

УДК.621.983.044

Ю.Г.Розов

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ОБЪЕМЕ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ НА НЕОДНОРОДНОСТЬ ПОЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЮ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ В ОПЕРАЦИЯХ ОБЖИМА, РАЗДАЧИ И ИХ СОВМЕЩЕНИИ

Розглянуто процес деформування попередньо нагрітої заготовки, що має природну неоднорідність теплового поля (неоднаковий розподіл температури в об'ємі заготовки), викликаним її охолодженням на повітрі та при контакті з поверхнею робочих частин штампа. Визначено вплив температури на механічні характеристики матеріалу заготовки й величину коефіцієнта тертя в процесі гарячого деформування тонкостінних виробів у реальних умовах штампування. Запропоновано принцип створення оптимального розподілу опору деформуванню у вогнищі деформації, шляхом забезпечення на стадії нагрівання заготовки попереднього неоднакового розподілу температур в об'ємі обичайки.

Введение. Анализ распространенных в современной промышленности технологических процессов листовой штамповки показывает, что каждая из формоизменяющих операций характеризуется допустимым коэффициентом [1]. С целью интенсификации процессов листовой штамповки, направленной, в конечном счете, на увеличение коэффициента формоизменения, разработаны и используются в промышленности особые способы штамповки, условия деформирования заготовки в которых отличаются от традиционных.

К таким способам можно отнести:

1. Штамповку, включающую последовательное сочетание или совмещение операций.
2. Штамповку с применением нагрева заготовки (горячая штамповка).

Цель работы: рассмотреть интенсификацию процессов листовой штамповки по второму направлению и проанализировать процесс деформирования нагретой трубной заготовки в операциях обжима и раздачи и при их совмещении с учетом влияния основных факторов, присущих реальным условиям горячей штамповки.

Промежуточное положение между горячей изотермической обработкой ($\sigma_s = \text{const}$) и штамповкой в условиях холодной деформации ($\sigma_s = f(\epsilon)$) занимает процесс деформирования предварительно нагретой заготовки, имеющей естественную неоднородность теплового поля (неодинаковое распределение температуры в объеме заготовки), вызванную ее охлаждением на воздухе и при контакте с поверхностью рабочих частей штампа. В результате возникает неодинаковое сопротивление пластической деформации металла $\sigma_s = f(\epsilon, t)$ и разделение поверхности заготовки в процессе деформирования на две зоны: контактную с инструментом (с неодинаковым распределением температуры вдоль очага деформации; $t = \text{var}$) и свободную (тепловое поле которой, с достаточной степенью точности, может быть принято однородным по всему объему зоны; $t = \text{const}$). Наиболее ярко это выражено при деформировании относительно тонкостенных заготовок.

Перепад температуры приводит не только к неоднородности механических свойств металла, но и обуславливает неравномерность действия сил трения вдоль контактной поверхности заготовки с инструментом.

На основе многочисленных экспериментов установлено, что изменение прочностных характеристик (в частности, предела прочности) с изменением температуры подчиняется экспоненциальной зависимости для металлов и сплавов, не имеющих физико-химических превращений в данном интервале температур (закон Н.С.Курнакова) [2]:

$$\sigma_{B1} = \sigma_{B2} e^{\alpha_t^{\sigma}(t_1 - t_2)}, \quad (1)$$

где σ_{B1} и σ_{B2} – временные сопротивления (пределы прочности) металла при температуре t_1 и t_2 , соответственно; α_t^{σ} – температурный коэффициент, постоянный для данного металла (сплава).

Аналогичная по своей структуре формула, выражающая зависимость коэффициента трения от температуры, получена С.И.Губкиным [3]:

$$\mu_1 = \mu_2 e^{\alpha_t^H(t_1 - t_2)}, \quad (2)$$

где μ_1 и μ_2 – коэффициенты трения при температуре t_1 и t_2 , соответственно; α_t^H – температурный коэффициент.

Для определения закона распределения температур вдоль очага деформации в процессе деформирования (**прямая задача**) воспользуемся формулой [4], выражающей тепловой баланс между теплоносителем (заготовкой) и воспринимающим теплоту телом (инструментом), согласно которой продолжительность охлаждения равна:

$$\tau_{\text{ОХЛ}} = \frac{G}{F} \frac{c}{\alpha_T} \ln \left(\frac{t_{\text{МН}} - t_{\text{ВТ}}}{t_{\text{МК}} - t_{\text{ВТ}}} \right), \quad (3)$$

где $\tau_{\text{ОХЛ}}$ – продолжительность охлаждения в часах;

$G = V\gamma$ – вес заготовки в кг;

V – объем части заготовки, контактной с инструментом (первая зона) в м^3 ;

γ – удельный вес металла заготовки в $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

F – площадь поверхности заготовки, контактной с инструментом в м^2 ;

C – средняя теплоемкость металла заготовки в $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \times \text{град}}$;

α_T – коэффициент теплоотдачи в $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \times \text{час} \times \text{град}}$, который может иметь лучистую,

конвективную и контактную составляющие;

$t_{\text{МН}}$ и $t_{\text{МК}}$ – температура металла заготовки (начальная и конечная) в $^\circ\text{C}$;

$t_{\text{ВТ}}$ – температура воспринимающего теплоту тела (в нашем случае – инструмента) в $^\circ\text{C}$.

Ввиду того, что для нашего случая:

$$V = FS;$$

$$G = FS\gamma,$$

где S – толщина заготовки, а также, введя новые обозначения для температур, получим запись формулы (3) в виде:

$$\tau_{\text{ОХЛ}} = S\gamma \frac{c}{\alpha_T} \ln \left(\frac{t_0 - t_{\text{И}}}{t_p - t_{\text{И}}} \right), \quad (3')$$

где $t_0 = t_{\text{МН}}$; $t_{\text{И}} = t_{\text{ВТ}}$; t_p – температура элемента деформированного участка заготовки радиуса ρ .

Очевидно, что интересующее нас время охлаждения $\tau_{\text{ОХЛ}}$ равно продолжительности контакта заготовки с инструментом в процессе деформирования $\tau_{\text{К}}$, т.е.:

$$\tau_{\text{ОХЛ}} = \tau_{\text{К}} = \pm \text{ctg}\alpha \frac{R_3 - \rho}{V_{\text{П}}}, \quad (4)$$

где знак “+” справедлив для операции обжима, знак “-” – для операции раздачи;

α – угол конусности рабочей части инструмента;

$V_{\text{П}}$ – скорость перемещения инструмента (скорость движения ползуна прессы, $V_{\text{П}} = V_{\text{СК}} \cos(\alpha)$,

где $V_{\text{СК}}$ – относительная скорость скольжения).

Тогда, с учетом равенства правых частей выражений (3') и (4), имеем:

– для обжима:

$$S\gamma \frac{c}{\alpha_T} \ln \left(\frac{t_0 - t_{\text{И}}}{t_p - t_{\text{И}}} \right) = \text{ctg}\alpha \frac{R_3 - \rho}{V_{\text{П}}}; \quad (5)$$

– для раздачи:

$$S\gamma \frac{c}{\alpha_T} \ln \left(\frac{t_0 - t_{\text{И}}}{t_p - t_{\text{И}}} \right) = \text{ctg}\alpha \frac{\rho - R_3}{V_{\text{П}}} \quad (6)$$

Решая равенства (5) и (6) относительно t_p , после несложных преобразований, с использованием разложения в ряд логарифмической функции, получим:

– для обжима:

$$t_p = t_0 \frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(R_3 - \rho)} ; \quad (7)$$

– для раздачи:

$$t_p = t_0 \frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(\rho - R_3)} , \quad (8)$$

где η_t – коэффициент, имеющий постоянную величину для конкретного, рассматриваемого случая штамповки и зависящий от скорости движения ползуна прессы, размеров и свойств материала заготовки и инструмента:

$$\eta_t = S\gamma \frac{c}{\alpha_t} V_{II} . \quad (9)$$

Сделав соответствующие замены и осуществив подстановки в формулы (1) и (2), а также используя упрощения, связанные с разложением в ряд экспоненциальной функции, получим:

– для обжима:

$$\sigma_{B\rho} = \sigma_{B0} e^{\alpha_t^\sigma t_0 \left(1 - \frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(R_3 - \rho)}\right)} \approx \sigma_{B0} \left[1 + \alpha_t^\sigma t_0 \left(1 - \frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(R_3 - \rho)}\right)\right] , \quad (10)$$

$$\mu_\rho = \mu_0 e^{\alpha_t^\mu t_0 \left(\frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(R_3 - \rho)} - 1\right)} \approx \mu_0 \left[1 + \alpha_t^\mu t_0 \left(\frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(R_3 - \rho)} - 1\right)\right] ; \quad (11)$$

– для раздачи:

$$\sigma_{B\rho} = \sigma_{B0} e^{\alpha_t^\sigma t_0 \left(1 - \frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(\rho - R_3)}\right)} \approx \sigma_{B0} \left[1 + \alpha_t^\sigma t_0 \left(1 - \frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(\rho - R_3)}\right)\right] , \quad (12)$$

$$\mu_\rho = \mu_0 e^{\alpha_t^\mu t_0 \left(\frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(\rho - R_3)} - 1\right)} \approx \mu_0 \left[1 + \alpha_t^\mu t_0 \left(\frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(\rho - R_3)} - 1\right)\right] , \quad (13)$$

где σ_{B0} – временное сопротивление металла в цилиндрической (неконтактной) части заготовки (во второй зоне);

μ_0 – коэффициент трения при температуре t_0 .

Так как рассматриваемые процессы достаточно кратковременны, то без большой погрешности в формулы для определения меридиональных напряжений подставим величины напряжения текучести и коэффициента трения, равные среднеарифметическим между максимальными и минимальными значениями в очаге деформации, т.е.:

– для обжима:

$$\bar{\sigma}_s = \sigma_{B0} \left[1 + \frac{\alpha_t^\sigma t_0}{2} \left(1 - \frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(R_3 - \rho)}\right)\right] , \quad (14)$$

$$\bar{\mu} = \mu_0 \left[1 + \frac{\alpha_t^\mu t_0}{2} \left(\frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(R_3 - \rho)} - 1\right)\right] ; \quad (15)$$

– для раздачи:

$$\bar{\sigma}_S = \sigma_{B0} \left[1 + \frac{\alpha_t^\sigma t_0}{2} \left(1 - \frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(\rho - R_3)} \right) \right], \quad (16)$$

$$\bar{\mu} = \mu_0 \left[1 + \frac{\alpha_t^\mu t_0}{2} \left(\frac{\eta_t}{\eta_t + \text{ctg}\alpha(\rho - R_3)} - 1 \right) \right]. \quad (17)$$

Тогда, известные формулы для определения максимальных меридиональных напряжений в очаге деформации в операциях обжима и раздачи [5], могут быть выражены в виде следующей зависимости:

$$\sigma_{\rho \max} = f(\bar{\sigma}_S, \bar{\mu}), \quad (18)$$

где величины $\bar{\sigma}_S$ и $\bar{\mu}$ определяются для обжима по формулам (14) и (15), при подстановке в них $\rho = r_0$, для раздачи – по формулам (16) и (17), при подстановке в них $\rho = R_p$, а коэффициент η_t для обеих операций определяется по формуле (9).

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что с естественным уменьшением температуры элементов заготовки вдоль очага деформации от недеформированной части к торцу в зонах обжима и раздачи, наблюдается увеличение временного сопротивления металла обечайки σ_B при одновременном снижении коэффициента трения μ , причем интенсивность увеличения σ_B выше уменьшения μ . Другими словами, с уменьшением температуры, сопротивление деформированию возрастает.

Проведенный анализ позволяет решить **обратную задачу**, связанную с созданием желаемого распределения сопротивления деформированию в очаге деформации, путем обеспечения предварительного (на стадии нагрева заготовки) неодинакового распределения температур в объеме обечайки. Для этого используем принятый закон изменения температуры вдоль очага деформации в процессе горячего деформирования, с учетом теплового баланса между отдающими и поглощающими тепло телами, выражаемый формулами (7) и (8). Очевидно, что для нашего случая поставленная задача может быть решена при выполнении условия $t = \text{const}$ вдоль очага деформации (вдоль образующей деформируемой части заготовки) в процессе деформирования, или, с учетом формул (7) и (8), при создании на стадии нагрева распределения температур по высоте заготовки, подчиняющегося закону (для обжима и раздачи):

$$t_H = t_0 \left(1 + \frac{\text{ctg}\alpha}{\eta_t} H \right), \quad (19)$$

где t_0 – температура нагрева сечения, являющегося границей между деформируемым (первая зона) и цилиндрическим (вторая зона) участками (в первом приближении его положение может быть определено при условии постоянства длины образующей заготовки в рассматриваемых процессах).

H – высота части цилиндрической заготовки, предназначенная для последующего деформирования.

При нагреве коротких заготовок для процесса деформирования с совмещением операций обжима и раздачи [6], формула (19') имеет вид:

$$t_H = t_0 \left(1 + \frac{\text{ctg}\alpha}{\eta_t} |H| \right), \quad (19')$$

где высота цилиндрической обечайки H меняется от $-H_{\text{разд}}$ до $+H_{\text{обж}}$ (см. рис.1). При $H = 0$ (ордината границы между зонами обжима и раздачи) $t_H = t_0$.

Таким образом, при обеспечении нагрева с распределением температур в объеме заготовки, выражаемым зависимостью (19) (или (19')) тепловое поле вдоль очага деформации в процессе деформирования будет однородным, в следствие чего величины напряжения текучести σ_S и коэффициента трения μ принимаются постоянными, соответствующими температуре t_0 ($\sigma_S = \sigma_{S0}; \mu = \mu_0$).

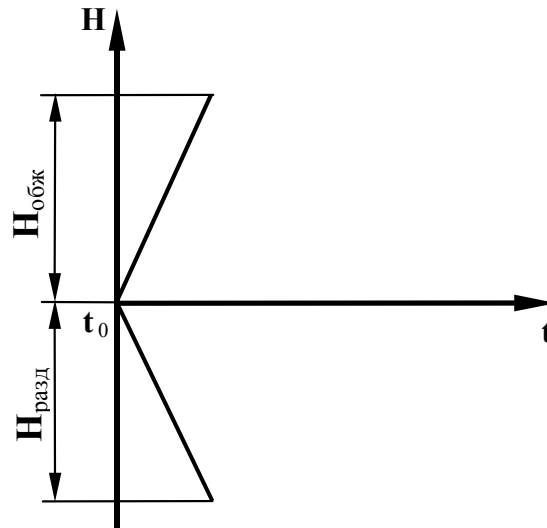


Рис.1

Придерживаясь разработанной методики, подобно графику, изображенному на рис. 1, могут быть построены диаграммы распределения температур в объеме заготовки и для других операций листовой штамповки при решении **прямой** или **обратной** задачи.

Основные выводы:

- рассмотрено влияние температуры на прочностные характеристики материала заготовки и величину коэффициента трения в процессе горячего деформирования тонкостенных изделий в реальных условиях штамповки;
- предложен закон распределения температуры вдоль очага деформации в процессе горячего деформирования заготовки, имеющей естественную неоднородность теплового поля, вызванную ее охлаждением на воздухе и при контакте с поверхностью рабочих частей штампа;
- с целью интенсификации процессов листовой штамповки, предложен принцип создания желаемого распределения сопротивления деформированию в очаге деформации, путем обеспечения на стадии нагрева заготовки предварительного неодинакового распределения температур в объеме обечайки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
3. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. – М.: Metallurgizdat, 1947. – 532 с.
4. Шмыков А.А. Справочник термиста. – М.: ГНТИ Машиностроительной литературы, 1956. – 331 с.
5. Ковка и штамповка: Справочник: в 4-х т. Т.4 Листовая штамповка / Под ред. А.Д.Матвеева; Ред совет: Е.И.Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985 – 1987. – 544 с.: ил.
6. Ильинич Д.А., Кондратенко В.Г., Евсюков С.А. И др. Штамповка поковок типа плоских колец и фланцев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – №4. – С. 6-7.

РОЗОВ Юрий Георгиевич – к.т.н., доцент, проректор по учебной работе Херсонского национального технического университета.

Научные интересы:

- разработка и исследование ресурсосберегающих технологий в области обработки металлов давлением;
- общие вопросы методологии высшего образования.