



Параметры интенсивного упрочнения металла вокруг отверстия в профилях из алюминия

Инженерным методом проведен теоретический анализ формообразования отверстий в листовых заготовках и профилях. Получены аналитические зависимости для определения напряжений и усилия при формообразовании отверстий в листовых заготовках и профилях. Учтено трение и упрочнение материала заготовки. Методом конечных элементов проведен численный эксперимент процесса получения отверстий в листовых заготовках и профилях. Сравнение результатов расчетов, проведенных двумя методами, показало возможность использования полученных зависимостей для проектирования процессов получения отверстий в листовых заготовках и профилях. Рассчитанные параметры позволили спроектировать штамповую оснастку для реализации нового способа упрочнения металла вокруг отверстий. Ил. 5. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: упрочнение отверстий, инженерный метод, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов

Theoretical analysis of holes formation in sheet stock materials and profiles is carried out with the help of engineering approach. Analytical dependences for determination of stress and force during formation of holes in sheet stock materials and profiles are obtained. Numerical experiment of process of creation of holes in sheet stock materials and profiles is fulfilled with the help of finite elements method. Comparison of calculation results, fulfilled by two means, showed the possibility of usage of gained dependences for modelling of processes of holes creation in sheet stock materials and profiles. The counted parameters allowed to design die tooling for implementation of a new mode of a metal hardening round the holes.

Keywords: hardening of holes, engineering method, stress-strain state, method of finite elements

Введение

Для повышения надежности и долговечности металлических конструкций, которые составлены из алюминиевых профилей или профилей с другими изделиями и соединены между собой заклепками или винтами, используют предварительную операцию упрочнения металла вокруг отверстий холодной пластической деформацией. При получении отверстий в профилях пробивкой или обработкой резанием поверхностные слои металла вокруг отверстий имеют механические дефекты, для удаления которых необходима дополнительная операция механической обработки. Дальнейшее упрочнение металла проводят одноразовым или многократным дорнованием с различным натягом деформирующего инструмента [1, 2]. Дорнование позволяет упрочнять металл вокруг отверстия на глубине всего нескольких миллиметров в профиле и приводит к образованию заусенцев. Другой известный способ упрочнения металла – это выдавливание концентрических канавок вокруг отверстий. Однако такой способ требует больших усилий деформирования и приводит к образованию впадин на поверхностях профиля. Приведенные способы упрочнения требуют предварительного образования отверстий, что связано с расходом металла. В работе [3] показана возможность интенсивного упрочнения металла вокруг отверстий в листовых заготовках из малоуглеродистой стали с использованием операций холодной объемной штамповки.

При участии автора разработан новый способ интенсивного упрочнения металла вокруг отверстий в листовых заготовках и профилях [4]. Сущность способа, в отличие от предыдущих, состоит в том, что предварительное отверстие в профиле получают не обработкой резанием или пробивкой, а холодным выдавливанием двумя пуансонами с образованием перемычки. При этом на поверхностях профиля образуются выступы, а очаг деформации с упрочненным металлом распространяется на глубину, которая значительно превышает диаметр отверстия. На второй операции происходит пробивка перемычки. Третья операция включает осадку выступов. При этом объем металла выступов заполняет зазор между оправкой и отверстием с обеспечением необходимого диаметра отверстия и происходит дополнительное упрочнение. Кроме интенсивного упрочнения имеет место экономия металла до 70 % при образовании одного отверстия.

Для реализации способа на практике и проектирования штамповой оснастки необходимо иметь аналитические зависимости для определения параметров, особенно процесса формообразования отверстий двумя пуансонами, при котором возникают существенные удельные усилия.

Цель работы

Целью работы является получение инженерным методом аналитических зависимостей для определения параметров формообразования отверстий выдавливанием двумя пуансонами, проверка адекватности решения численным экспериментом и проектирование штамповой оснастки.

Результаты исследований

Теоретический анализ выполнен методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия с приближенным условием пластичности. Металл считался изотропным с упрочнением. Расчетная схема приведена на рис. 1.

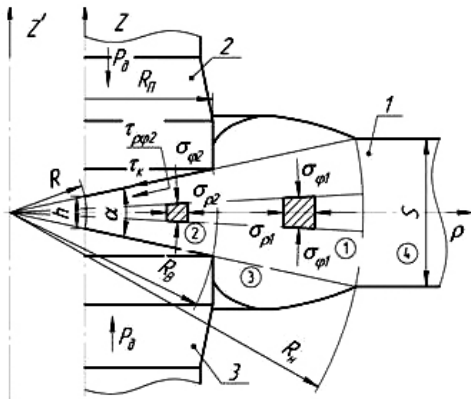


Рис. 1. Расчетная схема формообразования отверстия в профиле 1 двумя пуансонами 2 и 3

В силу симметрии приведена половина заготовки 1 толщиной S, которая деформируется пуансонами 2 и 3 радиусами R_n с образованием перемычки высотой h. Пуансоны имеют конические торцы с углом α/2 при основании. Выделяем дополнительную ось z' и очаг деформации с разделением его на два объема: 1 объем ограничен радиусами R_θ и R_n, 2 – радиусами R и R_g. Соответственно в этих объемах действуют сжимающие напряжения σ_{ρ1}, σ_{φ1}, σ_{θ1} и σ_{ρ2}, σ_{φ2}, σ_{θ2}. В 3 и 4 объемах металл не деформируется. На контактных поверхностях в объеме 2 действуют касательные напряжения τ_κ = μσ_{φ2} (μ – коэффициент трения), в объеме 1 этими напряжениями пренебрегаем. Для анализа используем сферические координаты. Первое дифференциальное уравнение равновесия имеет вид

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\phi}}{\partial \phi} + \frac{1}{\rho} [2\sigma_\rho - (\sigma_\phi + \sigma_\theta) + \tau_{\rho\phi} \cdot \text{ctg}\phi] = 0. \quad (1)$$

Из-за малости угла - φ - ctgφ ≈ 1/φ. Распределение касательных напряжений берем в виде τ_{ρφ} = τ_κ (2φ / α). Для 1 и 2 объемов делаем допущение, что напряжения σ_φ ≈ σ_θ. Тогда уравнение 1 будет в обычных производных

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{4\tau_\kappa}{\alpha\rho} + \frac{2(\sigma_\rho - \sigma_\phi)}{\rho} = 0. \quad (2)$$

Начинаем с анализа 1 объема. Уравнение равновесия, с учетом пренебрежения касательными напряжениями, имеет вид

$$\frac{d\sigma_{\rho_1}}{d\rho} + \frac{2(\sigma_{\rho_1} - \sigma_{\phi_1})}{\rho} = 0. \quad (3)$$

Записываем приближенное условие пластичности

$$\sigma_{\rho_1} - \sigma_{\phi_1} = -\sigma_s. \quad (4)$$

После подстановки условия (4) в (3), интегрирования и определения произвольной постоянной (при ρ = R_n напряжение σ_{ρ1} = 0) имеем

$$\sigma_{\rho_1} = -2\sigma_s \ln \frac{R_n}{\rho}. \quad (5)$$

Наибольшее значение по абсолютной величине напряжения σ_{ρ1} будет при ρ = R_g

$$\sigma_{\rho_1}^{\max} = -2\sigma_s \ln \frac{R_n}{R_g}. \quad (6)$$

Переходим до анализа 2 объема. Используем уравнения равновесия (1) и τ_r = μσ_{φ2}:

$$\frac{d\sigma_{\rho_2}}{d\rho} + \frac{4\mu\sigma_{\phi_2}}{\rho\alpha} + \frac{2(\sigma_{\rho_2} - \sigma_{\phi_2})}{\rho} = 0 \quad (7)$$

Приближенное условие пластичности для 2 объема (с учетом, что |σ_{φ2}| > |σ_{ρ2}|):

$$\sigma_{\rho_2} - \sigma_{\phi_2} = \sigma_s \quad (8)$$

После подстановки (8) в (7), замены во втором слагаемом в формуле (7) σ_{φ2} на σ_{ρ2} из (8), интегрирования и определения произвольной постоянной (при ρ = R_g напряжение σ_{ρ2} = σ_{ρ1}^{max}) имеем

$$\sigma_{\rho_2} = -\sigma_s \left[\left(2 \ln \frac{R_n}{R_g} - \frac{\alpha}{2\mu} + 1 \right) \left(\frac{R_g}{\rho} \right)^{\frac{\alpha}{4\mu}} + \frac{\alpha}{2\mu} - 1 \right]. \quad (9)$$

Из уравнения (9) определяем напряжение σ_{φ2}

$$\sigma_{\phi_2} = -\sigma_s \left[\left(2 \ln \frac{R_n}{R_g} - \frac{\alpha}{2\mu} + 1 \right) \left(\frac{R_g}{\rho} \right)^{\frac{\alpha}{4\mu}} + \frac{\alpha}{2\mu} \right]. \quad (10)$$

Напряжение σ_{φ2} в (10) зависит от радиуса ρ. Для упрощения дальнейшего решения вычислим среднее значение σ_{φ2}^{cp}:

$$\sigma_{\phi_2}^{cp} = \frac{\sigma_{\phi_2, \text{при } \rho=R} + \sigma_{\phi_2, \text{при } \rho=R_g}}{2}.$$

Тогда

$$\sigma_{\phi_2}^{cp} = -\sigma_s \left[\left(\ln \frac{R_n}{R_g} - \frac{\alpha}{4\mu} + \frac{1}{2} \right) \left[1 + \left(\frac{R_g}{R} \right)^{\frac{\alpha}{4\mu}} \right] + \frac{\alpha}{2\mu} \right]. \quad (11)$$

Усилие выдавливания находим по выражению

$$P_g = \left| \sigma_{\phi_2}^{cp} \right| \cdot F_\kappa / \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (12)$$

ПРОИЗВОДСТВО ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

где $F_k = \pi \cdot R_n^2 / \cos \frac{\alpha}{2}$ – площадь боковой поверхности конуса.

После подстановки в (12) выражения для $\sigma_{\varphi_2}^{cp}$, получаем

$$P_g = 3,14 \sigma_s R_n^2 \left\{ \left[\ln \frac{R_n}{R_g} - \frac{\alpha}{4\mu} + \frac{1}{2} \right] \left[1 + \left(\frac{R_g}{R} \right)^{\frac{\alpha}{4\mu}} \right] + \frac{\alpha}{2\mu} \right\} / \cos^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (13)$$

Формулу (13) можно упростить, если записать

$$\left(\frac{R_g}{R} \right)^{\frac{\alpha}{4\mu}} = \exp \left[(\alpha / 4\mu) \ln (R_g / R) \right] \approx 1 - (\alpha / 4\mu) \ln (R_g / R).$$

Тогда конечная формула для определения усилия имеет вид

$$P_g = 3,14 \sigma_s R_n^2 \left[\left(\ln \frac{R_n}{R_g} - \frac{\alpha}{4\mu} + \frac{1}{2} \right) \left(2 - \frac{\alpha}{4\mu} \ln \frac{R_g}{R} \right) + \frac{\alpha}{2\mu} \right] / \cos^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (14)$$

Радиусы R_g, R_n, R можно выразить через размеры исходной и сформированной заготовки и пуансона (см. рис. 1)

$$R = \frac{h}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \approx \frac{h}{\alpha}; \quad R_g = R + \frac{R_n}{\cos \frac{\alpha}{2}} \approx \frac{h}{\alpha} + R_n; \quad R_n = \frac{S}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \approx \frac{S}{\alpha}.$$

При выводе выражений для напряжений и усилия не учтено упрочнение металла при выдавливании. Для учета упрочнения используем известную аппроксимацию кривой упрочнения [5]

$$\sigma_s = \frac{\sigma_g}{1 - \psi_{ш}} \left(\frac{\psi}{\psi_{ш}} \right)^{1 - \psi_{ш}}, \quad (15)$$

где σ_g – предел прочности, ψ – относительное утонение при испытании на растяжение, $\psi_{ш}$ – относительное утонение в момент образования шейки на образце. Определим среднее значение σ_{cp} в очаге деформации. В качестве деформаций ψ^{cp} в 1 объеме при выдавливании берем отношение разности высот исходной заготовки S и среднего значения высоты сформированной заготовки S^{cp} под пуансоном до высоты исходной заготовки S . По схеме (см. рис. 1) получаем

$$S^{cp} = h + \frac{2R_n \tan \frac{\alpha}{2}}{2} \approx h + \frac{R_n \alpha}{2}. \quad (16)$$

Тогда

$$\psi^{cp} = \frac{S - S^{cp}}{S} = \frac{S - h - 0,5R_n \alpha}{S}. \quad (17)$$

Теперь формула для расчета σ_s^{cp} , с учетом (17), имеет вид

$$\sigma_s^{cp} = \frac{\sigma_g}{1 - \psi_{ш}} \left(\frac{S - h - 0,5R_n \alpha}{S \psi_{ш}} \right)^{1 - \psi_{ш}}. \quad (18)$$

Для проверки результатов решения инженерным методом (ИМ) был проведен численный эксперимент.

С использованием метода конечных элементов (МКЭ) и программы DEFORM выполнено моделирование операций интенсивного упрочнения металла

вокруг отверстия в алюминиевом профиле толщиной 5 мм (условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 40$ МПа). Определены энергосиловые режимы деформирования, форма и размеры сформированного профиля, напряженно-деформированное состояние по операциям с учетом технологической наследственности. Форма сформированного профиля после выдавливания, на завершающей стадии пробивки перемычки и осадки приведены на рис. 2а, а размеры при формообразовании отверстия выдавливанием двумя пуансонами диаметром 10 мм – на рис. 2б. Объем металла, который вытесняется пуансонами, приводит до образования выступов на поверхностях профиля, толщина профиля увеличивается до 7,4 мм. Выступы заканчиваются на радиусе $R = 20$ мм.

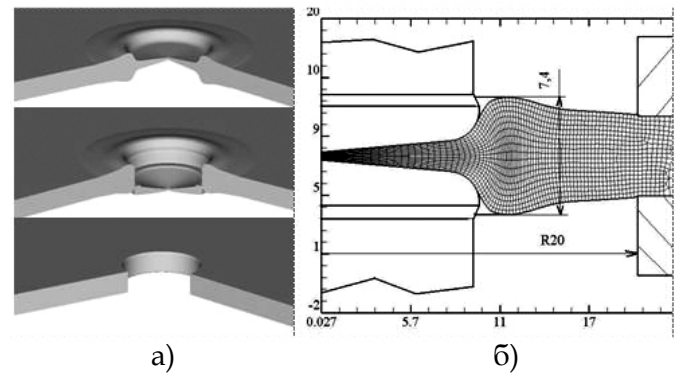


Рис. 2. Формы в разрезе сформированного профиля по операциям (а) и размеры в миллиметрах после выдавливания (б)

Силовые режимы операции выдавливания показаны на рис. 3. Зависимости усилия выдавливания от перемещения пуансона, полученные по МКЭ и ИМ по формуле (14), приведены на рис. 3а. Максимальная величина усилия по МКЭ в конце процесса выдавливания составила 94 кН. Расхождение результатов составило 11%. Сравнительные данные МКЭ и ИМ (формула 10) по распределению нормальных напряжений показаны на рис. 3б. Результаты по ИМ немного отличаются от данных МКЭ, однако среднее значение практически одинаковы, что достаточно для инженерных расчетов усилия выдавливания. Установлено, что операции пробивки перемычки и осадки выступов выполняются при усилиях 15 кН и 400 кН.

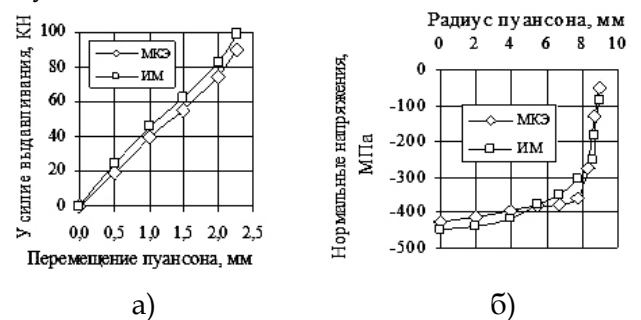


Рис. 3. Зависимость усилия выдавливания от перемещения пуансона (а) и распределение нормальных напряжений по радиусу пуансона (б)

Моделирование МКЭ позволяет прогнозировать проработку холодной пластической деформацией структуры металла и упрочнение, которые соответственно можно оценить по распределениям интенсивности деформаций ϵ_i и интенсивности напряжений σ_i . На рис. 4 приведены распределения в профиле ϵ_i и σ_i после выдавливания двумя пуансонами и итоговую величину σ_i , которая получена после осадки выступов. Интенсивная проработка имеет место в слоях металла вблизи отверстия (рис. 4а). При этом очаг деформации распространяется в профиле на величину 21 мм (рис. 4б). После осадки выступов плитами с оправкой и образованием конечного диаметра отверстия 8,5 мм металл получает дополнительное упрочнение с достижением значений $\sigma_s = 140$ МПа вблизи отверстия, а очаг деформации увеличивается до длины $L = 29$ мм.

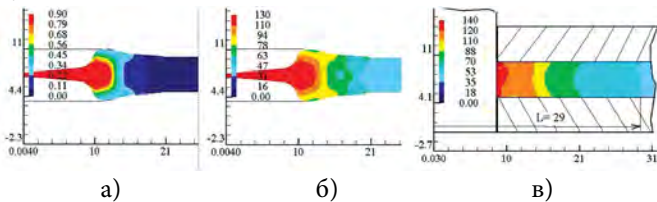


Рис. 4. Распределение интенсивности деформаций ϵ_i (а) и интенсивности напряжений σ_i в МПа (б) после выдавливания и итоговое распределение σ_i после осадки выступов. Размеры по осям в миллиметрах

Расчитанные параметры позволили спроектировать штамповую оснастку для реализации нового способа упрочнения металла вокруг отверстий на практике в уголкового алюминиевом профиле, размерами 26x60 мм толщиной 5 мм. Отверстия расположены с шагом 60 мм на полке шириной 60 мм.

На рис. 5 показана конструкция спроектированного штампа последовательного действия. Принцип действия штампа состоит в следующем.

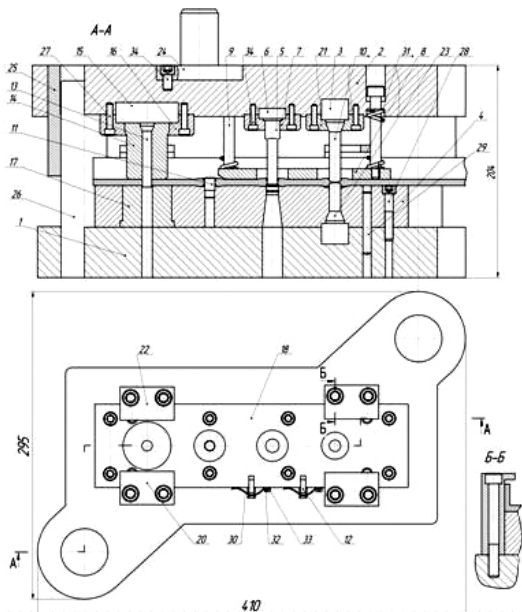


Рис. 5. Конструкция штампа для интенсивного упрочнения металла в алюминиевом профиле

Сначала профиль подают до первого временного упора 12 на позицию формообразования отверстия выдавливанием пуансонами 10 и 23. Далее профиль перемещают до второго временного упора на позицию пробивки перемычки пуансоном 5. При этом пробивается перемычка и происходит образование второго отверстия. После пробивки перемычки профиль фиксируют на ловителе 11. За следующий ход прессы пробивается перемычка во втором отверстии и образуется третье отверстие. Далее профиль подают на позицию осадки выступов пуансоном 14 с оправкой 15 на вставке 17. При этом профиль фиксируют на втором отверстии, а конечные размеры отверстия определяются диаметром оправки 15. При осадке одновременно пробивается перемычка и образуется очередное отверстие.

Выводы

1. Приведен новый способ интенсивного упрочнения металла вокруг отверстий в профилях, который включает операции образования отверстий выдавливанием двумя пуансонами с получением перемычки и выступов на поверхностях профиля, пробивки перемычки и осадки выступов с получением конечных размеров изделий. Способ обеспечивает интенсивное упрочнение металла и увеличение очага деформации вокруг отверстия.

2. Для операции выдавливания инженерным методом получены зависимости для определения напряжений на контактных поверхностях и усилия деформирования.

3. Методом конечных элементов проведен численный эксперимент по определению параметров операций интенсивного упрочнения металла вокруг отверстий в алюминиевом профиле. Для операции выдавливания проведено сравнение данных по МКЭ и инженерному методу, что позволяет рекомендовать аналитические зависимости для инженерных расчетов параметров выдавливания.

4. На основании расчетных данных разработана конструкция штампа для использования нового способа при упрочнении отверстий в алюминиевых профилях.

Библиографический список

1. Проскураков Ю. Г. Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 320 с.
2. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг. – К.: Наукова думка, 1990. – 223 с.
3. Расчетный анализ ресурсосберегающей технологии интенсивного упрочнения металлов в профилях и листовых заготовках / В. Л. Каложный, И. В. Выхованец, М. С. Николенко. Вестник НТУ «ХПИ» 45'2011, Харьков. – С. 124-13.
4. Пат. 74665 Украина, МПК(2012) В24 В 39/02 Способ интенсивного деформационного упрочнения / А. В. Каложный, М. И. Бобыр, В. Л. Каложный и др. Заявл. 26.03.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.
5. Теория пластических деформаций металлов / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров и др.; Под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.

Поступила 25.06.2013