

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОШИВКИ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ НА ПРОШИВНОМ ПРЕССЕ ТРУБОПРЕССОВОЙ УСТАНОВКИ

Составлена математическая модель динамики процесса прошивки трубной заготовки на прошивном прессе трубопрессовой установки. Рассмотрено осесимметричное течение металла (рабочей среды) между контейнером и оправкой (экспандером). Установлен характер распределения давления металла и напряжений в очаге деформации. Из условия минимума осевого сопротивления оправки (экспандера) потоку прошиваемого металла установлена рациональная форма её образующей.

Ключевые слова: прошивка, заготовка, пресс, динамика, напряжение, оправка, экспандер.

Введение. В мировой практике производства бесшовных труб из малопластичных нержавеющей сталей и труднодеформируемых сплавов широкое применение находят процессы горячего прессования [1 – 6].

Условия функционирования оборудования для прессования бесшовных стальных труб и особенности реализации современных технологических процессов установили определенные приоритеты в данном направлении. При этом, повышение эффективности технологических процессов прошивки трубной заготовки путем совершенствования технологии производства и модернизации оборудования прошивного пресса выдвигают ряд актуальных задач. К ним относятся: выбор рациональных решений, связанных с оптимизацией качества бесшовных труб; отработка технологических характеристик; прогнозирование показателей стойкости технологического инструмента и надежности функционирования трубопрессового оборудования. Данные вопросы требуют кардинально нового подхода к рассматриваемой задаче.

Очевидно, что прогнозирование существующих и разработка

новых технологических процессов производства труб, в рамках данной задачи, указывают на необходимость создания корректных математических моделей технологических процессов, адекватно отражающих условия прошивки или экспандирования трубных заготовок на современных прошивных прессах трубопрессовых установок (рис. 1).

Необходимо подчеркнуть, что при прошивке или экспандировании предварительно просверленных трубных заготовок из труднодеформируемых сталей и их сплавов для уменьшения сил трения в очаге деформации и стабилизации самого технологического процесса используются различные приемы. Например, чистоту и качество поверхности при прессовании труб из малопластичных материалов обеспечивают применением специальных технологических смазок. Для этой цели, как правило, в промышленных условиях преимущественно применяют различные порошки, смазочные шайбы, жидкую или стекловидную смазку. Однако данные мероприятия коренным образом не устраняют узкие места при производстве труб.

Отметим, что вследствие несовершенства формы образующей рабочей поверхности оправки в процессе прошивки трубной заготовки обтекающим потоком горячего металла она подвергается интенсивному износу. Это, преимущественно, приводит к существенному увеличению осевого сопротивления оправки (экспандера), изменению прямолинейного устойчивого положения иглы по оси прошивки и, как следствие, к ухудшению качества прошитых гильз.

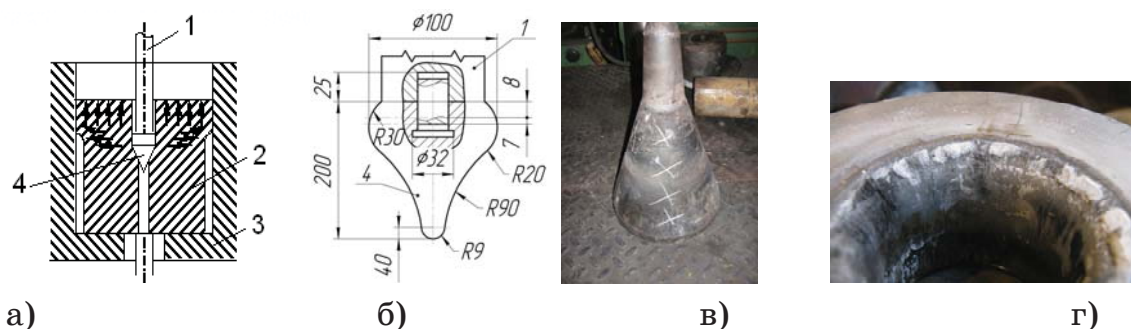


Рисунок 1 - Схема технологического процесса экспандирования трубной заготовки а) экспандер (оправка) б) картины износа экспандера в) и контейнера г) вертикального прошивного пресса трубопрессовой установки

Очевидно, что в данном случае, на передний план выдвигается проблема оптимизации самого процесса прошивки, путем выбора ра-

циональных параметров технологического процесса и инструмента, что неразрывно связано с развитием фундаментальных методов исследования очага деформации [2; 3]. Отметим, что нарушение проектных размеров полученных гильз вызвано, в основном, изменением геометрических размеров оправки (экспандера) в результате интенсивного износа в процессе прошивки и дальнейшим её уходом от оси контейнера.

Постановка задачи. Реализация устойчивых процессов прошивки трубной заготовки с относительно высокими темпами деформации металла обуславливают разработку принципиально новых физических и математических моделей рассматриваемого технологического процесса, что в основном базируется на развитии результатов ранее проведенных комплексных исследований [3, 4].

Задача выбора параметров технологического инструмента для прошивки трубных заготовок в общетеоретическом плане с применением традиционных методов расчета калибровки недостаточно полно изучена и в базовом варианте изложена в работах [5, 6]. В существующей литературе отсутствуют строгие и однозначные рекомендации по выбору рациональных геометрических параметров технологического инструмента (калибровка экспандера или оправки).

Характерно то, что, при отработке конкретных режимов прошивки на этапе проектирования технологических процессов возникают определенные трудности, обусловленные особенностями динамики функционирования очага деформации.

Цель работы. Целью данной работы является разработка рекомендаций по выбору рациональных параметров технологического инструмента путем создания динамической модели технологического процесса прошивки трубной заготовки.

Ниже приведены наиболее значимые выкладки, где сделана определенная попытка получить корректную математическую модель процесса прошивки или экспандирования трубной заготовки на основе базовых положений динамической аналогии течения металла в очаге деформации.

Метод решения задачи. В основу гидродинамического моделирования очага деформации с принятой реологией рабочей среды положены динамические процессы при прошивке трубной заготовки. Данная методика расчета характерна и особенно эффективна при вы-

сокоскоростной прошивке. В этом случае требуется установить соответствие предложенной реологии рабочей среды и гидродинамической модели, физическим и граничным условиям процесса прошивки (экспандирования) на прошивном прессе.

Очаг деформации прошивного пресса и динамические процессы прошивки сплошной трубной заготовки в гильзы требуемых размеров в дальнейшем моделируем на основе динамической аналогии очага деформации [4]. При этом, обтекающий поток металла рассматривается как вязкопластическая среда (реология), которая размещена в ограниченном пространстве осесимметричного очага деформации, образованном контейнером и оправкой заданных геометрических размеров (рис. 2).

Следовательно, в рамках принятой вязко-пластичной реологии рабочей среды и динамической модели технологического процесса удобно воспользоваться цилиндрической системой координат и уравнениями Навье – Стокса [4]. После отбрасывания конвективных членов, дифференциальные уравнения Навье – Стокса для осесимметричной динамической модели процесса прошивки можно записать в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p}{\partial r} = \mu \left(\nabla^2 v_r - \frac{v_r}{r^2} \right); \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \nabla^2 v_x, \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ (3) – обобщенный оператор Лапласа; μ –

коэффициент "вязкости" рабочей среды (металла); p – давление металла в очаге деформации; v_r, v_x – соответственно радиальная и осевая составляющая скорости движения металла (рабочей среды) в очаге деформации.

Коэффициент "вязкости" рабочей среды в данной постановке задачи определяется графическим дифференцированием механических характеристик прошиваемого металла в напряженно-деформированном состоянии.

Уравнение неразрывности при движении потока прошиваемого металла между контейнером и оправкой, в принятой постановке задачи с осесимметричной динамической моделью "вязкой" рабочей

среды, записывается в форме

$$\frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial(rv_x)}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

В уравнениях (1), (2) и уравнении неразрывности потока металла (4) следует учесть, что осевая составляющая скорости движения металла намного превышает радиальную составляющую $v_r \ll v_x$,

следовательно, можно принимать $v_r = 0$; $\frac{\partial(v_r)}{\partial x} = 0$. Это связано с существующими ограничениями очага деформации по границам контейнера и оправки.

Если оправку прошивного пресса в обтекающем потоке прошиваемого металла считать относительно «тонкой» ($R/l \ll 1$), то можно предположить $v_x = U(x, r)$, что $\frac{\partial(U(x, r))}{\partial x} \ll \frac{\partial(U(x, r))}{\partial r}$.

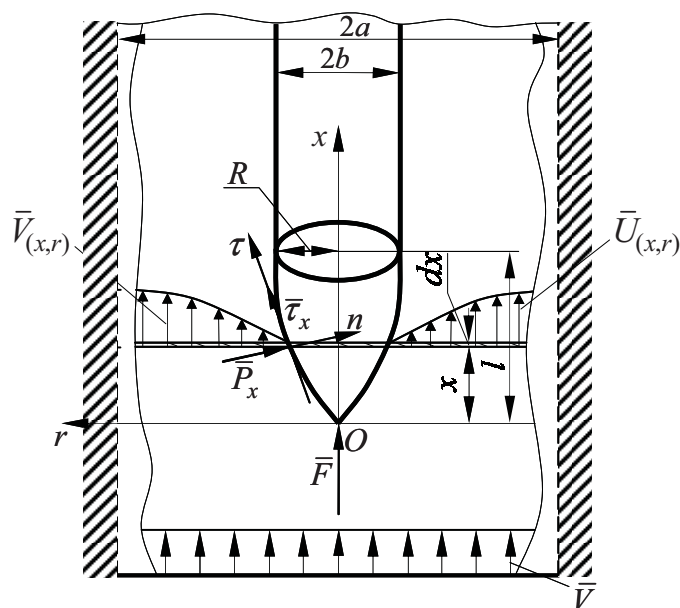


Рисунок 2 - Расчетная схема процесса прошивки трубной заготовки и обтекания оправки потоком металла при прошивке

Тогда дифференциальные уравнения (1) и (2), в рамках реологии рабочей среды и предложенной динамической модели, запишутся в виде преобразований Пуазейля [5]

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial r} = 0; \\ \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} \right), \end{cases} \quad (5)$$

где $U(x, r)$ – осевая составляющая скорости течения металла в очаге деформации.

Для удобства решения задачи на базе динамической аналогии процесса прошивки систему уравнений (5) представим в безразмерной форме

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{r}}, \quad (6)$$

где $\bar{r} = r/a$; $\bar{x} = x/a$; $\bar{p} = \frac{pa}{\mu v}$; $\bar{U} = \frac{U}{v}$ – соответствующие безразмерные параметры уравнения (6) и очага деформации в процессе прошивки; v – постоянная осевая составляющая скорости движения металла; a – радиус контейнера прошивного прессы.

Интегрируя дифференциальное уравнение (6), согласно [4], получим выражение

$$\bar{U}(\bar{x}, \bar{r}) = \frac{1}{4} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \bar{r}^2 + c_1(\bar{x}) + c_2(\bar{x}) \ln \bar{r}, \quad (7)$$

где $c_1(\bar{x})$ и $c_2(\bar{x})$ – параметры интегрирования задачи.

Воспользуемся соответствующими граничными условиями задачи в очаге деформации в виде характерных условий взаимодействия металла с контейнером и оправкой на соответствующих границах в процессе прошивки

$$\bar{U}|_{\bar{r}=1} = 1; \quad \bar{U}|_{\bar{r}=\bar{R}(\bar{x})} = 0, \quad (8)$$

где $\bar{R}(\bar{x})$ – уравнение поверхности образующей оправки.

Из уравнения (7), используя условия взаимодействия прошиваемого металла с технологическими инструментами (8) (контейнером и оправкой), соответственно определяем $c_1(\bar{x})$ и $c_2(\bar{x})$ в виде

$$\begin{aligned} c_1(\bar{x}) &= 1 - \frac{1}{4} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}}; \\ c_2(\bar{x}) &= \frac{1}{4 \ln \bar{R}(\bar{x})} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} [1 - \bar{R}^2(\bar{x})]. \end{aligned} \quad (9)$$

Для определения градиента давления воспользуемся уравнениями неразрывности потока металла в очаге деформации прошивного прессы в форме постоянства расхода рабочей среды. Учитывая условия течения металла между контейнером и оправкой в очаге де-

формации, для процесса прошивки уравнение неразрывности потока металла можно записать в следующей безразмерной форме

$$\int_{\bar{R}(\bar{x})}^1 2\bar{U}r d\bar{r} = 1. \quad (10)$$

Произведя подстановки и ряд необходимых преобразований, из уравнения (10) с учетом (9) находим градиент давления в очаге деформации

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} = \frac{f_1[\bar{R}(\bar{x})]}{f_2[\bar{R}(\bar{x})]}, \quad (11)$$

$$\text{где } f_1[\bar{R}(\bar{x})] = 2\bar{R}(\bar{x}) - 1; \quad (12)$$

$$f_2[\bar{R}(\bar{x})] = \frac{1 - \bar{R}^4(\bar{x})}{8} - \frac{1 - \bar{R}(\bar{x})}{2} \left[\frac{1 - \bar{R}^3(\bar{x}) - \frac{1}{\ln \bar{R}(\bar{x})}}{4\bar{R}(\bar{x}) \ln \bar{R}(\bar{x})} \right] \cdot [0,5 + \bar{R}^2(\bar{x}) [\ln \bar{R}(\bar{x}) - 0,5]].$$

Интегрируя выражение (11), с известными граничными условиями задачи $\bar{p}|_{\bar{x}=\bar{l}} = 0$, для устойчивого квазистационарного технологического процесса прошивки, запишем интегральное уравнение для определения безразмерного давления в рассматриваемом сечении \bar{x} очага деформации

$$\bar{p}(\bar{x}) = - \int_{\bar{x}}^{\bar{l}} \frac{f_1[\bar{R}(\bar{x})]}{f_2[\bar{R}(\bar{x})]} d\bar{x}. \quad (13)$$

Опираясь на ранее принятые условия течения металла в очаге деформации прошивного пресса, касательное напряжение в рамках гидродинамической модели и принятой реологии процесса обтекания оправки потоком рабочей среды (горячего металла) определяем, согласно [5], из закона вязких трений (закона Ньютона)

$$\tau(r, x) = \mu \left. \frac{\partial U(r, x)}{\partial r} \right|_{r=R(x)}. \quad (14)$$

Следовательно, при определенных граничных условиях взаимодействия экспандера с обтекающим потоком горячего металла (вязкой среды) в процессе прошивки, имеем

$$\bar{\tau} = \frac{\tau a}{\mu V} \text{ или } \bar{\tau} = \left. \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{r}} \right|_{\bar{r}=\bar{R}(\bar{x})} \quad (15)$$

Используя выражение (7), находим касательное напряжение на рабочей поверхности оправки ($\bar{r} = \bar{R}(\bar{x})$) в рассматриваемом сечении \bar{x}

$$\bar{\tau}(x) = \frac{1}{2} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} \bar{R}(\bar{x}) + c_2(\bar{x}) \frac{1}{\bar{R}(\bar{x})}. \quad (16)$$

После подстановки параметров интегрирования (9) и градиента давления (11) в уравнение (16) и незначительных преобразований окончательно найдем касательное напряжение на рабочей поверхности оправки

$$\bar{\tau}(x) = \frac{1}{2} \frac{f_1[\bar{R}(\bar{x})]}{f_2[\bar{R}(\bar{x})]} \bar{R}(\bar{x}) + \left[\frac{1}{4 \ln \bar{R}(\bar{x})} \frac{f_1[\bar{R}(\bar{x})]}{f_2[\bar{R}(\bar{x})]} \left[1 - \bar{R}^2(\bar{x}) \right] - \frac{1}{\ln \bar{R}(\bar{x})} \right] \frac{1}{\bar{R}(\bar{x})}. \quad (17)$$

Осевое сопротивление оправки (усилие прошивки) на прошивном прессе с учетом динамической модели процесса определяется из условия ее взаимодействия с обтекающим сплошным потоком металла в очаге деформации

$$F = \int_0^{\ell} 2\pi R(x) R'(x) p(x) dx + \int_0^{\ell} 2\pi R(x) \tau(x) dx. \quad (18)$$

Для удобства решения задачи воспользуемся ранее принятыми безразмерными параметрами задачи. После подстановки (11) и (17) в выражение (18) осевое сопротивление оправки представим в безразмерной форме

$$\bar{F} = - \int_0^{\ell} \bar{R}(\bar{x}) \bar{R}'(\bar{x}) \left[\int_{\bar{x}}^{\ell} \frac{f_1[\bar{R}(\bar{x})]}{f_2[\bar{R}(\bar{x})]} d\bar{x} \right] d\bar{x} + \int_0^{\ell} \left[\frac{1}{2} \frac{f_1[\bar{R}(\bar{x})]}{f_2[\bar{R}(\bar{x})]} \bar{R}(\bar{x}) + \left[\frac{1}{4 \ln \bar{R}(\bar{x})} \frac{f_1[\bar{R}(\bar{x})]}{f_2[\bar{R}(\bar{x})]} \left[1 - \bar{R}^2(\bar{x}) \right] - \frac{1}{\ln \bar{R}(\bar{x})} \right] \frac{1}{\bar{R}(\bar{x})} \right] d\bar{x}. \quad (19)$$

Сходимость выражения (19) обеспечивается тем, что соблюдаются основные условия сходимости отдельных слагаемых. Условия сходимости осевого сопротивления выражения (19) указывает на то, что параметры процесса прошивки в рассматриваемом сечении \bar{x} очага деформации устойчивы.

Осевое сопротивление оправки (экспандера) в потоке проши-

ваемого металла окончательно определяется

$$F = 2\pi\mu\nu a\bar{F}. \quad (20)$$

Далее, в первом приближении, для наиболее распространенных условий эксплуатации прошивного прессы, задаваясь определенной формой образующей оправки, находим характер распределения энергосиловых параметров в очаге деформации. Кривые, приведенные на рис.3, для некоторых наиболее распространенных или характерных форм образующих оправки диаметром 100 мм, обуславливают распределение давления и касательных напряжений в очаге деформации и их изменение по всей длине рабочей поверхности образующих, как оправки, так и контейнера прошивного прессы.

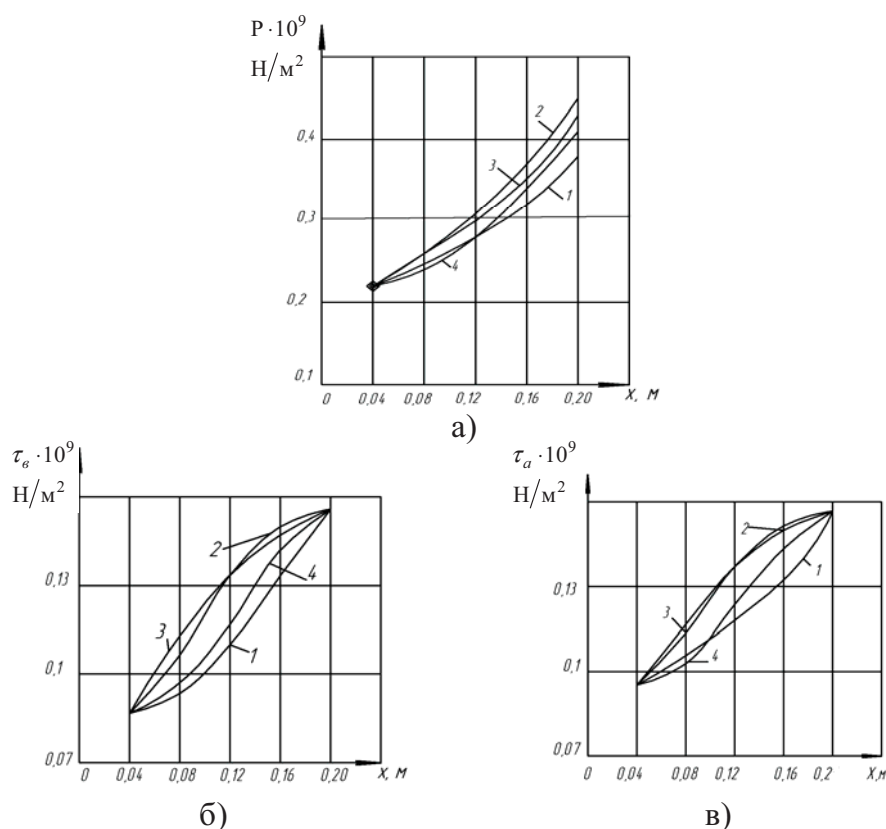


Рисунок 3 - Распределение давление металла и касательных напряжений в очаге деформации в процессе прошивки (экспандирования) круглых заготовок на прошивном прессы (заготовка ш230, материал 12X18H10T): а) распределение давления в очаге деформации; б) распределение касательных напряжений на поверхности оправки; в) распределение касательных напряжений на поверхности контейнера (формы образующей оправки: 1–конус; 2–парабола; 3–тор; 4–кубическая парабола)

Результаты исследования показывают, что оправки диаметром 100 мм с формой образующей, соответствующей кубической параболе, при прочих равных условиях, обеспечивают рациональное распределение давления металла и касательных напряжений по всей длине очага деформации в процессе экспандирования гильзы. Необходимо отметить, что через определенное время эксплуатации конической оправки, образующая ее рабочей поверхности приобретает "бутылочнообразную" форму, которая по картине износа идентифицируется с некоторой кривой, приближенно совпадающей с кубической параболой. Очевидно, образующая рабочей поверхности оправки с течением времени приспособляется к реальным условиям прошивки. Полученные результаты удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными, приведенными в работах [2; 4].

Путем моделирования процессов прошивки трубной заготовки удается спроектировать оправки рациональной формы. В первом приближении путем подбора параметров и формы образующей оправки минимизируем ее осевое сопротивление обтекающему потоку металла. Например, для заданной формы образующей оправки удобно минимизировать осевую составляющую усилия прошивки \bar{F} длиной оправки ℓ , поскольку радиус калибрующего пояса рабочей поверхности оправки R известен из условия необходимости образования полых гильз с требуемыми геометрическими размерами. Такой подход приводит к увеличению расчетной длины оправки, что обуславливает нарушение стабильности очага деформации. При этом, одновременно с минимизацией функционала осевого сопротивления оправки потоку прошиваемого металла достигнуто заметное повышение устойчивости процесса прошивки, что приводит к заметному снижению разностенности гильз.

Уточнение решения задачи по оптимизации очага деформации возможно с применением одного из известных методов (метод Гаусса-Зейделя, Эйлера и др.). При этом из условия минимума осевого сопротивления оправки (экспандера) в очаге деформации определяем рациональную форму образующей ее рабочей поверхности (рис. 4). Повышение эксплуатационной стойкости и снижение потребления дорогостоящих технологических инструментов (оправок или экспандеров) обеспечивается рациональным распределением энергосиловых параметров прошивки в очаге деформации и оптимизацией формы

образующей рабочей поверхности.

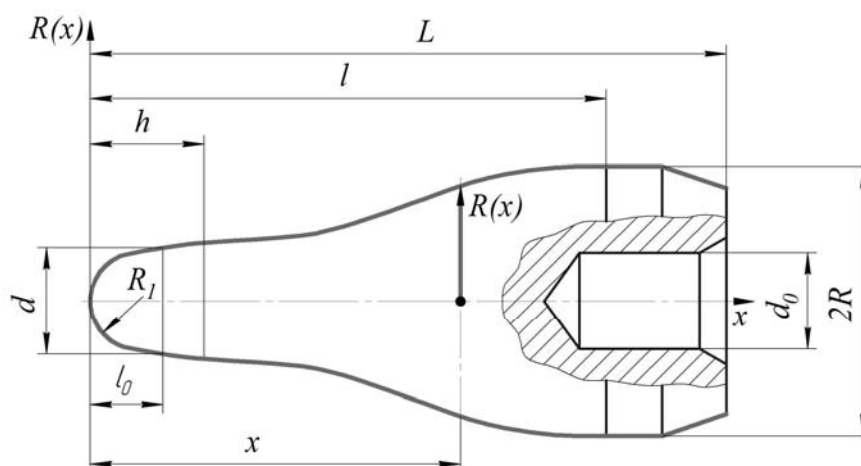


Рисунок 4 - Экспандер прошивного пресса рациональной калибровки

Следует подчеркнуть, что путем моделирования необходимых условий течения металла в очаге деформации, на соответствующем этапе проектирования технологического процесса, назначаются рациональные режимы (устойчивые условия) прошивки трубных заготовок в гильзы заданных размеров на прошивном прессе.

Выводы

1. На основе фундаментальной теории гидродинамической аналогии и принятой реологии прошиваемого металла предложена обобщенная математическая модель процесса прошивки заготовки или экспандирования гильз на прошивном прессе.

2. Определены энергосиловые параметры процесса прошивки для условий осесимметричного очага деформации: давление металла, касательные напряжения и осевое сопротивление оправки потоку прошиваемого металла.

3. Установлен функционал осевого сопротивления оправки обтекающему потоку металла, что позволило моделировать и обеспечить необходимые условия реализации устойчивых технологических процессов на прошивном прессе.

4. Из условия минимума функционала осевого сопротивления оправки обтекающему потоку металла определена рациональная форма образующей рабочей поверхности оправки (калибровка экспандера).

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Горячая прокатка и прессование труб. – М.: Металлургия, 1972. – 576 с.
2. 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.
3. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
4. Борисов С.И., Притоманов А.Е. Аналитический метод определения усилия при прессовании стальных труб. – В кн. Инженерные методы расчета технологических процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургиздат. 1964. С.350-355.
5. Колмогоров Г.Л., Мельников Т.Е. Вопросы гидродинамической смазки при прессовании материалов жидкостью высокого давления. – Физика и техника высоких давлений. 1981, №3. С. 91-96.
6. Гуляев Ю. Г. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением./ Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А., Губинский А.В.// – Киев. Наукова думка, 1986. – 240 с.