовым прессам с механизмами переменной структуры.* – Фрунзе, 1989. – С. 85–86.
2. Орлов П.Г. *Анализ силовых режимов многопозиционной штамповки деталей автотракторной электроосветительной арматуры / П.Г. Орлов, С.Г. Шехватов, Е.П. Орлова // Технология машиностроения. МВ и ССО КазССР.* – Алма-Ата, 1979. – С. 123–126.
3. Попов Е.А. *Технология и автоматизация листовой штамповки / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин.* – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2000. – 480 с.
4. Попов Е.А. *Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов.* – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

5. Головлев В.Д. *Расчеты процессов листовой штамповки* / В. Д. Головлев. – М.: Машиностроение, 1974. – 136 с.
6. Яковлев С.П. *Штамповка анизотропных заготовок* / С.П. Яковлев, В.Д. Кухарь. – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с.
7. Карев В.Ф. *Опыт штамповки корпусов автомобильных фар на многопозиционных прессах* / В. Ф. Карев // КШП. – 1970. – № 9. – С. 23–26.
8. Норицын И.А. *Многопозиционная листовая штамповка и конструкция автоматов* / И.А. Норицын, П.Г. Орлов. – М.: Машиностроение, 1973. – 70 с.
9. Олша А.М. *Листовая штамповка на многопозиционных автоматах* / А. М. Олша. – М.: Машиностроение, 1980. – 142 с.
10. Орлов П.Г. *Штамповка деталей на листоштамповочных автоматах (основы теории и расчета)* / П. Г. Орлов. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
11. Норицын И.А. *Основы теории обработки металлов давлением* / Под ред. Сторожева М.В., гл. П. – Машигиз, 1959. – С. 61–100.
12. Орлов П.Г. *Научные основы рационального построения технологических процессов и обоснование энергосиловых и кинематических параметров ЛМА. Дис.... д-ра техн. наук.* – М.: МАМИ, 1979. – 405 с.
13. Шофман Л.А. *Основы расчета процессов штамповки и прессования* / Л. А. Шофман. – М.: Машигиз, 1961. – 339 с.
14. Орлов П.Г. *Влияние основных параметров штампа полуфабриката и автомата на процесс штамповки с проталкиванием изделий* / П.Г. Орлов, А.Г. Миков // *Технические науки.* – МВЦССО Каз ССР. – №14. – 1973.

## REFERENCES

1. *Rasshirenie funkcional'nyh i tehnologicheskikh vozmozhnostej listoshtampovoch-nyh mnogopozicionnyh pressov-avtomatov* / *Materialy soveshhanija po bezmuftovym pressam s mehanizmami peremennoj struktury.* – Frunze, 1989. – S. 85–86.
2. Orlov P.G. *Analiz silovyh rezhimov mnogopozicionnoj shtampovki detalej avtotraktornoj jelektroosvetitel'noj armatury* / P.G. Orlov, S.G. Shehvatov, E.P. Orlova // *Tehnologija mashinostroenija. MB i SSO KazSSR.* – Alma-Ata, 1979. – S. 123–126.
3. Popov E.A. *Tehnologija i avtomatizacija listovoj shtampovki* / E.A. Popov, V.G. Kovalev, I.N. Shubin. – М.: Izd-vo MGTU im.N.Je.Baumana, 2000. – 480 s.
4. Popov E.A. *Osnovy teorii listovoj shtampovki* / E. A. Popov. – М.: Mashinostroenie, 1977. – 278 s.
5. Golovlev V.D. *Raschety processov listovoj shtampovki* / V. D. Golovlev. – М.: Ma-shinostroenie, 1974. – 136 s.
6. Jakovlev S.P. *Shtampovka anizotropnyh zagotovok* / S.P. Jakovlev, V.D. Kuhar'. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 136 s.
7. Karev V.F. *Opyt shtampovki korpusov avtomobil'nyh far na mnogopozicionnyh pressah* / V. F. Karev // KShP. – 1970. – № 9. – S. 23–26.
8. Noricyn I.A. *Mnogopozicionnaja listovaja shtampovka i konstrukcija avtomatov* / I.A. Noricyn, P.G. Orlov. – М.: Mashinostroenie, 1973. – 70 s.
9. Ol'sha A.M. *Listovaja shtampovka na mnogopozpcionnyh avtomatah* / A. M. Ol'sha. – М.: Mashinostroenie, 1980. – 142 s.
10. Orlov P.G. *Shtampovka detalej na listoshtampovochnyh avtomatah (osnovy teorii i rascheta)* / P. G. Orlov. – М.: Mashinostroenie, 1984. – 160 s.
11. Noricyn I.A. *Osnovy teorii obrabotki metallov davlenii* / Pod red. Storozheva M.V., gl. P. – Mashgiz, 1959. – S. 61–100.
12. Orlov P.G. *Nauchnye osnovy racional'nogo postroenija tehnologicheskikh proces-sov i obosnovanie jenergosilovyh i kinematicheskikh parametrov LMA. Dis.... d-ra tehn. nauk.* – М.: MAMI, 1979. – 405 s.
13. Shofman L.A. *Osnovy rascheta processov shtampovki i pressovanija* / L. A. Shofman. – М.: Mashgiz, 1961. – 339 s.
14. Orlov P.G. *Vlijanie osnovnyh parametrov shtampa polufabrikata i avtomata na process shtampovki s protalkivaniem izdelij* / P.G. Orlov, A.G. Mikov // *Tehnicheskie nauki.* – MViSSO Kaz SSR. – №14. – 1973.

Орлова Е. П. – канд. техн. наук, доц. каф. СМиТМП КазНТУ

Даирбекова Г. С. – магистр техн.наук, преп. каф. ОМД КГИУ

КазНТУ – Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Саипаева, г. Алматы, Республика Казахстан;

КГИУ – Карагандинский государственный индустриальный университет, г. Темиртау, Казахстан.

E-mail: [guldana.01.02.91@mail.ru](mailto:guldana.01.02.91@mail.ru), [guldana.01.02.91@mail.ru](mailto:guldana.01.02.91@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 01.03.2017 г.