

УДК621.774.001(075.8)

Рахманов С.Р., Данченко В.Н.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ КАЛИБРОВКИ ОПРАВОК И ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРОШИВНОГО СТАНА ТРУБОПРОКАТНОГО АГРЕГАТА

Решена задача по рациональному проектированию и калибровке образующей рабочей поверхности оправок прошивного стана. Из условия минимума функционала осевого сопротивления сформулированы оптимальные условия функционирования оправки в процессе прошивки в постановке задачи Эйлера.

Розв’язана задача з раціонального проектування та калібровки твірної робочої поверхні оправок прошивного стана. Виходячи з умови мінімуму функціонала вісьового опору сформульовані оптимальні умови функціонування оправки в процесі прошивання у постановці задачі Ейлера.

The problem in the rational design and grooving the generatrix of the working surface of the piercing mill mandrels had been solved. The optimal conditions of the mandrel functioning in the piercing process had been formulated from condition of the minimum of the axial resistance of the functional in the formulation of the Euler problem.

Введение

Повышение износостойкости оправок и качества прокатываемых труб достигается путем создания рационального инструмента. Данная задача строится на базе существующего технологического процесса прошивки и является весьма актуальной.

Оправки прошивных станов винтовой прокатки бесшовных труб включают последовательно расположенные вдоль оси прошивки носик, профилированную рабочую поверхность с переходом на конус, цилиндрический поясok и коническую поверхность участка выпуска оправки [1].

По мнению авторов, калибровка, применяемая для технологического инструмента, при некотором одновременном улучшении условий в очаге деформации в процессе прошивки, не обеспечивает стабилизацию энергосиловых параметров технологического процесса. Кроме этого, оправки, ввиду несовершенства формы образующей рабочей поверхности имеют низкую долговечность.

При эксплуатации большинства отечественных и зарубежных прошивных станов применяется распространенная оправка, выполненная в виде осесимметричного тела.

Калиброванная оправка состоит из цилиндрического центрирующего носика, рабочего участка, профилированного по стационар-

ной сфере, цилиндрического пояса и замыкающего выпускающего конуса [2].

Вследствие несовершенства формы рабочей поверхности оправка, нагруженная со стороны потока обтекающего металла, склонна к повышенному износу, что приводит в ряде случаев к порезам гильз и к образованию плен.

Изношенная оправка при прошивке металла вызывает ассиметричную внешнюю нагрузку в очаге деформации, что приводит к ее уходу от оси прошивки и заклиниванию в металле.

По своей сущности к предлагаемому способу калибровки наиболее близким является калибровка оправки для прошивных станков трубопрокатного агрегата, включающая профилирование калиброванной ее рабочей поверхности. Причем рабочая поверхность оправки калибрована из условия соблюдения постоянства очага деформации по сфере и выполнена с увеличивающимся диаметром в виде осесимметричного тела [3].

Однако, исходя из реальной геометрии очага деформации для реализации устойчивого технологического процесса, ввиду особенности винтовой прокатки, не могут быть использованы оправки, калиброванные на основе принципа постоянства деформации.

При реализации технологического процесса прошивки на изношенных оправках происходит значительное увеличение усилия прошивки, что вызывает усиление колебаний стержня оправки и дальнейшую потерю его устойчивости (рис.1).

Данная работа направлена на повышение эксплуатационной стойкости технологического инструмента и качества прокатываемых труб путем оптимизации геометрических параметров образующей рабочей поверхности оправки. Это достигается тем, что образующая рабочей части и конуса оправки калибрована по одной рациональной кривой переменного увеличивающегося радиуса $R(x)$ по всей длине рабочего участка оправки (вывод формул для рациональных калибровок оправок будет приведен ниже).

Остановимся более подробно на составлении математической модели задачи по калибровке обтекаемой оправки рациональной формы для принятой расчетной схемы согласно рис.1. и рис.2.

Калибровка рабочего участка оправки выполнена на основе следующих предпосылок и рассуждений.

Рассматриваем безотрывное обтекание металлом оправки в процессе прошивки, что дает возможность, исходя из динамической аналогии, определить энергосиловые параметры в очаге деформации. Определение напряженно-деформированного состояния в очаге де-

формации, как на этапе внедрения оправки в сплошную цилиндрическую заготовку, так и в процессе ее прошивки представляется возможным аналитически.

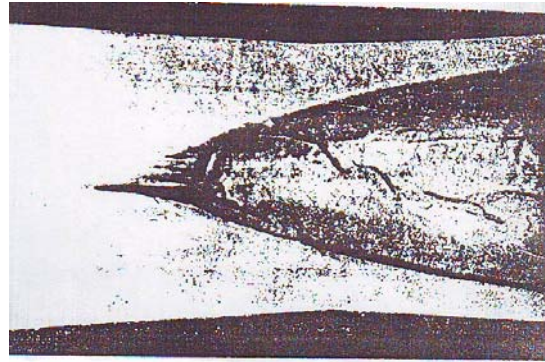


Рисунок 1 - Мгновенный очаг деформации в процессе прошивки на прошивном стане трубопрокатного агрегата согласно[3]

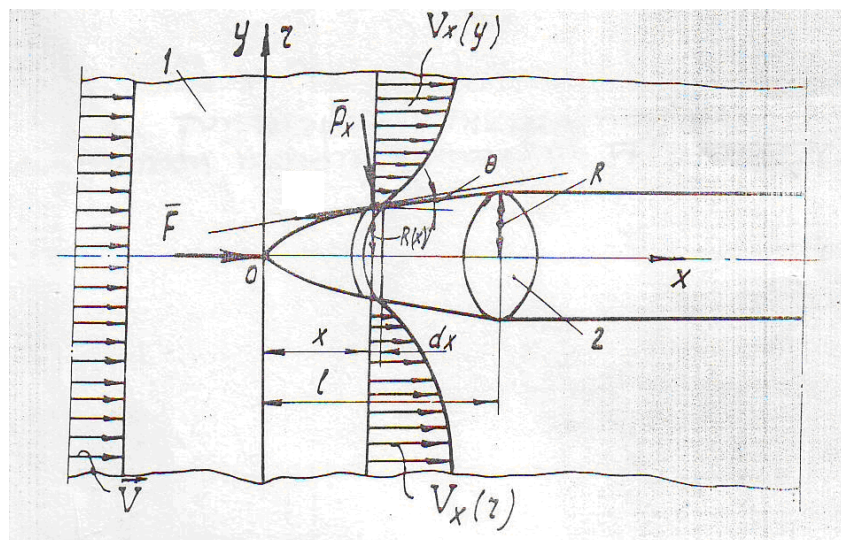


Рисунок 2 - Расчетная схема для составления математической модели и решения задачи по рациональной калибровке оправки

Решение задачи в общем виде возможно получить с применением уравнений сплошной среды и математической физики для вязких, упруго-пластических и вязкопластических моделей очага деформации. Тогда, для пластической области и области с трещинообразованием, в расширенной постановке, решение задачи можно представить на основе рассмотрения динамического равновесия прошиваемого металла в очаге деформации.

Необходимо отметить, что калибровка рабочего участка и конуса оправки неразрывно связана с рассмотрением и решением задачи о движении осесимметричного тела (оправки) в потоке металла. Необ-

ходимо и достаточно, чтобы оправка обладала наименьшим осевым сопротивлением технологической рабочей среде (в металле) в процессе прошивки. Считаем, что оправка не деформируема и, соответственно, механические свойства прошиваемого металла и оправки несоизмеримыми. Из условия зеркального отражения частиц металла (рабочей среды) от поверхности оправки, для нормальной составляющей давления на поверхности оправки, исходя из теоремы Эйлера, согласно результатам работы [4], в рамках рассматриваемой динамической модели задачи имеем следующее выражение:

$$p=2 \psi \rho v I \sin I \theta.$$

Здесь ψ – поправочный коэффициент, учитывающий реальные условия формирования очага деформации, определяемый согласно $\psi=0,85 - 0,96$ [5]; ρ – плотность прошиваемого металла при заданной температуре рабочей среды; v – скорость металла относительно носика оправки в процессе прошивки; θ – угол между полной скоростью рабочей среды(металла) на поверхности оправки и ее тангенциальной составляющей.

Необходимо отметить, что данное выражение хорошо согласуется с аппроксимациями результатов многочисленных экспериментальных исследований [1, 4, 5]. Принимая во внимание то, что полное давление перпендикулярно к рабочей поверхности оправки, для давления металла на оправку (на кольцо бесконечно малой ширины $\sqrt{1+[f'(x)]^2} dx$ и радиуса $r(x)$) получим:

$$dF = 2\psi \rho v I \sin I \theta [2 \pi r(x) \sqrt{1+[f'(x)]^2} dx \sin \theta]. \quad (1)$$

После интегрирования выражения (1) по всей длине рабочей поверхности оправки получим полную силу осевого сопротивления оправки, действующую в положительном направлении оси прошивки:

$$F = \int_0^l 4 \pi \psi \rho v I \sin I \theta r(x) [1+[f'(x)]^2] dx. \quad (2)$$

При некотором упрощенном рассмотрении задачи можно предположить, что для малых углов наклона касательной к оси прошивки θ величина $\sin \theta$ приближенно определяется выражением $f'(x)$.

Тогда осевое сопротивление оправки для квазистационарного процесса прошивки, следовательно, находится в виде:

$$F = \int_0^l 4 \pi \psi \rho v I [f'(x)]^3 r(x) dx. \quad (3)$$

Откуда видно, что функционал осевого сопротивления оправки потоку прошиваемого металла определяется согласно (3) как

$F[\gamma(x), f'(x)]$ и имеет непрерывные частные производные по всем аргументам на рассматриваемом отрезке очага деформации.

Из вышеизложенного следует, что задача по оптимизации параметров оправки и геометрии очага деформации сводится к распространенному виду классических задач. Данная задача имеет определенные ограничения по поиску минимума функционала осевого сопротивления на множестве нормированного пространства очага деформации, что требует установить линейно однородную функцию для образующей оправки $\gamma(x)$.

Поскольку в данном случае, как следует из выражения (3), функционал не явно зависит от текущей координаты x , т.е. $F[\gamma(x), f'(x)] = F[R(x), R'(x)]$, в этом случае известное уравнение Эйлера [6] примет вид:

$$-f'(x) F_{ff'} - f''(x) F_{ff''} = 0. \quad (4)$$

Умножив обе части уравнения (4) на $f'(x)$, в левой части получим точную производную от функционала осевого сопротивления:

$$\frac{d}{dx} [F - f'(x)F_{f'}] = 0. \quad (5)$$

откуда после следующего интегрирования имеем преобразованные интегрируемые типы известных уравнений Эйлера [6].

$$F - f'(x)F_{f'} = c, \quad (6)$$

где c – постоянная интегрирования задачи.

Полученное уравнение может быть легко проинтегрировано путем разрешения относительно $f'(x)$ и разделения переменных или путем введения параметров [7, 8].

Среди всех функций $\gamma(x)$, определяющих форму образующей оправки, удовлетворяющих граничным условиям задачи $\gamma(0)=0$ и $\gamma(l)=R$, необходимо найти ту функцию, которая доставляет слабый экстремум сформированному функционалу осевого сопротивления оправки (3) из выражения (6).

Экстремум функционала осевого сопротивления оправки из (3) может быть реализован только на тех экстремальных, которые удовлетворяют условиям на границах оправки, при которых осевое сопротивление оправки \bar{F} примет возможное наименьшее значение.

Уравнение Эйлера(6) для функционала осевого сопротивления из (3) при этом после небольших преобразований имеет вид:

$$[f'(x)]^3 \frac{d}{dx} [\gamma(x) [f'(x)]^3] = 0, \quad (7)$$

где $c = 0$.

В силу принятых граничных условий, частное решение уравнения (8) для рассматриваемой задачи не приемлемо.

Уравнение (7) для удобства решения перепишем в виде:

$$[f'(x)]^3 + 3\gamma(x) f'(x) f''(x) = 0. \quad (8)$$

Умножая обе части уравнения (8) на $f'(x)$, отметим, что левая часть есть ничто иное, как $\frac{d}{dx} \{ [f'(x)]^3 \gamma(x) \}$.

Интегрируя выражение (8) соответственно находим:

$$[f'(x)]^3 \gamma(x) = \tilde{c}. \quad (9)$$

После соответствующих преобразований получим следующее:

$$f'(x) = \frac{\tilde{c}}{\sqrt[3]{\gamma(x)}}$$

или после интегрирования окончательно запишем

$$\gamma(x) = (c_1 x + c_2) s. \quad (10)$$

Постоянные интегрирования c_1 и c_2 определяем из (10), согласно граничным условиям задачи с учетом реальных (возможных) калибровок оправок:

1. Для оправки без носика имеем следующие граничные условия:

$$\text{при } x=0, \gamma(x)=0. \quad (11)$$

$$\text{при } x=l, \gamma(x)=R.$$

Тогда из (10) с учетом (11) имеем:

$$c_1 = \frac{R^{4/3}}{l}, \quad c_2 = 0. \quad (12)$$

2. Для оправки с сформированным цилиндрическим центрующим носиком имеем следующие граничные условия:

$$\text{при } x=0, \gamma(x)=R^0. \quad (13)$$

$$\text{при } x=l, \gamma(x)=R.$$

Тогда из уравнения (10) с учетом (13) получим:

$$c_1 = \frac{R^{4/3} - R_0^{4/3}}{l}; \quad c_2 = R_0^{4/3}. \quad (14)$$

После соответствующих подстановок постоянных интегрирования (12) и (14) в уравнение (10) и преобразований получим выражения для определения дуги образующей рабочего участка оправок соответственно:

1. Для оправки без цилиндрического носика имеем:

$$\gamma(x) = R(x) = R \left(\frac{x}{l} \right) s. \quad (15)$$

2. Для оправки с цилиндрическим носиком получим

$$r(x) = R(x) = \left[R_0^{4/3} \frac{x}{l} + R_0^{4/3} \left(1 - \frac{x}{l}\right) \right] s, \quad (16)$$

где R_0 - радиус носика оправки; R - радиус калибрующего участка оправки; l - длина рабочей части и конуса оправки; x - текущая координата по оси оправки.

Полученные (15) и (16) после подстановок в выражение (4) и аналитических преобразований показывают, что образующая оправки, калиброванная по данному способу, является обтекаемой параболой заданной степени точности с заданными условиями формирования геометрии очага деформации. Это при прочих равных условиях обеспечивает минимум осевого сопротивления оправки потоку металла при прошивке.

Для стабильности процесса прошивки в особых точках образующей оправки на кривую $R(x)$ наложены определенные ограничения. Так, например, при $x=l$ достигается $f'(x) = \operatorname{tg} \theta$. Откуда имеем, что угол выходного конуса оправки определяется как $\theta = \operatorname{arctg}(f'(x))$. Для оправок используемых в реальных условиях, θ достигает величины $2 \div 3^\circ$. Это дает основание выполнить калибровку рабочего участка оправки по одной сопряженной гладкой кривой $R(x)$ согласно выражениям (15) и (16). Из вышеизложенного следует, что анализ вариационной задачи Эйлера с ограничениями на реализацию функционала осевого сопротивления на множестве нормированного пространства очага деформации выполняется при соблюдении критерия Вейерштрасса-Эрдмана. Следовательно, определить функцию образующей рабочей поверхности оправок и решить задачу по проектированию гаммы технологического инструмента становится возможным.

Обтекаемая оправка состоит из следующих участков: цилиндрический центрующий носик, объединенная рабочая часть и конус, сопряженные по одной обтекаемой кривой, цилиндрический калибрующий пояс и конус выпуска.

Рациональная форма рабочей поверхности оправки за счет стабилизации усилия прошивки обеспечивает реализацию устойчивого технологического процесса. При этом одновременно достигается повышение динамической устойчивости стержня оправки путем исключения нежелательного искажения очага деформации.

Результаты промышленных испытаний оправок диаметром 77 мм при прошивке гильз размером 97x10 из стали 20 на прошивном стане ТПА-140, изготовленных с применением различных технологий, сведены в таблицу.

Предлагаемая рациональная калибровка оправок приводит к существенному снижению усилия прошивки (осевого сопротивления) со стороны потока прошиваемого металла. Рациональная профилиро-

ванная поверхность рабочего участка оправки способствует стабильному удержанию оправки на оси прокатки и ограничивает перекося оправки в очаге деформации.

Калиброванная из условия минимума осевого сопротивления оправка исключает появление некомпенсируемого опрокидывающего момента со стороны стержневой системы механизма удержания оправки, что позволяет обеспечить необходимые устойчивые условия реализации всего технологического процесса прошивки.

Таблица

Технико-экономические показатели использования оправок $\varnothing 77$ мм на прошивном стане ТПА-140 в зависимости от технологии их производства

№ п / п	Способ изготовления оправок и материал		Количество прошитых гильз, шт.	Качество гильз		Усилия прошивки, кН	
				Продольная разностенность, мм	Выход годного, %	Расчетная величина	Экспериментальная величина
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Литье 20ХН3ФЛ	а	450÷500	1,5÷1,8	87	237,8	310,4
		б	670÷900	1,0÷1,2	92	187,4	210,5
2	Кованные 20ХН4ФА	а	1200÷1300	1,5÷1,7	89	254,5	305,2
		б	2100÷2180	0,9÷1,2	94	187,4	227,5
3	Закованные 35ХН2ФА	а	1500÷1900	1,2÷1,5	90	285,8	320,2
		б	2070÷2200	1,0÷1,1	93	187,4	200,8
4	Точёные из проката 20ХН4ФА	а	1300÷1500	0,9÷1,4	90	218,5	250,3
		б	1800÷1900	0,8÷1,0	95	187,4	208,4
5	Штампованные 12ХН3ФА	а	2800÷2900	0,9÷1,5	94	213,7	280,5
		б	3250ч÷3750	0,8÷1,0	97	187,4	190,4

а) существующая калибровка; б) рациональная калибровка

Для станов винтовой прокатки труб применение оправок, калиброванных по предложенной методике, за счет оптимизации формы ее рабочей поверхности, позволяет значительно снизить усилия прошивки и в целом энергосиловые параметры очага деформации (14-21%).

ВЫВОДЫ

1. Анализ полученных результатов показывает, что независимо от способа производства оправки эффективность процесса прошивки достигается путем минимизации осевого сопротивления.

2. Профилирование поверхности рабочего участка на некоторой рациональной кривой $R(x) = r(x)$ при прочих равных условиях позволяет значительно интенсифицировать технологический процесс. Использование рациональной оправки диаметром 77 позволяет увеличить скорость прошивки на 5,0÷7,0 %. Одновременно достигается повышение эксплуатационной стойкости оправок прошивного стана на 20÷25%, путем создания благоприятных условий обтекания прошиваемым металлом рабочей поверхности рациональных оправок.

3. Оптимизацией образующей оправки обеспечивается стабильность геометрии очага деформации и сохранение сплошности покрытия рабочей поверхности. Как следствие, исключается налипание металла на оправку и тем самым улучшение качества поверхности гильз, что приводит к снижению пленообразования, поперечной и продольной разностенности готовых труб на 7÷12%.

4. Использование технологического инструмента, имеющего рациональные параметры, позволяет, при прочих, увеличить его срок службы в 2,5÷3 раза и повысить качество производимых труб на 12÷14 % , в результате оптимизации процессов прошивки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубровский И.В., Матлахов Л.И. Новая форма оправок для станов Штифеля / Сталь, 1946. - №1. – с. 14-16.
2. Матвеев Ю.М., Ваткин Я.Л. Калибровка валков и инструмента трубных станов / М: Металлургиздат, 1951. - с. 212.
3. Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Производство стальных труб горячей прокаткой / М: Металлургиздат, 1954, с. 328.
4. Розов Н.В. Производство труб. Справочник / М: Металлургия, 1974. - 598с.
5. Грудев А.П., Машкин Л.Ф., Ханин М.И. Технология прокатного производства / М: Металлургия, 1994. - 656с.
6. Ваткин Я.Л., Ваткин Ю.А. Трубное производство.-М.: Металлургия.- 1970. - 512с.
7. Технология трубного производства. Учебник для вузов/ В.Н.Данченко, А.П.Коликов, Б.А.Романцев, С.В.Самусев // М.: Интермет - Инжиниринг, 2002.-640с.:ил.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / М: Наука, 1968.-720с.