Тепловой эффект и точность в процессах штамповки**77-48211/492214**

10, октябрь 2012

Ковалев В. Г.

УДК621.983.3

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

kvs.gov@b.ru

Температурные изменения размеров деталей могут быть вызваны, как изменением температуры заготовки и инструмента вследствие тепловыделения при пластическом деформировании, так и несовпадением температуры заготовки и температуры цеха. Температурные изменения размера детали и инструмента возникают вследствие изменения линейных размеров из-за охлаждения детали и нагрева инструмента и из-за изменения механических характеристик материала заготовки при нагреве в процессе пластического деформирования.

Изменение температуры t и размера детали после пластического деформирования можно определить на основе удельной мощности деформации, механического эквивалента теплоты и коэффициента выхода тепла [1]:

$$t=20 + Q/(J\rho c), \quad (1)$$

где Q -удельная тепловая энергия, равная

$$Q = \beta \int \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

J - механический эквивалент теплоты (равный 427 ккал); c -удельная теплоемкость; ρ –удельный вес материала; σ - интенсивность напряжений пластического деформирования; ε – интенсивность деформаций; β - коэффициент выхода тепла, равный для меди - 0.92 , технического алюминия - 0.93, сплавов цветных металлов -0.75 – 0,65, для стали – 0,94 [2].

Изменение размеров детали, вызванное изменением ее температуры, после изготовления можно определить на основе закона изменения размеров тела при нагреве:

$$\Delta L = \alpha \Delta T L$$

где α - коэффициент линейного расширения штампуемого материала;

$\Delta T = \Delta T_{\text{д}} + \Delta T_{\text{з}}$ - изменение температуры детали после ее изготовления;

$\Delta T_{\text{д}}$ - изменение температуры, вызванные пластическим деформированием;

$\Delta T_{\text{з}} = \Delta T + \Delta T_{\text{ц}}$ температурное изменение детали, вызванное несопадением температуры заготовки $\Delta T_{\text{з}}$ и температуры $\Delta T_{\text{ц}}$ (детали) цеха,

L - линейный размер детали.

Температурные изменения механических характеристик материала в процессах пластического деформирования, экспериментальные данные о которых приведены в работах [3] и [4], можно представить на основе метода выравнивания [5] в виде экспоненциальной зависимости от температуры:

$$\sigma_t = \sigma_B \cdot e^{at}, \quad n_t = n \cdot e^{bt}, \quad E_t = E \cdot e^{ct}, \quad \nu_t = \nu \cdot e^{dt}, \quad (4), (5), (6), (7)$$

где

σ_B, n, E, ν - предел прочности, показатель упрочнения, модуль упругости первого рода и коэффициент Пуассона при температуре 20°C (температуре цеха);

a, b, c, d - расчетные коэффициенты, определяемые по действительным кривым температурного изменения заданного параметра материала детали [3] и [4] или инструмента методом выравнивания, соответственно равные для стали 12X18H9: -0,0008, -0,00131, -0,00058 и 0,00046.

Используем эти данные для определения точности при вытяжке с утонением и проталкиванием. Не вникая подробно в особенности вывода основных соотношений для определения напряженно-деформированного состояния (это изложено ранее), приведем основные соотношения и их особенности; обусловленные температурным эффектом:

— Деформация разгрузки, определяющая изменение поперечного сечения размера детали, равна:

$$\varepsilon_{\varphi} = -(0,5 - \nu) \cdot (\sigma_z - \sigma_{\theta}) / E \quad (8)$$

где

$$\sigma_z = \sigma_s \cdot \left\{ \ln \frac{S_0}{S} - a - \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \mu \cdot \alpha \cdot \left[1 - 0,5 \cdot \left(\ln \frac{S_0}{S} - a \right) \cdot \left(1 - \frac{S}{S_0} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

$$\sigma_s = \sigma_z - 1,15\sigma \quad \sigma_s = \sigma_B \left(\frac{e}{n} \cdot \ln \varepsilon \right) \quad (10)$$

$$\frac{\alpha}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \sqrt{2\mu \left[2 - 0,5 \left(\ln \frac{S_0}{S} - a \right) \left(1 - \frac{S}{S_0} \right) \right]} \quad (11)$$

При коэффициенте запаса пластичности в процессе деформирования, равном $b = b = \sigma_z / \sigma_s = 0$, получаем

$$a_{\min} = \frac{-b + \ln \frac{S_0}{S} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + \frac{\mu}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{2} \ln \frac{S_0}{S} \right) \left(1 - \frac{S}{S_0} \right)}{1 - \frac{\mu}{2\alpha} \left(1 - \frac{S}{S_0} \right)}, \quad (12)$$

a - относительная величина напряжения проталкивания, ограничиваемая потерей устойчивости заготовки. Предельная величина напряжения проталкивания, ограничиваемая потерей устойчивости при упругом деформировании при $l > d$:

$$\sigma_{\text{кр}}^y = E \left[1 - \left(1 - \frac{S}{D} \right)^2 \right] \left[\pi D (8\mu_{\text{кр}} l) \right]^2 \quad (13)$$

При пластическом деформировании:

$$\sigma_{\text{кр}}^y \leq \sigma_{\text{ПЦ}} \quad (14)$$

где $\sigma_{\text{ПЦ}}$ - предел пропорциональности; S - толщина трубчатой части вытянутой заготовки с наружным диаметром D ; l - длина проталкиваемой части заготовки; $\mu_{\text{кр}}$ - коэффициент приведения длины заготовки, определяемый схемой закрепления, принимаемый в нашем случае равным 1. Коэффициент a

- при упругой потере устойчивости равен:

$$a_y = \sigma_{\text{кр}}^y : \sigma_s \quad (15)$$

- при пластической потере устойчивости

$$\Delta d = \left(\varepsilon_{\varphi}^{\text{нб}} - \varepsilon_{\varphi}^{\text{нм}} \right) d \quad (16)$$

Так как радиальные сжимающие пуансон напряжения после вытяжки перед съёмом изделия с

пуансона невелики, то можно принять наличие полной его разгрузки, а деформацию разгрузки равной:

$$\varepsilon_n = -[\chi(1-\nu_n)\sigma_\theta - \nu_n\sigma_{\text{нц}}]: E \quad (17)$$

где ν_n и E_n - коэффициент Пуассона и модуль упругости первого рода пуансона;

$\sigma_{\text{нц}} = 4\sigma_z S/d$ – среднее осевое напряжение сжатия пуансона; χ - коэффициент относительной длины нагруженного участка рабочей поверхности пуансона.

Расчеты показывают, что при разгрузке в этом и подобных процессах происходит только упругое деформирование детали, а деформация разгрузки детали после снятия её с пуансона равна:

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\varphi \quad (18)$$

Фактический размер пуансона в процессе работы из-за его сжатия радиальными (и осевыми сжимающими) напряжениями меньше, а размер матрицы из-за растяжения больше номинального размера в ненагруженном состоянии:

$$\begin{aligned} d_\phi &= (1 - \varepsilon_{\text{id}})d, \\ D_\phi &= (1 + \varepsilon_{\text{id}})D \end{aligned} \quad (19,20)$$

После съёма с пуансона, разгрузки и охлаждения поперечные внутренние и наружные размеры детали равны

$$D_{\text{нр}} = (1 - \varepsilon_{\text{i}\varphi})(1 - \varepsilon_{\text{im}}) \quad (21)$$

$$D_{\text{нр}} = (1 - \varepsilon_{\text{i}\varphi})(1 - \varepsilon_{\text{im}}), \quad (22)$$

Поперечные размеры пуансона и матрицы, необходимые для изготовления изделия с заданным внутренним и наружным диаметром в условиях установившегося процесса деформирования с учетом ранее полученных выражений определяются со отношениями:

$$d_n = d / [(1 - \varepsilon_\varphi)(1 - \varepsilon_n)(1 - \varepsilon_{\text{id}})(1 - \varepsilon_{\text{i}\varphi})] \quad (23)$$

$$D_m = D / [(1 - \varepsilon_\varphi)(1 - \varepsilon_n)(1 - \varepsilon_{\text{id}})(1 - \varepsilon_{\text{i}\varphi})] \quad (24)$$

Случайные погрешности, определяемые рассеиванием механических характеристик штампуемого материала и другими параметрами при установившемся процессе деформирования, могут быть определены на основе интервалов рассеивания этих параметров или опытным путем. Для сокращения объёма вычислительных работ при определении деформации разгрузки расчётно-

аналитическим методом составим таблицу-матрицу экстремального влияния сочетания исследуемых параметров на величину деформации разгрузки (табл.1) в соответствии с выражением (8).

Таблица 1

ε_{φ}	E		v		μ		n	
	нб	нм	нб	нм	нб	нм	нб	нм
		+	+		+		+	
$\varepsilon_{\varphi}^{нм}$	+			+		+		+

С учётом представленного рассеивания поперечных размеров изделия при установившемся процессе деформирования может быть определено по выражению:

$$\Delta d = \left(\frac{\varepsilon_{\varphi}^{нб} + \varepsilon_{\varphi}^{нм}}{2} \pm \frac{\varepsilon_{\varphi}^{нб} - \varepsilon_{\varphi}^{нм}}{2} \right) d \quad (25)$$

при учёте всех факторов, влияющих на размеры, это выражение позволяет определить точность при вытяжке с утонением и проталкиванием.

Если при некоторой степени утонения правая часть выражения (25) равна нулю, то эту степень утонения в процессе деформирования будем считать оптимальным, потому в этом случае получаем минимальное значение рассеивания деформации разгрузки и размеров, а также отклонение размеров детали от размеров инструмента равно нулю или близкой к этому значению. Будем считать это первым способом оптимизации. Однако более общим и универсальным является случай, при котором рассеивание размеров равно нулю, а один из членов разности в выражении (25) не равен нулю. В таком случае имеет место систематическая погрешность. Если исключить эту систематическую погрешность детали путём корректирования инструмента на её величину, то таким образом мы получим наиболее общий случай достижения предельной точности – второй способ оптимизации процесса.

Для получения конкретных данных разработан алгоритм вычислений, выбран материал - сталь 12X18H9, у которой следующие интервалы изменения механических характеристик: $E=188000...245000$ МПа, $v = 0,27$, $n = 0,49$ $\sigma = 620...550$ МПа, $\mu = 0,05...0,15$.

Во всех представленных соотношениях, используемых для определения точности, и в том числе даже для определения угла конусности матрицы (пуансона) при пластическом деформировании, можно установить не только прямое, но и косвенное влияние температурного эффекта, окружного и осевого растягивающего напряжений, на деформацию разгрузки, размеры пуансона и матрицы, рассеивание размеров детали.

Как показали расчеты (выполнены с помощью вычислительной системы Mathcad13) при совместной разгрузке инструмента и детали не происходит в большинстве случаев пластического деформирования детали, поэтому можно степени для выявления степени влияния теплового эффекта использовать выражения (8), (18),(23), (24) и (25), хотя и обязательно, для определения точности размеров детали с учетом теплового эффекта, однако, более наглядно для этой цели выражение (18), а также выражение (8).

Для ориентировочной числовой оценки теплового эффекта определим его влияние при степени утонения (S_0/S) равной 1,5 и 4,2; деформация разгрузки в первом случае по сравнению с деформацией разгрузки без учета теплового эффекта уменьшается на величину около 7 %, во втором случае -24 %, температурная деформация увеличивается соответственно на 58 % и 205 %. Следовательно, тепловой эффект необходимо учитывать даже в процессах холодного пластического деформирования не только при значительных, но и при малых степенях утонения особенно при определении точности размеров деталей, так как пренебрежение им приведет к значительным отклонения действительных размеров деталей от расчетных.

Результаты расчётов с учетом теплового эффекта (изменения механических свойств материала и деформации размеров детали) приведены в таблице 2

На основе представленных выражений и результатов расчета отметим характерные особенности образования размеров и точности:

1- увеличение коэффициента проталкивания увеличивает абсолютные величины систематических и случайных погрешностей при заданной степени утонения;

2 -точность поперечных размеров изделий уменьшается с увеличением коэффициента проталкивания при заданной степени утонения;

3- предельное относительное отклонение размеров деталей при предельной степени утонения не превышает определенной величины.

По сравнению с процессом вытяжки с утонением ($a=0$) вытяжка с утонением и проталкиванием обеспечивает получение поперечных размеров деталей меньшей точности из-за большей величины случайных погрешностей, как при проектировании инструмента по общепринятой методике, так и при использовании инструмента с корректировкой его размеров на величину систематических погрешностей. Кроме того при заданном напряжении проталкивания деформация разгрузки в зависимости от степени утонения изменяется от положительных до отрицательных значений- нулевая деформация разгрузки детали (систематическая погрешность равна нулю) с увеличением напряжения проталкивания смещается в сторону больших степеней утонения. При больших

Инженерный вестник

коэффициентах проталкивания интервал изменения деформации разгрузки несколько увеличивается, однако, всегда меньше возможного предела упругости деформирования детали σ_{θ}/E . С увеличением коэффициента трения деформация разгрузки детали увеличивается, так как увеличиваются напряжения пластического деформирования.

Температура и температурная деформация увеличиваются почти прямо пропорционально увеличению степени утонения,

Оценим величину отклонений размеров деталей от размеров инструмента. Для этой оценки возьмем данные, определяющие деформации разгрузки при $a=0;0,4$ и $0,6$ при $\mu=0,15$ и соответственно степени утонения 1,2 и 1,7; 1,2 и 2,2; 1,7 и 2,7. В таблице 2 представлены результаты оценки точности полученных отклонений размеров (в квалитетах) с учетом исключения упругих и температурных изменений размеров деталей. Приведенные в таблице 2 данные должны быть скорректированы на величину допустимого износа инструмента (ориентировочно можно считать: 0,006...0,004 мм износа соответствуют изготовлению 1000 штук деталей). Следовательно, с учетом возможного рассеивания размеров деталей и износом инструмента в допустимых

Таблица 2

a	So/S	Диаметр							
		6	10	30	50	80	120	250	500
0	1,2	01	0	2	3	3	4	5	6
	1,7	4	5	6	5	8	8	9	10
0,4	1,2	3	5	6	7	7	8	9	10
	2,2	5	5	7	8	9	9	10	11
0,8	1,7	3	4	5	6	7	7	8	9
	2,7	4	4	7	9	9	9	10	11

пределах данные таблицы должны быть скорректированы в сторону уменьшения точности на 1...3 квалитета, т.е. получим точность деталей после вытяжки с утонением в пределах 5...9 квалитетов для диаметров до 50...80 мм.

Можно сделать также важные для технологии выводы: в том случае, когда требуемая точность изготавливаемых деталей не выше обычных значений, то при исключении систематических погрешностей, возможно расширение поля допуска на износ инструмента, что позволит получить без дополнительных затрат тысячи-десятки тысяч деталей, т.е. повысить стойкость инструмента.

Закключение. 1. Тепловой эффект оказывает значительное влияние на размеры деталей. Это влияние возникает не только в связи с уменьшением после пластического деформирования температуры детали, но и через уменьшение напряжения течения, окружные и радиальные напряжения деформирования заготовки и инструмента.

2. Количественно суммарное влияние теплового эффекта в значительной мере зависит от степени утонения материала; при степенях утонения 1,5 и менее деформация изменения размера менее 50% упругой деформации по сравнению с деформацией разгрузки без учета теплового эффекта, при предельных деформациях вытяжки с утонением и проталкиванием (около 4) такое изменение деформации уже составляет около 200% при небольшом коэффициенте трения (0,05), а при больших коэффициентах трения эти числовые значения существенно возрастают

3. Приведены формулы для расчета рабочих размеров исполнительных элементов штампа с целью получения наиболее точных деталей; эти формулы учитывают температурные деформации детали и инструмента, деформацию инструмента, при изготовлении детали и деформацию разгрузки детали с учетом изменения механических свойств штампуемого материала.

Список Литературы

1. Томсен Э., Янг Чю, Кобаяши Ш. Механика пластического деформаций при обработке мегаллов. –М.: Машиностроение,1968.-504 с.
2. Яловой Н.И., Тылкин М.А., Полухин П.И. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением.- М.: Высшая школа, 1973 - 631 с.
3. Третьяков А.В., Зюзин В.Е Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением—М.: Металлургия,1973 - 224 с.
- 4.Полухин П.И., Гун Г.Я. Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. - М.: Мегаллургия,1976.-448 с.
3. Бронштейн И, А., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов.- М.: Наука,1980. – 976 с.