

руемого материала (слева от кривой). Область справа от кривой в пределах скоростей охлаждения $10^1 \dots 10^2$ К/с относится к процессам деформации кристаллизующегося металла (тиксотропная штамповка). Скорости охлаждения до 10^5 К/с характерны для процессов так называемой «импульсной объемной штамповки».

Верхняя часть карты (скорости охлаждения до 10^{11} К/с) относится к процессам аморфизации. Три линии со штриховкой показывают критические режимы аморфизации чистых металлов, нормально аморфизирующихся двойных сплавов и легко аморфизирующихся многокомпонентных (так называемых объемных аморфных) сплавов. Последние, как показывают современные исследования, проявляют наивысший уровень прочностных свойств и являются объектами нанотехнологий.

Представленная термокинетическая карта процессов деформации металлических материа-

лов является удобной основой для изучения определенных реологических параметров при деформации различных металлических материалов и формирования соответствующих баз данных ВС о реологических свойствах материалов для компьютерного моделирования процессов ОМД.

Заключение

Основные реологические модели, связанные с определенными способами деформации металлических материалов, описывают пластическое, вязкопластическое и вязкое состояния объектов деформирования. Соответственно построение и развитие ВС для моделирования обработки металлических материалов должно включать возможность описания структурных изменений деформируемого материала и его физического состояния: твердого (кристаллического и аморфного), жидкого, а также возможных переходных состояний.

УДК 621.97

Кадошников В.И., Решетникова Е.С., Решетников Л.В., Кочуков С.В.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОВОК ФЛАНЦЕВЫХ БОЛТОВ

Фланцевый крепеж имеет в мировой практике самое широкое распространение. Болты, гайки, винты с фланцем позволяют создавать оптимальные контактные напряжения на скрепляемых деталях, уменьшают количество деталей в соединении (за счет исключения шайб), позволяют экономить металл. Увеличение опорной поверхности обеспечивает более надежное стопорение при затяжке, в том числе по сравнению с пружинными шайбами.

Фланцевые болты производятся на холодно-высадочных пресс-автоматах, причем способы формирования шестигранной головки болта и фланца различны:

- а) высадка;
- б) обрезка граней головки и фланца;
- в) редуцирование шестигранной головки болта и дальнейшая высадка фланца.

Качество фланцевых болтов, изготавливаемых высадкой, невысокое за счет незаполнения ребер шестигранной головки, что приводит к уменьшению контактной поверхности болтов.

Способ формирования шестигранной головки болта и фланца обрезкой используется для изготовления высококачественных фланцевых бол-

тов для ответственных соединений, но ведет к повышению стоимости продукции за счет низкой стойкости обрезных пуансонов и наличия технологических отходов.

Способ формирования шестигранной головки болта редуцированием с дальнейшей высадкой фланца по сравнению со способами высадки и обрезки наиболее оптимален, так как обеспечивает хорошее оформление головок болтов при низком расходе коэффициента металла и высокой стойкости формообразующего инструмента. Однако допуск на диаметр фланца болтов, изготавливаемых данным способом, больше, чем у болтов, изготавливаемых обрезкой (не менее $\pm 0,2$ мм) [1], что не позволяет применять их для ответственных соединений. Назначение большого допуска на диаметр фланца болтов связано с образованием наплывов металла на торцевой поверхности фланца.

Наплывы на фланце болта образуются вследствие неравномерности распределения металла, предназначенного для формирования фланца, при редуцировании шестигранной головки. Это происходит в силу конструктивных особенностей рабочей полости пуансона, которая, как правило, состоит из деформирующей конусной части и ка-

либрующей части, выполненной в виде шестигранной призмы. В деформирующей части рабочей полости пуансона совершается основная работа деформации заготовки и накапливается металл для дальнейшей высадки фланца, а шестигранная головка болта окончательно формируется в калибрующей части рабочей полости пуансона. Объем металла, предназначенного для формирования фланца, складывается из сумм площадей (S_1+S_2) осевых сечений деформирующей части полости при параметре R_1 , изменяющемся от радиуса описанной окружности шестигранника R_0 до радиуса вписанной окружности R_b (рис. 1).

Параметр R_1 зависит от угла поворота (φ) секущей плоскости вокруг оси и определяется следующим образом:

$$R_1 = R_0 \frac{\cos(\pi/6)}{\cos(\pi/6 - \varphi)}. \quad (1)$$

При $R_1=R_0$ сумма площадей (S_1+S_2) имеет минимальное значение, а при $R_1=R_b$ – максимальное. В результате металл, предназначенный для дальнейшей высадки фланца, набирается неравномерно и при формировании фланца образуются наплывы.

Чтобы избежать образования наплывов на фланце болта, необходимо при редуцировании шестигранной головки обеспечить равномерное распределение металла в осевых сечениях деформирующей части рабочей полости пуансона. Для выполнения поставленного условия в качестве образующей деформирующей части выбрана парабола, форма которой плавно изменяется в зависимости от угла поворота (φ) секущей плоскости вокруг оси, чем обеспечивает постоянную высоту и равенство площадей любых осевых сечений деформирующей части полости (S_1+S_2) (рис. 2). Коэффициенты, определяющие вид параболы и удовлетворяющие поставленным условиям:

$$a = \frac{R_f (h - c) + R_1 c}{R_1 R_f (R_1 - R_f)}; \quad (2)$$

$$b = \frac{R_f^2 (c - h) - R_1^2 c}{R_1 R_f (R_1 - R_f)}; \quad (3)$$

$$c = h R_f \left[(R_f + R_0) (4R_1^2 + R_f^2) + R_1 (-3R_f^2 - 3R_f R_0 - 4R_0^2) \right] \times \frac{1}{(R_0 + R_f)(R_f^3 - 3R_1 R_f^2 + 3R_f R_1^2 - R_1^3)}, \quad (4)$$

где h, R_f, R_0, R_1 – геометрические параметры деформирующей части рабочей полости пуансона.

Помимо равномерного распределения металла в осевых сечениях, вогнутая форма деформирующей части пуансона выравнивает деформацию заготовки по сечению и уменьшает коэффициент напряженного состояния в центральной зоне очага деформации [2].

Для определения энергосиловых параметров процесса редуцирования шестигранной головки болта с фланцем использовался вариационный метод в дискретной постановке [3,4], согласно которому была создана математическая модель процесса и определена полная работа деформации заготовки, включающая в себя работу внутренних сил, работу сил трения. Процесс дефор-

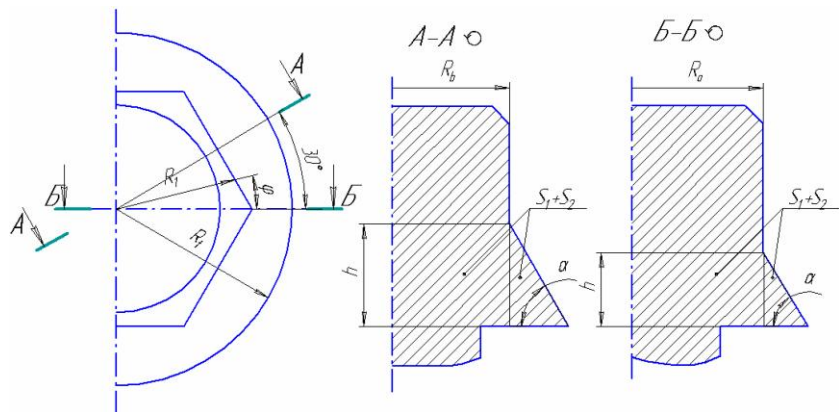


Рис. 1. Заготовка болта с фланцем после редуцирования шестигранной головки в пуансоне с конусной деформирующей частью

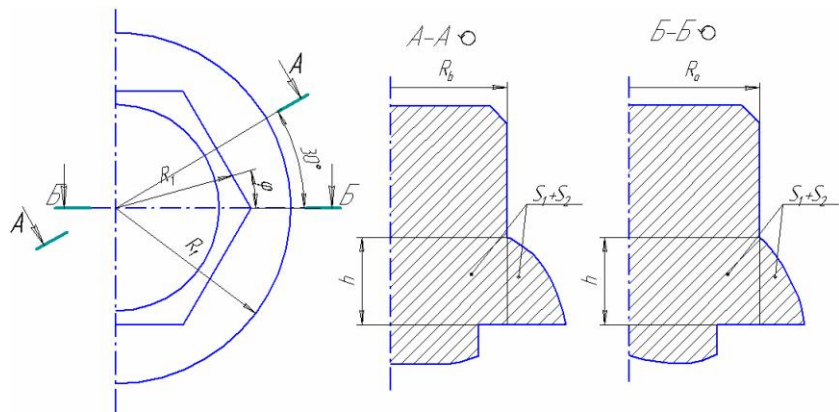


Рис. 2. Заготовка болта с фланцем после редуцирования шестигранной головки в пуансоне с вогнутой деформирующей частью

мирования заготовки условно разбивался на два этапа. На начальном этапе заготовка принимает форму, близкую к окончательной, а деформации в ней имеют конечную величину. На конечном этапе происходит окончательное формирование головки болта, а величины деформаций малы, что позволяет использовать соотношения деформационной теории пластичности. Используя один из прямых методов – метод Ритца, по которому задаются функции перемещений U как функции координат и варьируемых параметров a_i , задача сводится к отысканию минимума полной работы деформации в зависимости от a_i .

Окончательное формирование головки болта осуществляется на конечном этапе редуцирования, когда металл полностью заполняет рабочую полость пуансона (рис. 3). В деформируемом теле между плоскостями ОА и ОС, угол между которыми равен π/n , где n – число граней, выделяется элемент и рассматривается только его деформация, так как остальные деформируются аналогично. Деформация выделенного элемента рассматривается в цилиндрической системе координат r, z, φ .

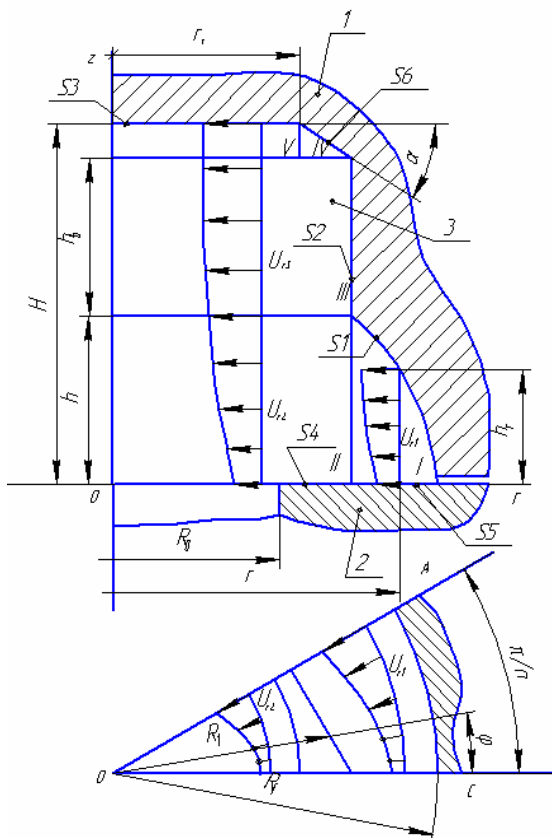


Рис. 3. Схема течения металла на конечном этапе редуцирования шестигранной головки болта с фланцем: 1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – заготовка

Область деформации разбивалась на пять зон. В принятой системе координаты r, z, φ для пластической зоны I изменяются в диапазоне: $r=R_1...R_f, z=0...h_r, \varphi=0... \pi/n$, для пластической зоны II – $r=0...R_1, z=0...h, \varphi=0... \pi/n$, для пластической зоны III – $r=0...R_1, z=h...h_b, \varphi=0... \pi/n$, для пластической зоны IV – $r=R_1...r_v, z=h_b...H, \varphi=0... \pi/n$, для пластической зоны V – $r=0...r_v, z=h_b...H, \varphi=0... \pi/n$.

На границах пластических зон функции перемещений должны удовлетворять следующим условиям:

$$U_{z/z=0} = 0; U_{r/r=0}^{II,III,V} = 0; U_{z/z=h_r}^I = \Delta h; U_{r/r=R_1}^I = U_{r/r=R_1}^{II}; U_{r/r=r_v}^{IV} = U_{r/r=r_v}^V. \quad (5)$$

Функции радиальных и осевых перемещений для пластической зоны I задавались в виде:

$$U_r^I = \left[-\frac{1}{3} \frac{(3\Delta h + a_3 h_r) r}{h_r} - \frac{a_3 z^2 r}{h_r^2} \right] \left(\frac{n\varphi}{\pi} + \frac{1}{2} \right); \quad (6)$$

$$U_z^I = \frac{\Delta h z}{h_r}, \quad (7)$$

где

$$h_r = ar^2 + br + c. \quad (8)$$

Выбранные функции U_r и U_z отвечают граничным условиям первой зоны и близки к реальному течению металла на конечном этапе редуцирования головки болта.

Для случая деформирования в цилиндрической системе координат из соотношений Коши находили $\epsilon_r = \frac{\partial U_r}{\partial r}, \epsilon_z = \frac{\partial U_z}{\partial z}$, а из условия несжимаемости определяли относительное удлинение $\epsilon_\varphi = -(\epsilon_r + \epsilon_z)$. Функция угловых перемещений U_φ рассчитывалась интегрированием $U_\varphi = \int (\epsilon_\varphi \cdot r - U_r) d\varphi$. По известным функциям U_r, U_z и U_φ определяли компоненты тензора деформаций $\gamma_{rz}, \gamma_{z\varphi}, \gamma_{\varphi r}$, характеризующие сдвиг, и находили интенсивность деформации ϵ_i для пластической зоны I на конечном этапе редуцирования:

$$\epsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_r - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_\varphi)^2 + (\epsilon_\varphi - \epsilon_r)^2} + \frac{3}{2} (\gamma_{rz}^2 + \gamma_{z\varphi}^2 + \gamma_{\varphi r}^2). \quad (9)$$

С учетом граничных условий функции радиальных и осевых перемещений для пластической зоны II задавали следующим образом:

$$U_r^{\text{II}} = \left[-\frac{1}{3} \frac{(3\Delta h + a_3 h)r}{h} - \frac{a_3 z^2 r}{h^2} \right] \left(\frac{n\varphi}{\pi} + \frac{1}{2} \right); \quad (10)$$

$$U_z^{\text{II}} = \frac{\Delta h z}{H}, \quad (11)$$

для пластической зоны III –

$$U_r^{\text{III}} = \left[-\frac{1}{3} \frac{(3\Delta h h_b^2 + a_3 h_b^3 - h^3 a_3)r}{h_b^2 (h_b - h)} - \frac{a_3 z^2 r}{h_b^2} \right]; \quad (12)$$

$$U_z^{\text{III}} = \frac{\Delta h z}{H}, \quad (13)$$

для пластической зоны IV –

$$U_r^{\text{IV}} = \left[-\frac{1}{3} \frac{(3\Delta h h_{r4}^2 + 3a_3 H h_v (H - 1) + a_3 h_v^3)r}{h_{r4}^2 h_v} - \frac{a_3 z^2 r}{h_{r4}^2} \right]; \quad (14)$$

$$U_z^{\text{IV}} = \frac{\Delta h z}{H}, \quad (15)$$

$$\text{где } h_v = R \operatorname{tg} \alpha - r_v \operatorname{tg} \alpha; \quad (16)$$

$$h_{r4} = h_v - (r - r_v) \operatorname{tg} \alpha, \quad (17)$$

для пластической зоны V –

$$U_r^{\text{V}} = \left[-\frac{1}{3} \frac{(3\Delta h h_v + 3a_3 H (H - h_v) + a_3 h_v^2)r}{h_v^2} - \frac{a_3 z^2 r}{h_v^2} \right]; \quad (18)$$

$$U_z^{\text{V}} = \frac{\Delta h z}{H}. \quad (19)$$

Аналогично преобразованиям для зоны I определялись компоненты тензора деформаций и интенсивность деформации ε_i для пластических зон II, III, IV, V на конечном этапе редуцирования.

При решении задачи использовалась модель жесткопластической неоднородной среды с нелинейным упрочнением. Кривая упрочнения задавалась в виде экспоненциальной зависимости, предложенной Г.А.Смирновым-Аляевым [5]:

$$\sigma_i = M \varepsilon_i - C e^{-\varepsilon_i} - B e^{-N \varepsilon_i}, \quad (20)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; ε_i – степень деформации; M, C, B, N – коэффициенты, определяемые при испытании материала на линейное растяжение (сжатие).

В соответствии с принятой моделью определяли удельную работу внутренних сил на конечном этапе деформации:

$$\Pi = M \varepsilon_i - C \cdot e^{-\varepsilon_i} (1 - e^{-\varepsilon_i}) - \frac{B}{N} \cdot e^{-N \varepsilon_i} \cdot (1 - e^{-N \varepsilon_i}), \quad (21)$$

где M, C, B, N – параметры, определяемые из опытов на растяжение или сжатие; ε_{i0} – степень деформации, предшествующая конечному этапу высадки; ε_i – интенсивность деформации на конечном этапе штамповки.

Работа внутренних сил:

$$A_{B_i} = \iiint_{(V_i)} \Pi dV, \quad (22)$$

где V_i – объем i -й пластической зоны.

Работа сил трения:

$$A_{T_i} = \iint_{(S_i)} \tau \cdot U_{S_i} dS, \quad (23)$$

где U_{S_i} – функция перемещения; S_i – площадь поверхности контакта металла с инструментом; τ – предел текучести на сдвиг, который с учетом предшествующих деформаций определяется как

$$\tau = \frac{\Psi}{\sqrt{3}} \cdot \left[M - C \cdot e^{-(\varepsilon_{i0} + \varepsilon_i)} - B \cdot e^{-N(\varepsilon_{i0} + \varepsilon_i)} \right], \quad (24)$$

где Ψ – коэффициент, зависящий от условия трения процесса и соотношения размеров деформируемой заготовки.

Полная работа деформации определялась как сумма работ внутренних сил $A_{B1}, A_{BII}, A_{BIII}, A_{BIV}, A_{BV}$ и сил трения $A_{T1}, A_{T2}, A_{T3}, A_{T4}, A_{T5}, A_{T6}$ по поверхностям $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$. Поиск минимума полной работы деформации A_{\min} осуществлялся численно с помощью специально разработанной программы. По найденным значениям минимальной работы деформации A_{\min} определялись усилия редуцирования шестигранной головки болтов из различных материалов с различными соотношениями и размерами.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что вогнутая форма деформирующей части рабочей полости пуансона по сравнению с конической снижает удельную силу деформации на 10–15%.

Пуансон с вогнутой деформирующей частью несколько сложнее в изготовлении, чем с конической, но точность изготавливаемых фланцевых болтов значительно выше. Кроме того, в результате изменения формы деформирующей части полости повысилась стойкость пуансона.

Разработанная конструкция рабочей полости

пуансона для редуцирования шестигранной головки болта позволяет изготавливать высококачественные фланцевые болты с жестким допуском на диаметр фланца, выравнивает деформацию по сечению заготовки и уменьшает уровень напряженного состояния в центральной зоне

очага деформации, что положительно влияет на качество болтов в целом при невысоких значениях удельной силы деформации. Указанные достоинства позволяют снизить затраты на производство и обеспечить высокое качество изготавливаемых болтов.

Библиографический список

1. Марк Ван Тиль. Производство фланцевых болтов // Метизы. 2007. № 1. С. 70–73.
2. Ковка и штамповка. Справочник: В 4 т. Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. М., 1987. 384 с.
3. Паршин В.Г., Поляков М.Г., Железков О.С. Метод определения усилий холодной высадки головок болтов и винтов // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 1975. № 12. С. 48–49.
4. Паршин В.Г. Теория и технология автоматизированного производства методами ОМД деталей массового применения // Прогрессивные технологические процессы в обработке металлов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Б.А. Никифорова. Магнитогорск: МГМА, 1997. С. 239–244.
5. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Л.: Машиностроение, 1968. 266 с.
6. Проблема повышения качества крепежных изделий / Чукин В.В., Артюхин В.И., Рубин Г.Ш. и др. // Вестн. МГТУ им. Г.И. Носова. 2007. № 4. С. 99–102.