

В.И.Горячев, Н.П.Колесников, В.М.Чуриков

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПРИ ФОРМОИЗМЕНЕНИИ СЛОИСТЫХ ЛИСТОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ

Слоистый листовой полуфабрикат - один из наиболее перспективных видов листовых материалов, получающий все более широкое применение в машиностроении.

В общем случае под слоистыми листовыми полуфабрикатами понимают листовые материалы, составленные из прочно соединенных по всей поверхности контакта слоев двух или большего числа разнородных металлов. Основными особенностями материалов такой конструкции являются: слоистая структура, различие физико-механических свойств составляющих компонентов, пониженная прочность по границам раздела слоев.

Использование слоистых материалов сдерживается из-за отсутствия теоретически обоснованных методов их формоизменения, что существенно снижает технологические возможности процесса и, как следствие, увеличивает металлоемкость и трудоемкость изготовления деталей.

Наиболее изученными оказались более простые операции листовой штамповки: штамповка-вырезка и штамповка-гибка [1], [2]. Разработана методика оценки механических свойств двухслойных материалов [3], [4], а также сделана попытка теоретически обосновать с позиции силовых параметров процесс штамповки-вытяжки [5].

Целью настоящей работы является разработка с использованием известных положений теории листовой штамповки монометаллов реально обоснованных предпосылок методики анализа напряженно-деформированного состояния при формообразовании многослойных деталей.

В основу работы положен метод обобщенных уравнений, разработанный Е.А.Поповым для монометаллов [6], достоинством которого является возможность получения замкнутого решения и доведения его до расчетной инженерной методики. Для решения поставленной задачи дополнительно к имеющимся в работе [6] допущениям принят следующий ряд упрощающих допущений:

а) касательные напряжения, действующие по поверхности контакта системы заготовка-инструмент (τ_k), пропорциональны среднему (приведенному) нормальному давлению ($\sigma_{\text{ср}}$), развиваемому заготовкой:

$$\tau_k = \mu_k \sigma_{\text{ср}} \quad (1)$$

где μ_k - коэффициент трения системы заготовка-инструмент;

б) напряжения относительного сдвига по поверхностям контакта слоев в процессе деформации не превышают прочности их сцепления (относительный сдвиг слоев отсутствует);

в) толщины многослойной заготовки и составляющих слоев в процессе формоизменения остаются неизменными;

г) элементарные силы, действующие в каждом слое заготовки, отнесены к срединной поверхности соответствующего слоя;

д) положение каждого слоя в очаге деформации задается расстоянием по нормали, отсчитываемым от оси симметрии до срединной поверхности соответствующего слоя.

Используя принятые допущения, рассмотрим равновесие многослойного элемента, выделенного в очаге деформации заготовки (рис.1)

Проектируя силы, действующие на каждый слой элемента на нормаль и касательную к поверхности соответствующего слоя, в результате суммирования получим:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{\text{ср}} f_3^i - 2 \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{\text{ср}} f_1^i \frac{d\alpha}{2} - 2 \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{\text{ср}} f_2^i \frac{d\beta}{2} = 0; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{\text{ср}} f_1^i + d(\sigma_{\text{ср}} f_1^i) - \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{\text{ср}} f_1^i - 2 \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{\text{ср}} f_2^i \frac{d\beta}{2} - \mu_k \sum_{i=1}^{i=n} f_3^i = 0, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3 \dots n$ - порядковый номер слоя.

Для вывода уравнения равновесия определим соотношение между параметрами слоев выделенного элемента, входящими в уравнения (2) и (3).

Значения величин площади, а f_1^i , f_2^i , f_3^i выражаются зависимостями:

$$f_1^i = S_i R Q_i d\beta = S_i z_i d\gamma \quad (4)$$

$$f_2^i = S_i R z_i d\alpha = S_i \frac{dz_i}{\sin \alpha}; \quad (5)$$

$$f'_i = R z_i R Q_i d\alpha d\beta = z_i dz_i \frac{d\alpha}{\sin \alpha},$$

(6)

где s_i - толщина i -го слоя;

$$d\beta = \frac{d\beta}{\cos \alpha} = \frac{d\alpha}{\sin \alpha}. \quad (7)$$

Используя равенства (4)-(7) и учитывая, что

$$df'_i = s_i dz_i d\alpha, \quad (8)$$

уравнение (2) получим в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{Ri} R z_i R Q_i = \quad (9)$$

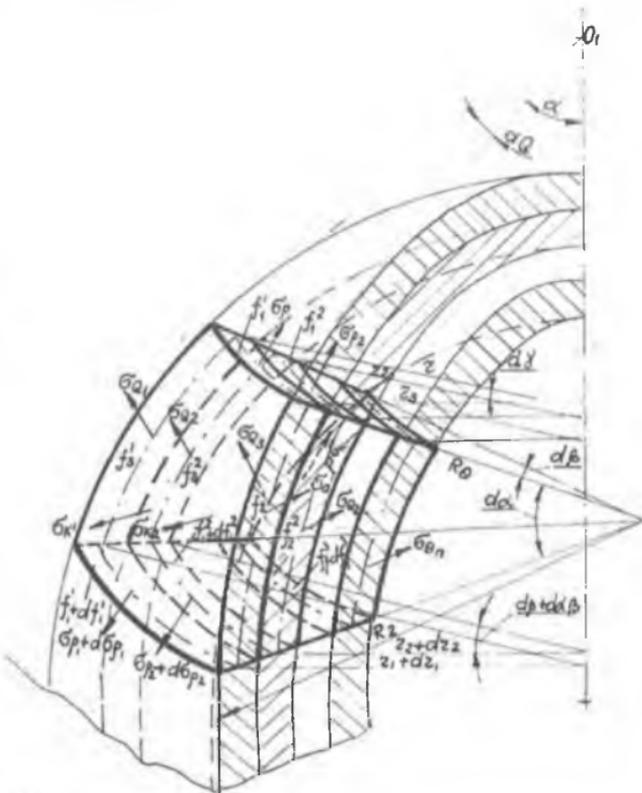
$$\sum_{i=1}^n \sigma_{pi} s_i R Q_i =$$

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{Ri} s_i R z_i = 0.$$

Принимая

$$z_i = m_i z_1, \quad (10)$$

где



Р и с. I. Схема равновесия многослойного элемента при наличии трения и отсутствии относительного сдвига слоев

$$z_i = z_1 - \left[\frac{s_r + s_i}{2} + \sum_{k=1}^i s_k - (s_r + s_i) \right] \cos \alpha, \quad (11)$$

после дифференцирования получим

$$dz_i = m_i dz_1. \quad (12)$$

Так как

$$\frac{dz_i}{\sin \alpha} = R z_i d\alpha; \quad R Q_i = \frac{z_i}{\cos \alpha},$$

то, используя (10), находим:

$$Rz_i = m_i Rz_1; \quad (13)$$

$$Rq_i = m_i Rq_1. \quad (14)$$

Отсюда уравнение (9) с учетом равенств (13), (14) и почленного деления на S_1 , Rz_1 , Rq_1 (принято $\frac{S_i}{S_1} = \kappa_i$) примет вид

$$\sum_{i=1}^{i=n} \frac{m_i^2}{S_1} \sigma_{\kappa_i} - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\kappa_i m_i}{Rz_1} \sigma_{\rho_i} - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\kappa_i m_i}{Rq_1} \sigma_{q_i} = 0. \quad (15)$$

Подставляя в уравнение (3) соотношения (4)-(8), а также учитывая, что $d(\sigma_{\rho_i} f_i') = \sigma_{\rho_i} df_i' + f_i' d\sigma_{\rho_i}$, после сокращения, почленного деления на S, dz_1 , с учетом (10), (12), (15) и соотношений κ_i , m_i , находим

$$\begin{aligned} & \frac{z_1}{dz_1} d \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{\rho_i} S_i z_i + \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{\rho_i} S_i z_i - \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_{q_i} S_i z_i \\ & - \frac{\mu \kappa z_1}{S \sin \alpha} \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_{\rho_i}}{Rz_1} S_i z_i + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\sigma_{q_i}}{Rq_1} S_i z_i \right) = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Уравнение (16) представляет собой дифференциальное уравнение равновесия многослойного элемента, составленное относительно размерных характеристик очага деформации первого слоя, члены этого уравнения, отнесенные к единице длины, являются суммой моментов элементарных сил относительно оси симметрии очага деформации.

Приведенное уравнение (16) противоречит условию однородности деформации, что делает его мало пригодным для анализа методами теории листовой штамповки.

Применяя известное положение теоретической механики о равенстве момента составляющих сил моменту равнодействующей силы, заменим каждую из этих сумм элементарной равнодействующей силой (σ_{ρ_0}) с поверхностью ее приложения, расположенной в теле рассматриваемого элемента на расстоянии z_0 от оси симметрии очага деформации (назовем эту поверхность поверхностью приложения средних сил ППС).

Принимая по аналогии с уравнениями (10) и (12) $z_0 = qz_1$, $dz_0 = qdz_1$, $Rq_0 = qRq_1$, $Rz_0 = qRz_1$, подставляя эти значения в (16) и проводя преобразования, получим

$$\frac{z_0}{dz_0} d\sigma_{\rho_0} + \sigma_{\rho_0} - \sigma_{q_0} - \frac{\mu \kappa z_0}{S \sin \alpha} \left(\frac{\sigma_{\rho_0}}{Rz_0} + \frac{\sigma_{q_0}}{Rq_0} \right) = 0, \quad (17)$$

где σ_{p0} , σ_{q0} и R_{z0} , R_{q0} - средние (приведенные) напряжения и радиусы ППС в меридианальном и широтном направлениях.

Уравнение (17) позволяет рассматривать многослойный материал как условно однородный (однослойный) независимо от числа, соотношения толщин и механических свойств составляющих слоев, что существенно облегчает вывод зависимостей для анализа напряженно-деформированного состояния (полуфабриката в целом), силовых и геометрических параметров процесса при формообразовании многослойных деталей.

При числе слоев $n = 1$ уравнение (17) превращается в известное, полученное Е.А. Поповым [6] для случая формообразования однослойных деталей.

Условие пластичности слоистых листовых полуфабрикатов на основании допущения об условной их однородности будет выражаться зависимостями, аналогичными по виду зависимостям для однослойных материалов. Так, при плоском напряженном состоянии по условию постоянства разности главных нормальных напряжений уравнение имеет вид

$$\sigma_{p0} - \sigma_{q0} = \pm \sigma_{S0}, \quad (18)$$

где σ_{S0} - предел текучести слоистого листового полуфабриката, определяемый по результатам механических испытаний.

для случая отбортовки (раздачи) и обжима уравнение (18) принимает соответственно следующий вид [6]:

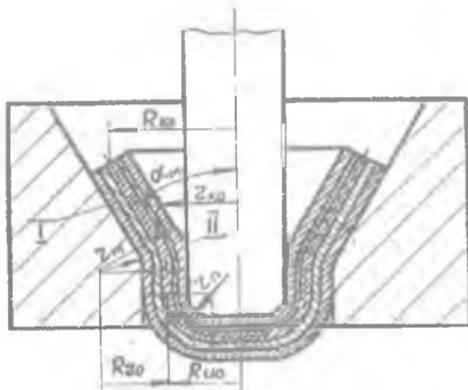
$$\sigma_{q0} = \sigma_{S0}; \quad (19)$$

$$\sigma_{q0} = -\sigma_{S0}. \quad (20)$$

Уравнения (17)-(20) позволяют получать зависимости для анализа напряженно-деформированного состояния при формообразовании многослойных деталей совместным решением, как для однослойных деталей [6].

Так, для случая вытяжки в конических матрицах (рис. 2) эти зависимости имеют следующий вид:

при свертке плоской заготовки в коническую чашку



Р и с.2. Схема вытяжки в конической матрице

$$\sigma_{p0} = \sigma_{s0}^* \ln \frac{R_{к0}}{z_0}; \quad (21)$$

$$\sigma_{a0} = \sigma_{s0}^* \left(\ln \frac{R_{к0}}{z_0} - 1 \right) \quad (22)$$

[в уравнении (21) $\sigma_{p0} = \sigma_{p0max}$ при $z_0 = z_{к0}$ (см. рис. 2)]
при свертке конической чашки в цилиндр

$$\sigma_{p0max} = \sigma_{s0}^* \left\{ \left[1 - \left(\frac{z_{к0}}{R_{к0}} \right)^{\frac{\mu_k}{2\mu_k + 1}} \right] \left(1 + \frac{t_0 \alpha_m}{\mu_k} \right) + \frac{t_0}{z_m + t_0} \right\} (1 + \mu_k \alpha_m), \quad (23)$$

где $\sigma_{s0}^* = \sigma_s \left(1 - \frac{R_{к0}}{2R_f} \frac{z_0}{2\sqrt{R_f^2 - R_{к0}^2} - \frac{z_0}{S \ln \alpha}} \right)$ — значение предела текучести с учетом упрочнения;

σ_s и μ_0 — прочностные характеристики слоистого листового полуфабриката, определяемые по результатам механических испытаний;

$z_{к0}$ — диаметр детали по ППС;

t_0 — толщина сжатой зоны на скругленной кромке пуансона.

Текущее значение усилия вытяжки выражается зависимостью

$$P = 2\pi z_{к0} S_0 \sigma_{p0max}. \quad (24)$$

Для практических целей усилие вытяжки удобно определять по формуле

$$P = 2\pi z_{к0} \sigma_{\delta 0} S_0, \quad (24a)$$

где $\sigma_{\delta 0}$ — предел прочности слоистого полуфабриката.

Деформированное состояние устанавливается из уравнения связи напряжений и деформаций, которое для случая плоского напряженного состояния слоистого листового полуфабриката имеет вид

$$\frac{\sigma_{p0}}{\sigma_{a0}} = \frac{\epsilon_{a0} - \epsilon_{п0}}{\epsilon_{p0} - \epsilon_{п0}}. \quad (25)$$

Расположение ППС в теле заготовки (z_0), необходимое для проведения анализа, определяется из условия неоднородности деформации листовой заготовки по толщине, согласно которому в сечении многослойной заготовки действует момент, вызывающий при неоднородности механических свойств слоев смещение ППС относительно ее срединной поверхности (СП) на величину ξ (рис.3).

Решая уравнение момента

$$\sum_{i=1}^{K-1} \sigma_i s_i y_i - \sum_{L=K}^{L=N} \sigma_L s_L y_L = 0 \quad (26)$$

(K - индекс слоя, содержащего ППС) и принимая за критерий напряжения σ_i предел текучести соответствующего слоя (σ_{Si}), получа-

$$\sum_{i=1}^{L=N} \sigma_{Si} s_i \left[\frac{S_D}{2} - \left(\sum_{L=i+1}^{L=N} s_{L+1} + \frac{s_i}{2} \right) \right] +$$

$$\sum_{L=1}^{L=N-1} \sigma_{SL} s_L + \sigma_{SN} \left[S_D - \left(\sum_{L=1}^{L=N-1} s_L + \right. \right.$$

$$\left. + \left(\frac{S}{2} - \sum_{L=1}^{L=N-1} s_L \right) - \sum_{L=1}^{L=N-1} \sigma_{SL} s_L \left[\frac{S_D}{2} - \left(\sum_{L=1}^{L=N-1} s_{L-1} + \frac{s_i}{2} \right) \right] \right]$$

$$+ \sum_{L=N+1}^{L=N} s_L) + \sum_{L=N+1}^{L=N} \sigma_{SL} s_L \quad (27)$$

Для двухслойного материала уравнение (27) приводится к виду

$$\xi = \frac{(\sigma_{ST} - \sigma_{SM}) S_T S_M}{2 (\sigma_{ST} S_T + \sigma_{SM} S_M)}, \quad (28)$$

где T и M - индексы для более и менее прочных слоев.

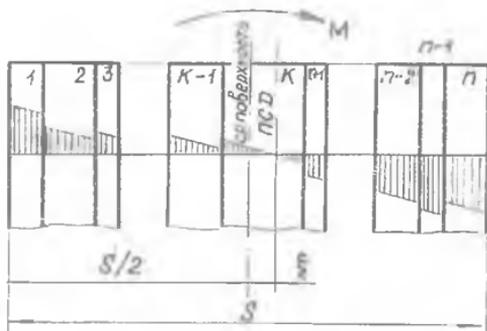
Откуда

$$z_0 = z_{CN} \pm \xi \cos \alpha \quad (29)$$

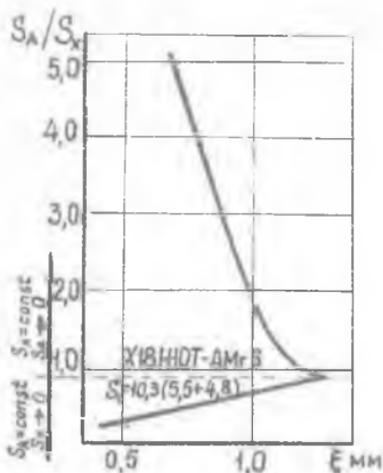
(знаки: "+" - при наружном, "-" - при внутреннем расположении более прочной части тела заготовки).

На рис. 4 показан характер зависимости величины ξ двухслойного полуфабриката I2X18N10T-AM6 от соотношения толщин слоев.

Учитывая, что расположение ППС в теле деформируемой заготовки обуславливается сопротивлением ее частей деформирующему усилию,



Р и с.3. Схема к определению величины смещения ППС (ПСА)



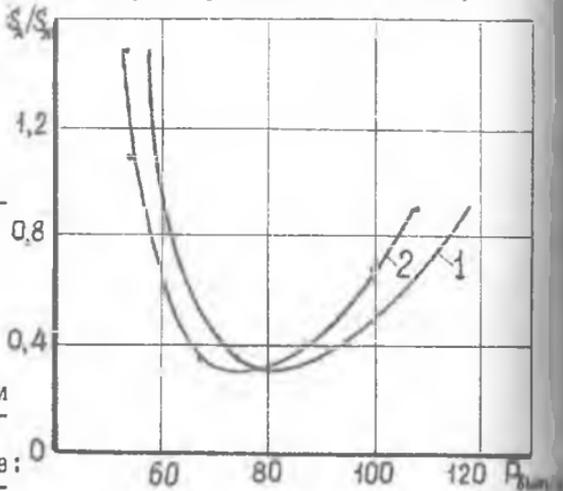
Р и с.4. Зависимость величины $\frac{S_A}{S_x}$ от соотношения толщин слоев S_A/S_x биметалла XI8IOT-AMr6

по СП ($\Delta K_{сп}$), определяется зависимостью

$$\Delta K_{сп} = \frac{2\varphi}{d_{сп} \pm 2\varphi} 100.$$

Приведенная зависимость позволяет сделать вывод о том, что расчет силовых и геометрических параметров процесса при формообразовании многослойных деталей следует производить по ПСД, а не по срединной поверхности слоистого полуфабриката и, тем более, не по срединной поверхности наружного слоя [5].

Экспериментальная проверка силовых параметров процесса (рис.5) показала



Р и с.5. Графики зависимости максимального усилия вытяжки биметалла I2XI8IOT-AMr6 от соотношения толщин слоев: 1-расчетные значения; 2-экспериментальные данные

без большой погрешности [6] можно принять, что ППС и поверхность средних деформаций ПСД, определяющая деформацию заготовки в целом, совпадают. Отсюда следует, что параметры очага деформации [см. равенство (29)] а следовательно степень деформации и силовые параметры процесса при вытяжке деталей с различным расположением слоев в одной и той же матрице ($d_M = const$) из заготовок с одинаковыми параметрами ($D_3 = const$; $S_D = S_A = const$), различные. Это различие обусловлено изменением параметров очага деформации заготовки за счет смещения ПСД относительно ее срединной поверхности. Погрешность, допускаемая при расчете степени вытяжки

что опытные данные хорошо согласуются с рассчитанными по формулам (21)-(24), (28), (29). Погрешность расчета не превышает 8-14%. Расчет степени деформации по срединной поверхности наружного слоя [5] дает погрешность примерно в 23%.

В ы в о д ы

Аналитически получены дифференциальное уравнение равновесия и уравнения пластичности для анализа формоизменения слоистых листовых полуфабрикатов.

Установлено, что процесс формообразования слоистых листовых полуфабрикатов имеет более общий характер. Общим является зависимость параметров процесса только от параметров очага деформации. Наблюдаемая зависимость параметров процесса от расположения слоев является результатом смещения ЦСД относительно СП заготовки.

Достаточная сходимость опытных и расчетных данных подтверждает достоверность решения поставленной задачи.

Л и т е р а т у р а

1. Л ю б у ш и н В.Б. Исследование процесса штамповки-вырезки толстолистовых заготовок из биметаллических стале-алюминиевых полос. "Кузнечно-штамповочное производство", 1968, № 10.
2. Ч и ч е т а И.А. Пластический изгиб плакированных металлов. Труды ХАИ, вып. 21. Харьковский государственный университет, 1961.
3. И л ь ю ш и н А.А. Пластичность. ГИТТЛ, 1948.
4. Ф р и д м а н Я.Б., М о р о з о в Е.М. Расчет механических свойств биметаллов. Известия вузов. "Машиностроение и приборостроение", 1958, № 1.
5. К о р и н а Т.М. Исследование процесса вытяжки биметалла. Автореферат диссертации, Ростов-на-Дону, 1973.
6. Основы теории обработки металлов давлением. Под ред. М.В.Сторожева. М., Машгиз, 1959.