

## К ВОПРОСУ КАЛИБРОВКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА ПРОШИВНОГО ПРЕССА ТРУБОПРЕССОВОЙ ЛИНИИ

*Разработана математическая модель процесса прошивки и экспандирования трубной заготовки на прошивном прессе трубопрессовой линии. Рассмотрено стационарное осесимметричное течение металла (рабочей среды) между втулкой контейнера, оправкой или экспандером в процессе прошивки или экспандирования трубной заготовки. Установлена закономерность распределения давления металла на оправку или экспандер с учетом условий функционирования в очаге деформации. Сформирован функционал осевого сопротивления оправки или экспандера потоку металла при реализации процессов прошивки или экспандирования трубной заготовки. Из условия минимизации функционала осевого сопротивления оправки или экспандера в потоке металла установлена оптимальная форма (калибровка) их образующих.*

**Ключевые слова:** пресс, трубная заготовка, прошивка, оправка, экспандер, металл, рабочая среда, труба, гипотеза Стокса, давление, математическая модель, сила осевого сопротивления, функционал, вариация, задача Эйлера, минимизация, оптимизация, калибровка.

*The mathematical model of process of an insertion and expansion of pipe preparation on a parsing press of the parsing line is developed. The ax symmetric current of metal (working environment) between the container plug, a mandrel or an expander is considered. Consistent pattern of distribution of pressure of metal upon a mandrel or an expander taking into account operating conditions in the deformation center is determined. The functionality of axial resistance of a mandrel or expander to a channel of metal at realization of processes of an insertion or expansion of pipe preparation is created. From a condition of minimization of functionality of axial resistance of a mandrel or an expander in a stream of metal the optimum form (calibration) them forming is established.*

**Keywords:** press, pipe preparation, insertion, mandrel, expander, metal, working environment, pipe, Stokes's hypothesis, pressure, mathematical model, force of axial resistance, functionality, variation, Euler's task, minimization, optimization, calibration.

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

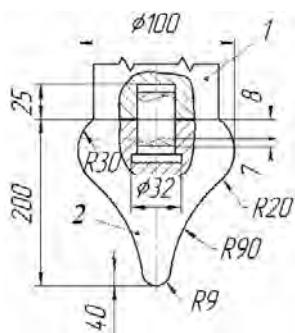
Условия функционирования оборудования для производства бесшовных стальных труб прессованием и особенности реализации современных технологических процессов на прессовой линии установили определенные приоритеты в данном направлении. При этом, повышение эффективности операций прошивки или экспандирования трубной заготовки путем совершенствования технологических процессов и модернизации оборудования прошивного пресса выдвигают ряд актуальных задач. К ним относятся: выбор рациональных решений, связанных с оптимизацией качества прессованных бесшовных труб; отработка технологических рациональных характеристик; прогнозирование

показателей стойкости технологического инструмента и надежности функционирования оборудования трубопрессовой линии. Данные вопросы требуют кардинально нового подхода к рассматриваемой задаче калибровки оправки или экспандера, как базового технологического инструмента.

Очевидно, что разработка существующих и прогнозирование возможностей новых технологических процессов производства прессованных 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 линий (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 прошивке или экспандировании трубных заготовок 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 приводят к повышению эксплуатационной стойкости технологических инструментов при производстве высококачественных труб.

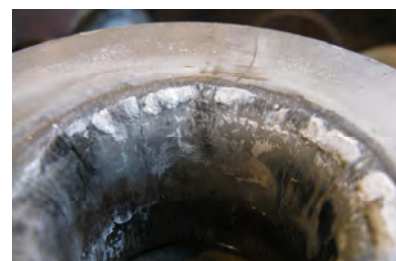
Отметим, что вследствие несовершенства формы образующей рабочей поверхности оправки или экспандера в процессе прошивки или экспандирования трубной заготовки обтекающим потоком горячего металла он подвергается интенсивному износу. Это, преимущественно, приводит к существенному увеличению силы технологического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



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Экспандер а), картины износа экспандера б), и втулки контейнера в) прошивного пресса 12 МН фирмы SMS MEER: 1 – игла; 2 – экспандер

Очевидно, что в данном случае, на передний план выдвигается проблема оптимизации процесса прошивки или экспандирования, путем выбора рациональных параметров базового технологического процесса и инструментов, что неразрывно связано с развитием фундаментальных методов исследования очага деформации [1-3]. Отметим, что нарушение проектных размеров полученных гильз вызвано, в основном, изменением геометрических размеров оправки или экспандера в результате интенсивного их износа и дальнейшего ухода инструмента от оси втулки контейнера прессы.

**Постановка задачи.** Реализация устойчивых процессов прошивки или экспандирования 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 [1-4].

Задача выбора параметров технологического инструмента для прошивки или экспандирования трубных заготовок в общем плане с применением теоретических методов расчета калибровки изучена недостаточно и в базовом варианте статических задач изложена всего в нескольких работах [1-3]. В существующей литературе отсутствуют строгие математические модели (без учета динамики) и однозначные рекомендации по выбору рациональных геометрических параметров технологического инструмента (калибровка оправки или экспандера).

Характерно то, что, при отработке конкретных режимов прошивки или экспандирования на этапе проектирования технологических процессов возникают определенные трудности, обусловленные особенностями функционирования самой оправки или экспандера в очаге деформации.

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка рекомендаций при реализации устойчивого технологического процесса прошивки или экспандирования трубной заготовки на прошивном прессе трубопрессовой установки путем выбора рациональных параметров оправки или экспандера, решением оптимизационной задачи по минимизации функционала осевого сопротивления инструмента в потоке металла.

**Метод решения задачи.** 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. При этом в основу динамического моделирования очага деформации с принятой реологией рабочей среды положены динамические процессы при прошивке трубной заготовки. Данная методика расчета особенно эффективна при высокоскоростной прошивке трубной заготовки на прошивном прессе. В этом случае требуется установить соответствие предложенной реологии рабочей среды и динамической модели, физическим и граничным условиям процесса

прошивки или экспандирования на прошивном прессе трубопрессовой установки.

Очаг деформации прошивного пресса и соответствующие динамические процессы прошивки сплошной или экспандирования сверленной трубной заготовки в гильзы требуемых размеров в дальнейшем моделируем на основе динамической аналогии очага деформации [3]. При этом, обтекающий поток металла рассматривается как вязкопластическая среда (принятая в данном случае реология), которая размещена в ограниченном пространстве осесимметричного очага деформации, образованном контейнером и экспандером заданных геометрических размеров (рис. 2).

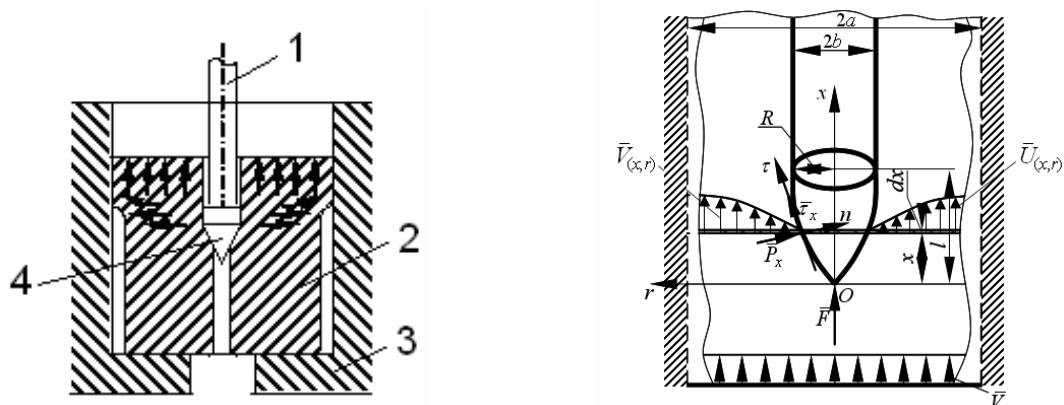
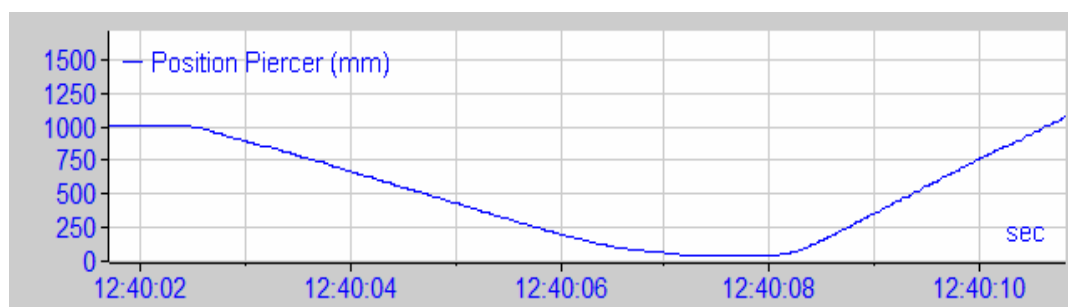
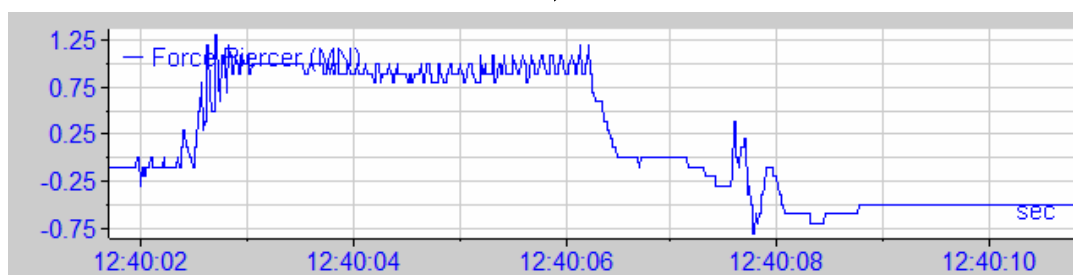


Рисунок 2 – Процесс экспандирования или прошивки трубной заготовки и расчетная схема обтекания оправки или экспандера потоком металла на прошивном прессе трубопрессовой линии:  
 1 – игла (стержень) 2 – трубная заготовка;  
 3 – втулка контейнера; 4 – экспандер

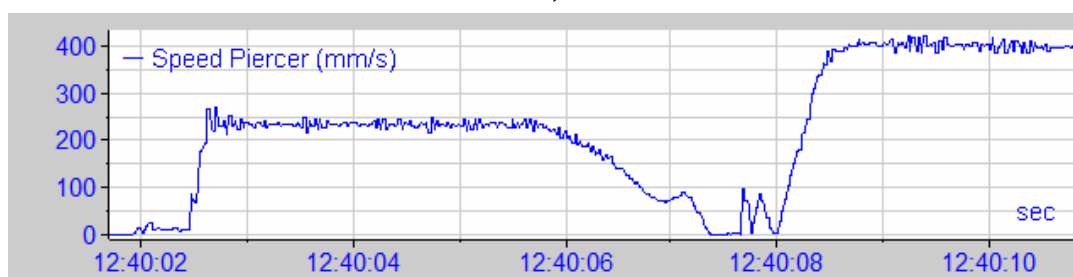
Используя результаты ряда экспериментальных исследований [1-3] и систему прямой диагностики прошивного пресса 12 МН фирмы SMS MEER трубопрессовой установки с применением стандартного программного продукта «ANALIZER» установим зависимость энергосиловых параметров процесса (силы технологического сопротивления) от скорости прошивки трубной заготовки (рис. 3). Идентификацией результатов имеющихся экспериментальных данных методами математической статистики установлена зависимость между давлением в очаге деформации и скоростью прошивки трубной заготовки, в виде достаточно хорошо коррелируемой функции  $p = f(v)$ .



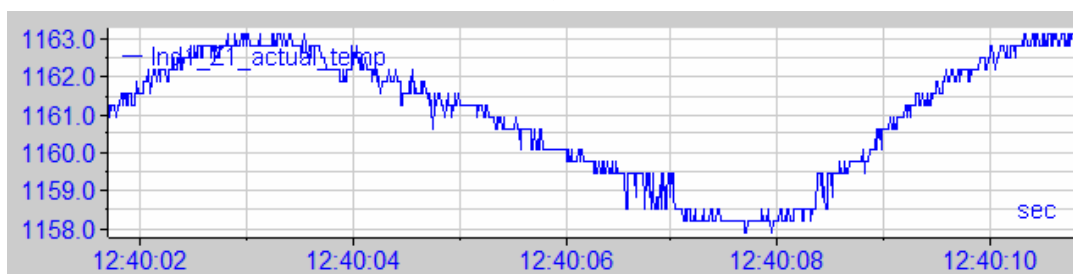
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Осциллограммы процесса экспандирования сверленной трубной заготовки на прошивном прессе 12 МН фирмы SMS MEER трубопрессовой линии (заготовка диам. 180 мм, материал 12Х18Н10Т, экспандер диам. 90 мм): а – ход ползуна; б – сила экспандирования; в – скорость экспандирования; г – температура заготовки в контейнере пресса

Следовательно, в рамках известной вязкопластичной реологии рабочей среды и динамической модели технологического процесса прошивки или экспандирования трубной заготовки, удобно воспользоваться цилиндрической системой координат. После отбрасывания второстепенных слагаемых, уравнение для определения давления металла при обтекании оправки или экспандера потоком металла (трубной заготовки) и принятой модели рабочей среды в постановке базовой теоремы Эйлера и гипотезы Стокса, согласно [3, 6], можно записать в виде:

$$p = \psi v^2 \sin(\theta). \quad (1)$$

Здесь  $\psi$  – коэффициент осевого сопротивления прошиваемого сплошного или расширяемого металла;  $v$  – скорость относительного движения металла при обтекании оправки или экспандера в процессе прошивки или расширения трубной заготовки;  $\theta$  – угол между вектором скорости потока металла и ее тангенциальной составляющей на рабочей поверхности оправки или экспандера

Коэффициент осевого сопротивления экспандера потоку прошиваемого металла определяется эмпирически с учетом всех его термомеханических характеристик среды в виде:

$$\psi = \frac{\sigma_t}{u^2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_t$  – действительный предел текучести металла при данной температуре трубной заготовки;  $u$  – скорость деформации металла в очаге деформации соответствующая скорости прошивки инструментом

В силу того, что давление металла направлено перпендикулярно (по нормали) ко всем точкам рабочей поверхности оправки или экспандера, находим составляющую силы прошивки по оси прошивки  $Ox$ . Исходя из принятой расчетной схемы составляющую элементарной силы, действующую на кольцо шириной  $\sqrt{1 + (f')^2} dx$  и радиусом  $f(x)$  в проекции на ось  $Ox$  находим в виде

$$dF = p \left[ 2\pi f \sqrt{1 + (f')^2} \right] \sin(\theta) dx. \quad (3)$$

При этом полная сила прошивки (осевое сопротивление), действующая на оправку или экспандер в положительном направлении оси прошивки  $Ox$ , равна

$$F = \int_0^{\ell} \psi v^2 \sin^3(\theta) \left[ 2\pi f \sqrt{1 + (f')^2} \right] dx \quad (4)$$

Чтобы упростить решение вариационной задачи о минимизации функционала осевого сопротивления оправки или экспандера в потоке металла предположим, что угол между скоростью потока металла и ее тангенциальной составляющей мал. Тогда заменив  $\sin(\theta)$  в выражении (4) на  $\sin(\theta) = f' / \sqrt{1 + (f')^2} \approx f'$  запишем окончательное выражение для определения осевого сопротивления оправки или экспандера в потоке металла в виде

$$F = 2\pi\psi v^2 \int_0^{\ell} (f')^3 f dx. \quad (5)$$

Используя выражение (5), далее переходим к определению оптимальной формы образующей оправки или экспандера движущегося в потоке металла с наименьшим осевым сопротивлением, путем применения фундаментальных вариационных принципов и решения оптимизационной задачи Эйлера [5-8]. Из полученного следует, что сила осевого

сопротивления оправки или экспандера в потоке металла не зависит явно от координаты  $x$ , т.е. строго является функцией  $F = F(f, f')$ . Очевидно, что в этом случае уравнение Эйлера, согласно [5], принимает вид

$$F_f - F_{ff}f' - F_{fff}f'' = 0. \quad (6)$$

Умножив обе части уравнения (6) на  $f'$ , исходя из того, что в левой части получаем точную производную всего, т.е.

$$\frac{d}{dx}(F - f'F_f) = 0, \quad (7)$$

откуда интегрируя (7), имеем

$$F - f'F_f = C, \quad (8)$$

где  $C$  – произвольная постоянная

Отметим, что уравнение (8) может быть интегрировано путем разрешения относительно  $f'$  и разделения переменных или путем введения вспомогательного параметра. Следовательно, уравнение Эйлера для принятой модели очага деформации и функционала осевого сопротивления оправки или экспандера потоку металла (5) имеет вид

$$(f')^3 - 3 \frac{d}{dx}(f(f')^2) = 0 \quad (9)$$

Формируем необходимые и достаточные граничные условия для базовой задачи Коши в виде заданных геометрических параметров экспандера

$$f(0) = 0 \text{ и } f(\ell) = R,$$

где  $R$  – радиус цилиндрического пояска оправки или экспандера;  $\ell$  – длина рабочего участка оправки или экспандера

Исходя из постановки задачи и принятых граничных условий задачи частное решение  $f = 0$  уравнения (9) не приемлемо.

Для удобства уравнение (9) представим в виде

$$(f')^3 + 3f f' f'' = 0 \quad (10)$$

Умножая обе части (10) на  $f'$ , замечаем, что левая часть полученного уравнения есть нечто иное, как  $[(f')^3 f]'$ . Интегрируя полученное, находим

$$(f')^3 f = \tilde{C}_0 \quad (11)$$

Для удобства и повторного интегрирования, выражение (11) приводим к следующему виду

$$f' = \frac{\tilde{C}_0}{\sqrt[3]{f}} \quad (12)$$

Откуда окончательно находим функцию образующей рабочей поверхности экспандера в виде

$$f = (C_1 x + C_2)^{3/4}. \quad (13)$$

Исходя из заданных граничных условий задачи, находим постоянные интегрирования задачи  $C_1$  и  $C_2$ .

$$C_1 = \frac{R^{4/3}}{\ell}; \text{ и } C_2 = 0 \quad (14)$$

После подстановки постоянных интегрирования задачи (14) в уравнение (13) окончательно определяем уравнение образующей оправки или экспандера минимального осевого сопротивления в потоке металла и оптимальной формы с заданными граничными точками в виде

$$f(x) = R\left(\frac{x}{\ell}\right)^{3/4} \quad (15)$$

Из уравнения (14) следует, что оптимальной калибровкой рабочего участка оправки или экспандера является парабола степени 3/4. Оправка или экспандер рациональной калибровки является осесимметричным телом и обладает минимальным осевым технологическим сопротивлением в обтекающем потоке металла.

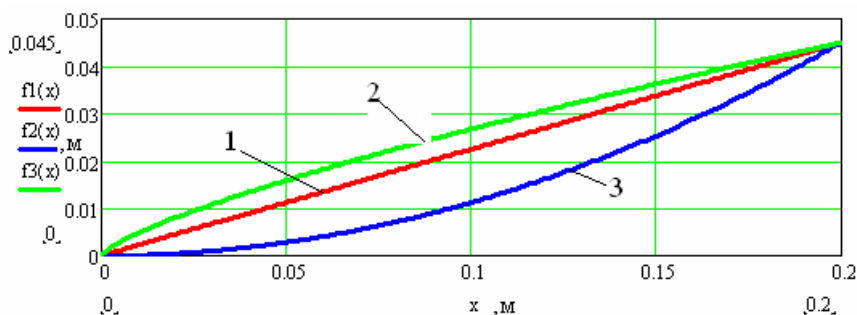


Рисунок 4 – Различные возможной калибровки рабочего участка экспандера:  
1 – конус; 2 – парабола; 3 – параболе степени 3/4

Результаты исследования прошивного пресса 12 МН фирмы SMS MEER трубопрессовой линии показывают, что оправка или экспандер диаметром 90 мм с формой образующей, соответствующей параболе степени 3/4 согласно (15), при прочих равных условиях, в процессе прошивки или экспандирования трубной заготовки в гильзы заданных размеров обеспечивает рациональное распределение давления металла по всей длине очага деформации. Обеспечение стационарных условий реализации технологического процесса прошивки или экспандирования трубной заготовки строго основана на постановке и решении фундаментальной вариационной задачи по минимизации функционала осевого сопротивления оправки или экспандера в непрерывном потоке металла (среды).

Опыт эксплуатации прошивного пресса 12 МН трубопрессовой линии фирмы SMS MEER показывает, что через определенное время эксплуатации, в большинстве случаев образующая рабочей поверхности оправки или экспандера приобретает криволинейную форму, которая по картине износа идентифицируется с некоторой кривой, приближенно совпадающей с параболой (15). Очевидно, образующая рабочей поверхности оправки с течением времени приспособляется к реальным условиям прошивки или экспандирования трубной заготовки.



Результаты расчета силы экспандирования трубной заготовки согласно (5) с учетом (15) совпадают с результатами диагностики и экспериментальными данными, приведенными в работе [8], для прошивного пресса 12 МН фирмы SMS MEER трубопрессовой линии. Отклонения расчетной и экспериментальной величин осевого сопротивления экспандера диаметром 90 (осциллограмма рис. 5) в потоке металла в пределах доверительного интервала (3-5%).

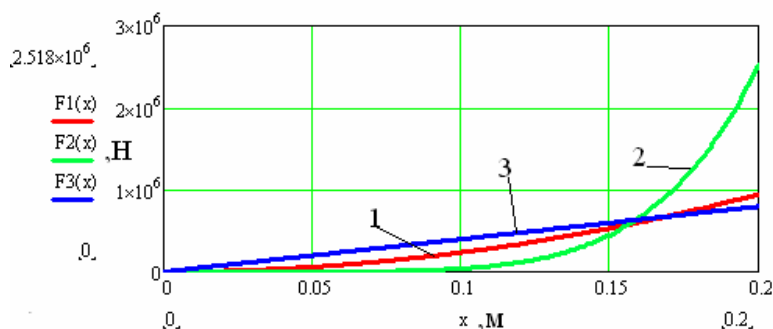


Рисунок 5 – Силы осевого технологического сопротивления экспандера в обтекающем потоке металла при различных калибровках рабочего участка:  
 1 – конус ( $F1(0.2) = 9,994 \times 10^5$ , Н); 2 – парабола ( $F2(0.2) = 2,518 \times 10^6$ , Н);  
 3 – параболе степени 3/4 ( $F3(0.2) = 7,98 \times 10^5$ , Н)

Данный подход к вопросу калибровки предполагает некоторое увеличение расчетной длины экспандера диаметром 90, что обуславливает стабильные условия для формирования очага деформации. Одновременно путем минимизации функционала осевого сопротивления экспандера в потоке металла достигнуто заметное повышение устойчивости процесса экспандирования трубной заготовки, что приводит к заметному снижению разностенности гильз и в конечном итоге к повышению качества готовых труб. Следует подчеркнуть, что путем численного моделирования необходимых условий течения металла в очаге деформации, на соответствующем этапе проектирования (калибровки) технологических процессов на прошивном прессе, назначаются рациональные режимы (устойчивые условия) прошивки или экспандирования трубных заготовок в гильзы заданных размеров.

Повышение эксплуатационной стойкости и снижение потребления дорогостоящих технологических инструментов (экспандера и втулок контейнера) обеспечивается рациональной калибровкой (оптимизацией формы образующей рабочей поверхности) экспандера и оптимальным распределением энергосиловых параметров прошивки в очаге деформации.

### Выводы

На базе динамической аналогии процесса и принятой реологии прошиваемого металла предложена математическая модель определения силы осевого сопротивления оправки или экспандера потоку металла в процессе прошивки трубной заготовки на прошивном прессе. Установлена зависимость между давлением металла и скоростью движения оправки или

экспандера в потоке прошиваемого металла. В рамках осесимметричного очага деформации определена сила осевого сопротивления оправки или экспандера потока металла в процессе прошивки трубной заготовки: Определен функционал осевого сопротивления оправки или экспандера обтекающему потоку металла. Решена вариационная задача по минимизации функционала осевого сопротивления оправки или экспандера в потоке прошиваемого металла. Из условия минимизации функционала осевого сопротивления оправки или экспандера в обтекающем потоке металла определена оптимальная форма образующей рабочей поверхности оправки или экспандера (калибровка). Полученные данные позволяют моделировать и обеспечить оптимальные условия реализации устойчивых технологических процессов на прошивном прессе трубопрессовой линии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
3. 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.
4. Гуляев Ю. Г. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением./ Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А., Губинский А.В.// – Киев. Наукова думка, 1986. – 240 с.
5. Цлаф Л.Я. Вариационное исчисление и интегральные уравнения – М.: Наука, 1974. – 479 с.
6. Краснов М.Л. Вариационное исчисление/М.Л. Краснов, Г.И. Макаренко, А.И. Киселев// – М.: Главная ред. физико-математической литературы, 1973. – 191с.
7. Бердичевский В.Л. Вариационные принципы механики сплошной среды. М.: Наука, 1983. – 448 с.
8. Рахманов С.Р., Гоман О.Г. Динамические процессы при прошивке трубной заготовки на прессе // Сталь, №6, 2010. С.73 – 78.