

С.Р. Рахманов, П.В. Удовик

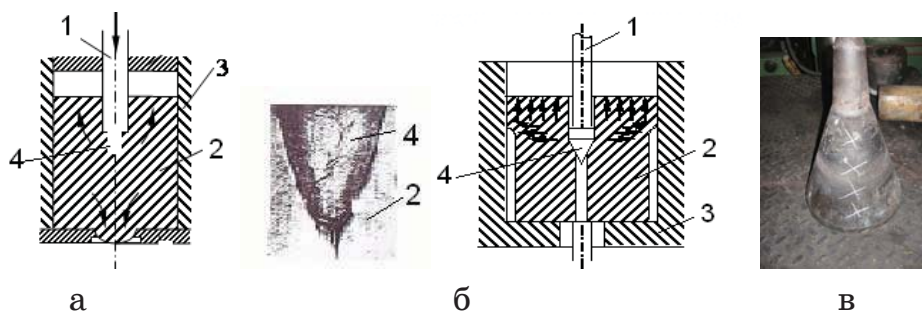
К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ ОБРАЗУЮЩЕЙ ОПРАВКИ ПРОШИВНОГО ПРЕССА

Аннотация. Решена многофакторная вариационная задача о форме рабочей поверхности оправки минимального осевого сопротивления, выполненного в виде осесимметричного тела вращения для прошивки трубных заготовок на прошивном прессе.

Ключевые слова: оправка, прошивной пресс, труба, осевое сопротивление, металл, вариация, функционал

При реализации технологического процесса производства гильз (труб) на прошивных прессах осесимметричная оправка внедряется в трубную заготовку (металл), преодолевая сопротивление деформации металла вдоль оси прошивки [1, 2].

Вследствие несовершенства технологического процесса прошивки трубной заготовки рабочие поверхности технологических инструментов (оправки и контейнера) подвергаются интенсивному износу со стороны обтекающего потока металла. Это в свою очередь приводит к увеличению осевого сопротивления на оправку и стержневую систему механизма удержания оправки (рис. 1).



а, б – соответственно процессы прошивки трубной заготовки и экспандирования гильзы;

в – характерная картина износа эспандера

Рисунок 1 – Схема прошивки трубной заготовки, экспандирования гильзы и характерная картина износа эспандера прошивного пресса:

1 – стержень оправки; 2 – трубная заготовка;

3 – контейнер пресса; 4 – оправка (эспандер)

Для интенсификации технологического процесса и обеспечения максимальной эффективности процесса прошивки, при прочих равных условиях, необходимо подобрать такую форму оправки, которая при ее минимально-возможном сопротивлении обеспечит стабильное движение металла в очаге деформации. Это возможно путем рационального перераспределения энергосиловых и кинематических параметров очага деформации.

Реализация устойчивого технологического процесса прошивки трубной заготовки в гильзы возможна лишь в том случае, когда скорость внедрения оправки в трубную заготовку не превосходит скорость деформации металла и характер взаимодействия оправки с металлом является неупругим. Следовательно, при некотором допущении в этом случае оправку принимаем в виде абсолютно твердого тела. При этом можно предположить, что оправка, не нарушая сплошность заготовки (рабочей среды), как бы «раздвигает» в стороны частицы металла вдоль оси прошивки. Это говорит о справедливости гипотезы плоских сечений для рассматриваемой динамической модели очага деформации в процессе прошивки сплошной цилиндрической заготовки в гильзы [3, 4], (рис. 2.).

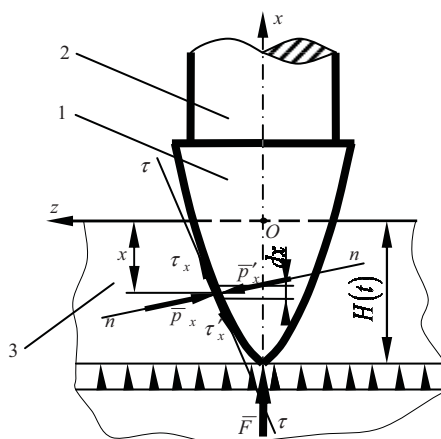


Рисунок 2 – Расчетная схема очага f деформации в процессе прошивки трубной заготовки: 1 – оправка; 2 – стержень оправки; 3 – трубная заготовка

Как уже отмечалось, вследствие некоторых особенностей технологического процесса прошивки трубной заготовки и жесткого режима ее реализации, ограничимся рассмотрением стесненного очага деформации и проектированием рабочих инструментов для прошивных прессов. При этом, в выбранной системе координат, образующая осесимметричной оправки может быть задана в виде

$$f(x) = R(x), \quad (1)$$

где $f(x)$ – дважды дифференцируемая функция, удовлетворяющая исходным технологическим требованиям выпуклости формы образующей оправки $[f'(x) \geq 0; f''(x) < 0]$ (рис. 3).

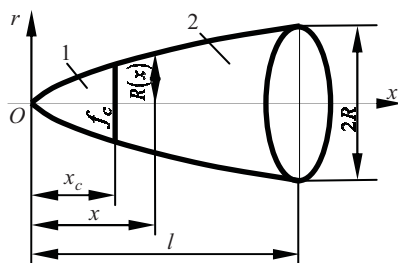


Рисунок 3 – Схема к определению формы образующей оправки прошивного пресса

Для рассматриваемых скорректированных моделей и принятых реологий рабочей среды сила осевого сопротивления оправки с учетом трения в очаге деформации, при известных предположениях, определяется функционалом

$$F = 2\pi \int_0^l p_0 [f'(x) + \mu_0] f(x) dx, \quad (2)$$

$$p_0 = A(f')^2 + Bff'' + G, \quad (3)$$

где p_0 – давление металла в очаге деформации при прошивке сплошной цилиндрической заготовки; μ_0 – коэффициент трения между прошиваемым металлом и оправкой в очаге деформации; A, B, G – соответствующие коэффициенты ($A \geq 0, B \geq 0, G \geq 0$), определяющие реальные термомеханические свойства прошиваемого металла.

При реализации стандартного технологического процесса прошивки в металле преимущественно перед оправкой в радиальном направлении движется некоторая пластическая (деформационная) волна. Поэтому коэффициенты уравнения (3) определенно зависят от следующих параметров прокатываемого металла: начальной плотности ρ_0 и плотности металла, расположенного впереди линий токов ρ_1 , величины сцепления металла с оправкой m , угла внутреннего трения θ , давления металла \bar{p}_0 и касательного напряжения на поверхности оправки $\bar{\tau}$.

При исследовании напряженно-деформированного состояния пластических или упругопластических сред для практических расчетов и определения коэффициентов уравнения (3), учитывающее реальные свойства металла как деформируемой рабочей среды, рекомендуется пользоваться выражениями согласно [5, 6], представленные в виде

$$A = \begin{cases} \frac{\chi_1}{1-\gamma} \left[a^{\gamma-1} - 1 + 2b_1(1+\gamma)a^\gamma + \frac{1-\gamma}{\gamma}(a^\gamma - 1) \right], (\gamma \neq 0) \\ \chi_1(\ln a + b_1); \gamma = 0. \end{cases} \quad (4)$$

$$B = \begin{cases} 2\chi_1 \frac{a^\gamma - 1}{\gamma}; \gamma \neq 0; \\ \chi_1 \ln a; \gamma = 0, \end{cases} \quad G = \begin{cases} p_0 + \tau_0 \varphi^{-1}(a^\gamma - 1); \gamma \neq 0; \\ \tau_0 \ln a; \gamma = 0, \end{cases}$$

где

$$b_1 = \rho / \rho_0 = \text{const}; \quad a = (1 - b_1)^{-1};$$

$$\tau_0 = 2m \cos \theta; \quad \varphi = \sin \theta; \quad \gamma = \frac{\varphi}{1 + \varphi};$$

$$2\chi = \rho_0 u^2; \quad 2\chi_1 = \rho_1 u^2.$$

Заметим, что реализация устойчивого технологического процесса прошивки сплошных цилиндрических заготовок в гильзы возможна лишь при определенных конфигурациях оправок. Поэтому необходимо определить класс допустимых функций формы образующих $f(x)$, для которых должно быть выполнено необходимое условие $[f'(x)]^2 \ll 1$ или $f'(x) = k_0, k_0^2 = 0(1) = \text{const}$.

Из уравнения для определения давления металла в очаге деформации (3), принятой расчетной схемы, физической моделей процесса прошивки и условиях безотрывного обтекания оправки потоком металла, получаем некоторое ограничение на класс допустимых функций

$$p_0 = A(f')^2 + Bff'' + G, \quad (5)$$

Для случая, когда $f'(x) \neq 0$ площадь поверхности оправки S и ее полезный объем V могут быть записаны в виде:

$$S = 2\pi \int_0^{x_k} f(x) dx = \int_0^{y_k} f(x) x' df; \quad V = 2\pi \int_0^{x_k} f^2(x) dx = \int_0^{y_k} f^2(x) x' df, \quad (6)$$

где $y_k = r_k = d/2$ – радиус основания оправки; $x' = dx/df = 1/f'(x)$.

В некотором исходном приближении задачи принимаем, что $f(0) = 0$. Следовательно, проектирование оптимальной образующей оправки реализуемо в пределах выбранного класса допустимых функций, удовлетворяющих вышеприведенным условиям прошивки трубной заготовки (условия безотрывного обтекания оправки потоком металла).

Для удобства анализа условия соответствия формы оправки форме выпуклого тела, начальные условия задачи удобно выразить в форме

$$\begin{aligned} f'(x) - l^2 &= 0; g' - w^2 = 0; \\ Ag^2 + Bf(x)g + G - \beta^2 &= 0; \\ f'(x) - k_0 + \alpha^2 &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где l, w, α, β – действительные переменные вариационной задачи.

Следовательно, функция $g(x)$ определяется дифференциальным условием

$$f'(x) - g(x) = 0. \quad (8)$$

Таким образом, задача по определению формы оправки минимального осевого сопротивления, проникающей с постоянной скоростью в пластическую или другую моделируемую эквивалентную рабочую среду, размещенную в ограниченном объеме, сводится к вариационной задаче по определению переменных $f(x), g(x), \alpha(x), w(x), l(x), \beta(x)$. В целом, это позволяет минимизировать функционал осевого сопротивления при вышеперечисленных условиях деформации рабочей среды и процессах обтекания оправки металлом.

Необходимо отметить, что в этом случае решение многофакторной вариационной задачи эквивалентно отысканию экстремума уточненного функционала осевого сопротивления.

$$I = \int_0^l F(f, f', g, g', w, \alpha, l, \beta, \lambda_k) dx; \quad [k = \overline{1, 7}], \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} F = & (Ag^2 + Bfg' + G)(g + \mu_0)f + \lambda_3(x)(f' - g) + \lambda_4(x)(g' + w^2) + \\ & + \lambda_5(x)(f' - k_0 + \alpha^2) + \lambda_6(x)(Ag^2 + Bfg' + G - \beta^2) + \lambda_7(x)(f' - l^2) + \\ & + \lambda_1(x)f + \lambda_2(x)f^2; \end{aligned} \quad (10)$$

$\lambda_k(x)$ – множители Лагранжа, согласно [7].

Для рассматриваемой задачи условия трансверсальности вариаций произвольных переменных могут быть сформулированы в следующей форме (форме известной вариационной задачи Эйлера)

$$\begin{aligned} & [F - f'F_{f'} - g']_k \delta x_k + [F_{f'}]_k \delta y_k + [F_{g'}]_k \delta g_k + [F_{g'}]_0 \delta g_0 = 0; \\ & F_{f'} = \frac{\partial F}{\partial f'}; F_{g'} = \frac{\partial F}{\partial g'}. \end{aligned} \quad (11)$$

Индексы, указанные в уравнениях (11) 0 и k соответствуют значениям функций и вариаций переменных в начальных и конечных точках кривых, определяющих форму образующих проектируемых оправок. Выдвинутое условие (11) должно выполняться для любых допустимых вариаций $\delta x_k, \delta y_k, \delta g_k$. Учитывая, что на них не наложены дополнительные ограничения, из (4.31) следует, что

$$\begin{aligned} & [F - f'F_{f'} - g']_k \delta x_k = 0; [F_{f'}]_k \delta y_k = 0; \\ & [F_{g'}]_k \delta g_k = 0; [F_{g'}]_0 \delta g_0 = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Применив известное правило решения задачи с определенными ограничениями типа равенств и неравенств, изложенное в работе [6, 7], формируем необходимые и достаточные условия минимума определенной целевой функции. Следовательно, при этом получим, что вдоль экстремали должны быть выполнены следующие условия

$$\lambda_4(x) \geq 0; \lambda_5(x) \geq 0; \lambda_6(x) \leq 0; \lambda_7(x) \leq 0,$$

которые могут быть также получены непосредственно из необходимого условия минимума неопределенных множителей-условие Лежандра [2, 7].

Уравнение Эйлера в силу вышеизложенного для рассматриваемых условий задачи имеет вид

$$\begin{aligned} & dF_{g'}/dx - F_g = 0; \quad dF_{f'}/dx - F_f = 0; \\ & F_\alpha = 0; F_\beta = 0; F_l = 0; F_w = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Из последних четырех выражений вытекает следующее

$$\lambda_4(x)w = 0; \lambda_5(x)\alpha = 0; \lambda_6(x)\beta = 0; \lambda_7(x)l = 0. \quad (14)$$

Обращая внимание на постановку и условия задачи, на вариацию δg в начальной и конечной точках строгие ограничения не наложены. Следовательно, соотношения $[F_{g'}]_k \delta g_k = 0$ и $[F_{g'}]_0 \delta g_0 = 0$ должны всегда выполняться. Очевидно, они имеют вид

$$Bf_k^2 (f'_k + \mu_0) + [\lambda_4(x)]_k + [\lambda_6(x)]_k + Bf_k = 0; [\lambda_4(x)]_0 = 0. \quad (15)$$

Поэтому можно записать, что $[\lambda_6(x)]_k = 0$, если $f_k = 0, \mu_0 > 0$. Этот случай соответствует экстремали (прямой), для которой $f' \equiv 0$.

Анализируя случай

$$[\lambda_6(x)]_k = 0, \text{ если } f_k \neq 0, \mu_0 > 0, \quad (16)$$

предположим

$$[\lambda_4(x)]_k = -Bf_k^2, (f'_k + \mu_0) < 0, \quad (17)$$

$$\beta_k = 0.$$

Условие (17) на основании (7), в частности, означает, что экстремаль не содержит отрезка $f' = 0$. Тогда из (7) и (14) получим $\lambda_7(x) = 0$.

С учетом (14) в развернутой форме распишем первые два уравнения Эйлера

$$\begin{aligned} \lambda_3(x) + \lambda'_4(x) + \lambda'_6(x)Bf - \lambda_6(x)g(2A - B) &= (3A - 2B)g^2f + 2\mu_0(A - B)gf + Gf; \\ \lambda'_3(x) - \lambda'_5(x) &= (Ag^2 - 2Bfg' + G)(g + \mu_0) + \lambda_6(x)Bg' + \lambda_1(x) + 2\lambda_2(x)f. \end{aligned} \quad (18)$$

В силу того, что подинтегральная функция F не содержит в явном виде переменную x , существует первый интеграл уравнения Эйлера

$$F - f'F_{f'} - g'F_{g'} = C_1 = const, \quad (19)$$

или в развернутом виде

$$\begin{aligned} (Ag^2 + G)(g + \mu_0)f &= \lambda_6(x)(Ag^2 + G) + \lambda_3(x)g + \lambda_5(x)k_0 + \\ + C_1 - \lambda_1(x)f - \lambda_2(x)f^2. \end{aligned} \quad (20)$$

На основании (20) и первого из соотношений (18) с учетом (19) получаем следующее основное уравнение вариационной задачи

$$\begin{aligned} [2(A - B)(f')^3 + \mu_0(A - 2B)(f')^2 - \mu_0G]f &= \\ = -C_1 + \lambda_1(x)f + \lambda_2(x)f^2 + \lambda'_4(x)f' + \lambda_5(x)k_0 + \lambda_6(x)G + \lambda'_6(x)f'Bf - \\ - \lambda_6(x)(f')^2(A - B), \end{aligned} \quad (21)$$

где в соответствии со свойствами рабочей среды (прокатываемого металла) известно, что $A - B > 0, A - 2B < 0$.

При проектировании рационального профиля оправки, с учетом результатов известных работ [5, 6, 7], должно быть соблюдено

условие Вейерштрасса – Эрдмана в точках сопряжения дуг экстремали его образующих

$$\Delta[F - f'F_f - g']\delta x_c + \Delta[F_{g'}]\delta f'_c + \Delta[F_{f'}]\delta f_c = 0, \quad (22)$$

где Δ – разность значений до и после точки сопряжения образующей оправки с координатами (x_c, y_c) ; f'_c – производная функции образующей оправки в этой точке.

Если на поведение функции в точке сопряжения образующей оправки не наложены дополнительные условия, то ранее выдвинутые условия в развернутой форме переписутся в виде

$$\begin{aligned} \Delta[\lambda_6(x)(A(f')^2 - G) - \lambda_3(x)f' - \lambda_5(x)k_0] &= 0; \\ \Delta[\lambda_4(x) - \lambda_6(x)Bf] &= 0; \Delta[\lambda_3(x) - \lambda_5(x)] &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Из этого уравнения соотношений (23) с учетом (24) следует, что функции $\lambda_4(x), \lambda_6(x)$ непрерывны, и так как $\lambda_4(x) = Bf_c\lambda_6(x)$, то

$$\lambda_4(x_c) = \lambda_6(x_c) = 0. \quad (24)$$

На основании (7) и (8) можно предположить, что

$$\begin{aligned} \lambda_4(x) = 0; \lambda_5(x) = 0, \text{ если } \lambda_6(x) \neq 0; \\ \lambda_6(x) = 0, \text{ если } \lambda_4(x) \neq 0; \lambda_5(x) \neq 0. \end{aligned} \quad (25)$$

Поэтому из (23) и (17) получим, что экстремаль образующей оправки должна заканчиваться некоторой дугой

$$A(f')^2 + Bff'' + G = 0. \quad (26)$$

Образующая оправки с дуги (26) начинаться не может, поскольку для кривой (26) $f'(0) \rightarrow \infty$, что противоречит условиям (7). Поэтому $\lambda_6(x) = 0$. Итак, показано, что если функция $f(x)$ минимизирует функцию осевого сопротивления (2) при условиях (1), (6) – (7) и заданных условиях на концах интервала, то должны существовать зависящие от x величины $w, \alpha, \beta, \lambda_k$, удовлетворяющие вышеприведенным условиям и уравнениям.

Отметим, что если величина x_k произвольна, то из (12) и (19) получаем $C_1 = 0$.

Если произвольны величины S и V , то соответственно будут выполнены следующие соотношения

$$\lambda_1(x) = 0, \lambda_2(x) = 0. \quad (27)$$

Особенно важное значение имеет проектирование и создание ряда оправок минимального сопротивления при задании одного из определяющих геометрических параметров.

Рассмотрим решение поставленной вариационной задачи по оптимизации формы оправки при различных случаях задания одного из определяющих ее форму геометрических параметров (объема V , площади поверхности S , длины l , максимального диаметра d).

Во всех перечисленных случаях, как следует из (15), (16), (20) и (25) должны быть выполнены условия

$$\begin{aligned} \lambda_6(x) &= -f'_k (f'_k + \mu_0); \lambda_4(x) = \lambda_6(x) = 0; \\ \lambda_4(x_c) &= \lambda_6(x_c) = 0. \end{aligned} \quad (28)$$

Для наиболее распространенных случаев, когда диаметр оправки произволен (имеет разбег), из (11) и (12) получаем

$$\left[F_{f'_k} \right] = [\lambda_3(x) + \lambda_5(x) + \lambda_7(x)]_k = 0. \quad (29)$$

При задании одного геометрического параметра оправки решение задачи с $f(x) \neq 0$ не существует.

Действительно, предположим, что выполнено условие (16), тогда получаем (14). При этом экстремаль образующей оканчивается дугой (26), но из известных условий (28) и (25) следует, что

$$\lambda_3(x) = 0, \lambda_5(x) = 0. \quad (30)$$

Подставляя полученное в первое условие из (28) в уравнение (21), независимо от задания параметров l, V или S – получаем, что

$$C_1 = \lambda_1(x) = \lambda_2(x) = 0. \quad (31)$$

Для дуги (26) из (21) имеем

$$\lambda_3(x)g = -Bfg'[(g + \mu_0)f + \lambda_6(x)]. \quad (32)$$

Так как на дуге (26) $\lambda_5(x) \equiv 0$, то из второго уравнения (18) и (32) для функции $\lambda_3(x)$ получаем

$$\lambda_3(x)f = A_0 = const. \quad (33)$$

При соблюдении условия (31) уравнение (33) на дуге образующей оправки выполнено всегда. С учетом (30) и (33) получаем $\lambda_3(x) \equiv 0$.

Так как $\mu_0 > 0, f' \geq 0$ – то из (32) следует, что выполнение третьего условия возможно лишь в случае, если $f_c = 0$. Это в свою очередь возможно лишь тогда, когда экстремалью будет дуга

$$f \equiv 0. \quad (34)$$

Полученный результат в корне противоречит условию (16). Следовательно, при задании одного из известных параметров l, V или S экстремаль должна удовлетворять условию (15). При этом дуга (34) будет решением задачи, если удовлетворяются граничные условия на l, V и S . Однако необходимо отметить, что в противном случае решение задачи не существует в общем виде. Тогда следует изменить исходную постановку задачи.

При задании только длины оправки l решением задачи будет дуга (34), где выполнено единственное граничное условие. При задании $S \neq 0$ или $V \neq 0$ дуга (34) не может быть решением задачи, так как ранее выдвинутое условие для S и V не выполняются. Следовательно, в этих случаях решение задачи не существует.

Теперь рассмотрим случай задания максимального диаметра основания оправки $d = 2R_0$. При этом, так как произвольны другие геометрические параметры оправки из (27) – (30), будут выполнены условия (31). Учитывая, что $d \neq 0$, то явно выполнено условие (16). Следовательно, последним участком экстремали оправки будет отрезок дуги (21) и на этой дуге функция $\lambda_3(x)$ удовлетворяет уравнению (33). Из уравнения (32) с учетом (28) получаем

$$[\lambda_3(x)f']_k = 0. \quad (35)$$

Если $\lambda_3(x) = 0$, то ранее выдвинутое условие (16) будет нарушено, следовательно, из (28) получаем

$$[\lambda_3(x)f']_k = 0; f'_k = 0. \quad (36)$$

Найдем при заданном диаметре оправки форму образующей оправки. Экстремаль удовлетворяет уравнению (21), которое при учете (31) запишем в виде

$$\begin{aligned} & [2(A - B)(f')^3 + \mu_0(A - 2B)(f')^2 - \mu_0G]f = \\ & = \lambda'_4(x)f' - \lambda_5(x)k_0 + \lambda_6(x)G + \lambda'_6(x)ff'B - \lambda_6(x)(f')^2(A - B), \end{aligned} \quad (37)$$

Отсюда следует, что экстремаль не может содержать дугу, вдоль которой $w \neq 0; \beta \neq 0$.

В противном случае из (16) следовало бы, что $\lambda_4(x) = \lambda_5(x) = \lambda_6(x) = 0$. Но при этом условии получаем, что решением (33) будет конус $w = 0$. Это противоречит исходному предположению вариационной задачи. Следовательно, искомая экстремаль может

состоять только из двух дуг: $f'' = 0$ и $A(f')^2 + Bff'' + G = 0$. Однако необходимо отметить, что начинаться она может только с первой из этих дуг, а оканчиваться второй дугой.

Пусть теперь k_0 – известная постоянная. Покажем, что в зависимости от выполнения условий

$$\Phi(k_0) = 2(A - B)k_0^3 + \mu_0(A - 2B)k_0^2 - \mu_0G \geq 0; [\Phi(k_0) < 0], \quad (38)$$

получаем два класса независимых решений.

Если выполнено условие (38), то вдоль экстремали $\lambda_5(x) \equiv 0$. Тогда, как следует из (37), на дуге $f(x) = kx$ имеем

$$\lambda_4'(x) = \left[2(A - B)k^3 + \mu_0(A - 2B)k^2 - \mu_0G \right]_x. \quad (39)$$

Из (39) видно, что $\lambda_4'(x)$ – линейная функция, причем $\lambda_4'(x) = 0$. Если $\lambda_4'(x) \neq 0$, то получаем, что невозможно удовлетворить $\lambda_4(x) = 0, \lambda_4(x_c) = 0$. При этом x_c координата точки сопряжения дуги образующей и входного конуса оправки.

Следовательно, показано, что при условии (28) экстремаль начинается с образующей конуса $f(x) = kx$, где k определяется из уравнения $\lambda_4(x) = 0$, или $\Phi(k) = 0$. Очевидно в этом случае имеем

$$2(A - B)k^3 + \mu_0(A - 2B)k^2 - \mu_0G = 0. \quad (40)$$

Пусть теперь выполнено условие (38). Тогда, так как для допустимых k выполнено условие $k < k_0$, то условие (38), согласно общему виду функции $\Phi(k)$ будет выполнено для всех возможных k . Если предположить, что вдоль экстремали $\lambda_5(x) \equiv 0$, то левая часть уравнения (37) меньше нуля для всех $f > 0$. Значит, на дуге $f = kx$ для $x > 0$ будем иметь $\lambda_4'(x) < 0$, что противоречит условиям $\lambda_4(x) = 0$ и $\lambda_4(x) \geq 0$. Следовательно, предположение о том, что $\lambda_5(x) \equiv 0$ неверно. Поэтому в случае выполнения условия (37) экстремаль должна начинаться с дуги.

Рассмотрим случай

$$f(x) = k_0x. \quad (41)$$

При выполнении любого из выдвинутых условий (37) и (38) экстремаль должна заканчиваться отрезком дуги (36).

Найдем ординату точки сопряжения этой дуги и образующей входного конуса $f = kx$. Для этого решим дифференциальное уравнение (26), используя условие (36). Тогда

$$f'(x) = \left[\left(\frac{C_0}{f(x)} \right)^\alpha - \frac{G}{A} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (42)$$

где $C_0 = R \left(\frac{G}{A} \right)^{\frac{1}{\alpha}}$; $\alpha = \frac{2A}{B}$.

В точке сопряжения $f'_c = k$, поэтому из (42) получим

$$f_c = C_0 \left(k^2 + \frac{G}{A} \right)^{\frac{1}{\alpha}} = R \left(\frac{A}{G} k^2 + 1 \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (43)$$

Из выражения (42) получаем явный вид дуги (26) в форме

$$x = \int_{x_c}^R \left[\left(\frac{C_0}{f(x)} \right)^\alpha - \frac{G}{A} \right]^{\frac{1}{2}} df + C_1, \quad (44)$$

где C_1 – постоянная, которая определяется по известным из (44) координатам точки сопряжения ($x_c = f_c / k, f_c$). Следовательно, формулы (40) или (45) и (44) полностью определяют экстремаль формы образующей оправки при задании максимального ее диаметра (рис. 3).

Для проверки справедливости предложенной методики расчета рациональной формы образующей оправки в качестве примера выбираем моделируемый технологический процесс прошивки трубной заготовки с некоторыми ограничениями на применение гипотезы плоских сечений для несколько нетрадиционной реологии рабочей среды. Заметим, что разработанные методы анализа могут быть целиком использованы для случая, когда строго справедлива гипотеза плоских сечений для выбранной модели очага деформации и других рассматриваемых технологических процессов. При прошивке трубных заготовок (металлов) на прошивном прессе трубопрессовой установки, моделируемых в частности как упругопластическая среда, для которых осевое сопротивление на оправку также определяется функционалом с известными коэффициентами [5, 6, 7], следует учитывать, что

$$A = \chi \left[\ln(1 + \varepsilon) - \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \right]; B = \chi \ln(1 + \varepsilon); G = \tau [1 + \ln(1 + \varepsilon)]; \varepsilon = \frac{E}{2\tau(1 + \nu)}, \quad (46)$$

где τ – предел текучести металла при сдвиге; E – модуль упругости прошиваемого металла; ν – коэффициент Пуассона.

На основании полученных результатов и расчетных формул (42),(43) и (44) составлена программа расчета рационального профиля образующей рабочей поверхности оправки прошивного прессы. Это позволяет определить целую гамму экстремалей для образующей оправки и штампов для их производства в рамках рассматриваемых принятых моделей очага деформации прошивного прессы и реологий рабочих сред.

Сравнительный анализ полученных результатов и результатов, приведенных в работах [1, 2, 4], подтверждает правомерность выдвинутых предположений и гипотез при выборе рационального профиля оправки и технологии ее производства.

Использование оправок рациональной калибровки в условиях прошивного прессы трубопрессовой установки, при прочих равных условиях, обеспечивает увеличение скорости прошивки на 10 – 17% и срока службы оправок на 20 – 25% путем обеспечения благоприятных режимов обтекания потоком металла при прошивке сплошных цилиндрических заготовок в полые гильзы. Улучшение условий обтекания рабочей поверхности оправки потоком прошиваемого металла приводит к сохранению сплошности технологического покрытия на поверхности оправки. Это позволяет, как следствие, исключить налипание металла на оправку и ухудшение качества поверхности производимых труб. За счет оптимизации формы рабочей поверхности оправки достигается снижение усилия прошивки на 11 – 12% и в целом стабилизация энергосиловых параметров очага деформации при прошивке.

Реализация устойчивых технологических процессов прошивки позволяет путем снижения усилия на оправку значительно повысить динамическую устойчивость стержневой механизма ее удержания, что приводит к снижению разностенности гильз (труб) на 7 – 12%.

Калибровка оправок с рациональной формой рабочей поверхности, путем развития базовых теоретических положений, намечает направления интенсификации технологических процессов прошивки, повышения долговечности технологического инструмента, качества прошиваемых гильз и снижения себестоимости их производства.

Выводы

1. Установлено, что задача по определению оптимальной формы образующей технологического инструмента реализуема в пределах выбранного класса допустимых функционала осевого сопротивления и функций образующей, удовлетворяющих условиям прошивки трубной заготовки.

2. Решена многофакторная вариационная задача по калибровке (проектированию) образующей оправки минимального осевого сопротивления, проникающей с постоянной скоростью в осесимметричную трубную заготовку, размещенную в ограниченном объеме очага деформации прошивного пресса.

3. Выявлено, что реализация устойчивого технологического процесса прошивки сплошных цилиндрических заготовок в гильзы возможна лишь при определенных рациональных конфигурациях образующих оправок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данченко В.Н. Технология трубного производства. Учебник для вузов. /В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев // . – М.: Интермет - Инжиниринг, 2002. – 640 с.
2. Гуляев Ю.Г. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. / Ю.Г.Гуляев, С.А. Чукмасов, А.В. Губинский // – Киев.: Наукова думка, 1986. – 240 с.
3. Гун Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
4. Коликов А.П. Новые процессы деформации металлов и сплавов./ А.П. Коликов, П.И. Полухин, А.В. Крупин//–М.:Высшая школа,1986.–351 с.
5. Гендуков В.М. Тело вращения минимального сопротивления в упругопластических и пластических сжимаемых средах.– В кн. «Проблемы динамики взаимодействия деформируемых сред», Ереван. Изд-во АН Армянской ССР, 1984. С.116 – 121
6. Сагомоян А.Я. Проникание. – М.: МГУ, 1956. – 300 с.
7. Цлаф Л.Я. Вариационное исчисление и интегральные уравнения – М.: Наука, 1974. – 479 с.

Получено 28.12.2010г.