

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)**  
**Электростальский институт (филиал)**  
**Московского политехнического университета**

Методическое пособие

**«Технология производства сварных труб и гнутых профилей»**  
**по дисциплине «Трубное производство»**

Направление подготовки  
**22.03.02 «Металлургия»**

Квалификация (степень) выпускника  
**Бакалавр**

Форма обучения  
**Очная, очно-заочная, заочная**

**Электросталь 2021**

**Методическое пособие разработано в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлениям подготовки: 22.03.02 «Металлургия»**

**Автор: Алексеев П.Л.**

**Методическое пособие одобрено на заседании кафедры «Машиностроительные и металлургические технологии» 03.06.2021 протокол №10**



## **Введение**

**Сварные трубы изготавливают малых (5÷114 мм), средних (114÷480 мм) и больших (480÷2520 мм) диаметров с толщиной стенки от 1 до 35 мм.**

**Трубы малых диаметров применяют в автомобильной и тракторной промышленности, сельскохозяйственном, энергетическом, химическом и нефтяном машиностроении. Трубы средних диаметров 159÷480 мм используют для паропроводов низкого давления, для газопроводов и нефтепроводов, при изготовлении деталей конструкций различного назначения, для мелиорации, водоснабжения, в коммунальном хозяйстве. Прямошовные и спиральношовные трубы большого диаметра предназначены для магистральных трубопроводов газа, нефти, нефтепродуктов, а также для водо- и паропроводов низкого давления. Широкому применению сварных труб способствует их более низкая (на 15÷20%) стоимость, меньшие капиталовложения в их производство в сравнении с бесшовными трубами. В мировом производстве труб доля сварных труб составляет 60%.**

**Гнутые профили проката – высокоэкономичный вид металлопродукции, изготавливаемый методом непрерывного профилирования (формоизменения) листового металла.**

**Сортамент гнутых профилей отличается большим разнообразием форм и размеров: симметричные и несимметричные простые профили; гофрированные и перфорированные профили с шириной исходных заготовок до 2500 мм, оцинкованные или плакированные пластиком.**

**Гнутые профили можно изготавливать из самых разнообразных материалов: горячекатаной и холоднокатаной листовой стали, из титана, алюминия, меди, латуни, биметаллических материалов.**

**В данном пособии рассмотрены теоретические вопросы сварки и формовки труб, гибки профилей, технологические аспекты их изготовления. Даны примеры расчета калибровки рабочего инструмента и силовых параметров процессов, мощности электродвигателей привода машин.**

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ ТРУБ И ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

## 1.1. Способы сварки, металлургические и тепловые процессы

Сварка – это технологический процесс получения неразъемных соединений с установлением внутренних межатомных связей.

Существующие в настоящее время способы сварки разделяют по технологическим признакам на две группы: сварка плавлением и сварка давлением [1]. К первой группе относят способы сварки, в которых формирование непрерывной кристаллической структуры происходит в результате кристаллизации расплавленного металла в зоне шва без воздействия на сварное соединение каких-либо статических, ударных или вибрационных давлений.

Ко второй группе относят способы сварки, при которых металл непосредственно в зоне шва может иметь температуру ниже или выше точки плавления, но сваривание происходит при действии статического, ударного или вибрационного давления.

В табл. 1.1 приведена классификация способов сварки, применяемых при изготовлении труб. Указаны режимы сварки, краткая характеристика изготавливаемых труб.

### *Сварка плавлением*

На рис. 1.1 приведена схема процесса дуговой сварки труб под слоем флюса. Все трубы большого диаметра для магистральных газо- и нефтепроводов свариваются данным способом. Сварка выполняется автоматами типа А-1373 тремя дугами под слоем флюса АН-65 плавящимися электродами. Для электродов используют проволоку  $\varnothing 2-3$  мм в бунтах из сталей Св-08ГА, Св-08А, Св-08ХМ. Проволока подается приводными роликами. Все дуги питаются переменным током, горят в одну ванну. Мундштуки располагаются: первая дуга «углом назад» под  $60^{\circ}$ , вторая – «углом вперед» под  $70^{\circ}$ , третья – «углом вперед» под  $45^{\circ}$ .

**Способы сварки труб. Краткая характеристика**

**Таблица 1.1**

| Метод сварки     | Способ сварки                  | Режимы сварки    |   | Материал заготовок                 | Размеры изготавливаемых труб, мм            | Область применения                                  |
|------------------|--------------------------------|------------------|---|------------------------------------|---|---|
|                  |                                | Скорость м/мин   | Ток, частота                                      |                                    |   |   |
| Сварка           | Дуговая под слоем флюса        | 2÷2,5            | Переменный<br>$f = 50$ Гц                         | Низколегированные стали (17Г1С)    | Ø820...1920<br>$S = 7÷35$                   | Газопроводы, нефтепроводы                           |
|                  | Дуговая в среде инертных газов | 0,5÷2<br>0,4÷0,6 | Постоянный<br>$I = 400$ А                         | Высоколегированные стали, алюминий | Ø6...426<br>$S = 0,2÷6$                     | Трубопроводы и аппаратура химической промышленности |
|                  | Плазменная                     | 1÷1,8            | Постоянный<br>$I = 310$ А                         | Высоколегированные стали           | Ø50...200<br>$S = 0,2÷6$                    | Аппаратура химической промышленности                |
|                  | Лазерная                       | 10÷20            | Постоянный  | Редкоземельные                     | $S = 0,1÷0,5$<br>Ø20...100<br>$S = 0,1÷0,5$ | Изделия специального назначения                     |
| Сварка давлением | Печная                         | 120              | -   | Углеродистые общего назначения     | Ø10...140<br>$S = 1,8÷8$                    | Жилищное строительство, машиностроение              |
|                  | Токами высокой частоты         | 60÷80            | Переменный<br>$f = 8÷10$ кГц<br>$f = 440÷480$ кГц | Углеродистые конструкционные       | Ø6...530<br>$S = 0,5÷10$                    | Машиностроение, транспорт                           |
|                  | Индукционная                   | 40÷60            | Переменный<br>$f = 1÷10$ кГц                      | Низколегированные                  | Ø21...219<br>$S = 1,5÷10$                   | Трубопроводы малых размеров                         |
|                  | Сопротивлением                 | 40÷60            | Постоянный<br>$I = 50$ кА                         | Углеродистые конструкционные       | Ø5...20<br>$S = 0,5÷2$                      | Автомобильная, тракторная промышленность            |
|                  | Контактная шовная              | 20÷40            | Переменный<br>$f = 50$ Гц                         | Углеродистые конструкционные       | Ø100...200<br>$S = 0,5÷1,2$                 | Мелиорация, сельское хозяйство                      |

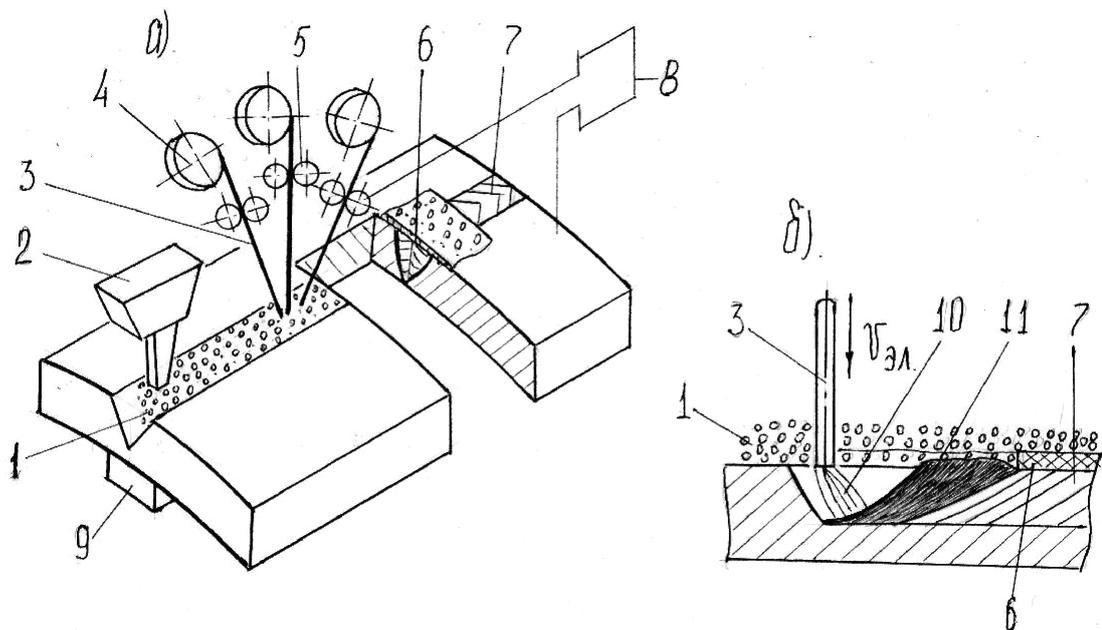


Рис. 1.1. Схема дуговой сварки под слоем флюса (а) и сварочная ванна (б): 1 – флюс; 2 – бункер с флюсом; 3 – электродная проволока; 4 – бунт; 5 – подающие ролики; 6 – шлак; 7 – шов основной; 8 – сварочный агрегат; 9 – подкладка медная; 10 – дуга; 11 – расплавленный металл.

Под воздействием тепла электрических дуг плавится основной металл, электродная проволока и флюс. Расплавленный флюс защищает металл шва от воздействия кислорода ( $O_2$ ) и азота ( $N_2$ ) воздуха. При затвердевании флюс образует защитную корку шлака. При удалении от источников тепла (электрических дуг) расплавленный металл кристаллизуется с образованием шва. Между свариваемыми кромками и металлом шва создается непрерывная внутрикристаллическая форма связи: атомы жидкого металла шва продолжают кристаллическое строение пограничных зерен. Металл шва имеет литую столбчатую структуру вытянутых дендритов. Наиболее интенсивно растут дендриты от тех зерен, направление которых наиболее благоприятно для отвода тепла. Рост столбчатых кристаллов способствует лучшему удалению из расплавленного металла шлаковых и газовых включений. При затвердевании металл шва

претерпевает структурные фазовые изменения и приобретает окончательную структуру, отличную от структуры заготовок.

В сварном соединении (рис. 1.2) можно выделить четыре основные зоны: металл шва 1, зону оплавления 2, зону термического влияния 3 и основной металл 4 [2].

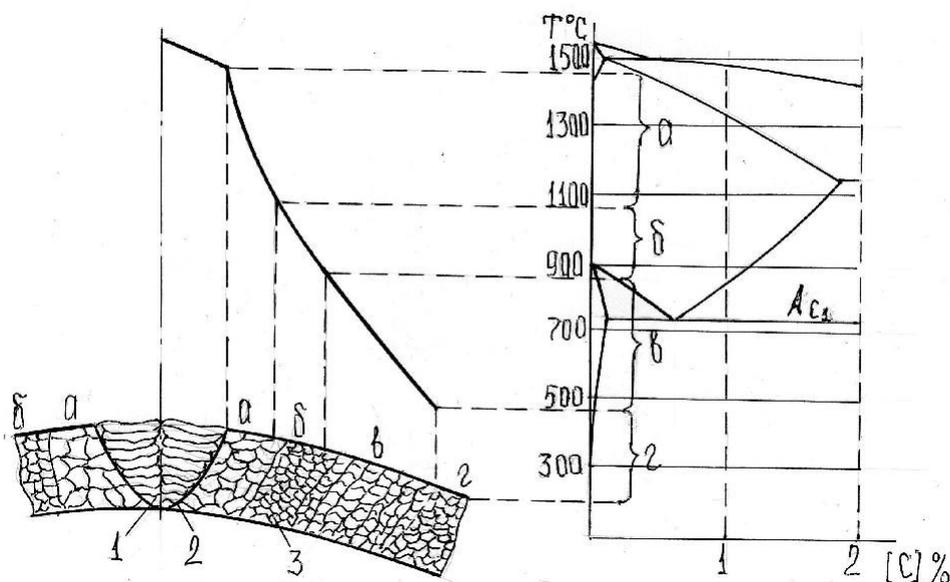


Рис. 1.2. Распределение температуры по поверхности свариваемой трубы и структура шва при дуговой сварке под слоем флюса.

Металл шва имеет крупнозернистое строение. По химическому составу он отличается от основного и присадочного металла из-за частичного выгорания элементов в процессе сварки и легирования некоторыми элементами из флюса или электродного покрытия.

Зона оплавления представляет собой границу сварного шва с основным металлом, она очень мала и различима только на микрошлифе.

Зона термического влияния – это основной металл, подвергшийся высокому нагреву, в результате которого его структура изменяется. Зону термического влияния можно разбить на следующие участки:

а) участок перегрева (температура нагрева значительно выше точки  $A_{c3}$ ), металл имеет пониженные механические свойства, могут зарождаться и развиваться трещины;

б) участок нормализации (температура нагрева несколько

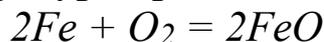
выше точки  $A_{c3}$ ), металл имеет мелкозернистую структуру и повышенные механические свойства;

в) участок рекристаллизации (температура нагрева от  $600^{\circ}\text{C}$  до температуры точки  $A_{c3}$ ), структура металла мелкозернистая, определяется предшествующим упрочнением заготовок;

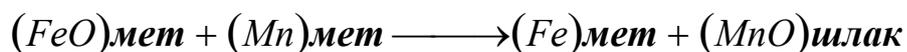
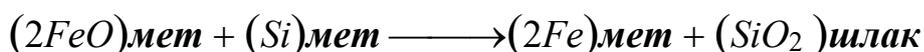
г) участок синеломкости (температура нагрева более  $200^{\circ}\text{C}$ ), металл характеризуется низкой пластичностью, могут образовываться трещины.

Химический состав металла шва зависит не только от состава основного и электродного металла, но и от реакций, протекающих в процессе сварки. На ход и интенсивность этих реакций влияют окружающая среда, степень защиты расплавленного металла от окисления, режим сварки. Наибольшее влияние оказывает кислород, который окисляет железо, углерод, кремний и марганец. Кислород – вредная примесь в стали, так как резко снижает ее механические свойства, ухудшает ковкость и обрабатываемость, уменьшает сопротивление коррозии и приводит к краснеломкости.

При высокой температуре происходит окисление железа:

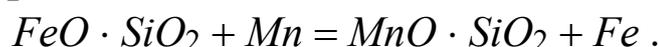


Закись железа  $\text{FeO}$  хорошо растворяется в жидком металле, при кристаллизации металла остается в шве, уменьшая его пластичность. Компоненты флюса при расплавлении переводят закись железа в форму нерастворимых в стали соединений, которые переходят в шлак:



Для предупреждения перехода  $\text{FeO}$  из шлака в металл стремятся связать закись железа в стойкие силикаты, которые, не растворяясь в стали, остаются в шлаке.

При наличии в флюсе марганца образуются силикаты марганца, которые остаются в шлаке:



Флюсы, применяемые при сварке, представляют собой

силикаты. Флюсы бывают плавные (пемзовидные и стекловидные) и керамические. В состав плавных флюсов входят марганцевая руда, доломит, кварцевый песок, плавленый шпат; керамических – марганцевая руда, кварцевый песок, титановый концентрат, ферромарганец, ферросилиций, плавленый шпат, натриевое жидкое стекло. Флюс изолирует расплавленный металл от кислорода воздуха, но последний попадает в сварочную ванну через ржавчину и окалину кромок заготовок. Через них, в виде органических соединений, в ванну поступает сера. Сера (один из наиболее вредных элементов) способствует образованию горячих трещин в сварочных швах. Сера находится в виде сульфида железа –  $FeS$ , который при кристаллизации металла выпадает в междендритных пространствах, образуя с железом и окислами легкоплавкие эвтектики. При этом понижаются механические свойства шва. Марганец препятствует образованию  $FeS$ , образуя сульфиды  $MnS$ , которые растворяются в твердом растворе.

Кремний играет очень важную роль при сварке труб. Концентрация его в пределах  $0,20 \div 0,25\%$  позволяет предотвратить кипение металла сварочной ванны. Кремний увеличивает ударную вязкость шва. При концентрации кремния свыше  $0,5 \div 0,6\%$  могут образовываться дисперсные включения, что нежелательно.

На рис. 1.3 приведена схема процесса аргоно-дуговой сварки труб. Дуговую сварку с защитой дуги инертным газом (гелием или аргоном) применяют для изготовления труб из высоколегированных сталей (коррозионно-стойких и жаропрочных), а также из ряда цветных металлов (алюминия, магния) [3]. Электрическая дуга горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и свариваемой трубой. Для подвода тока и подачи инертного газа применяют специальную горелку. Сварку производят постоянным током прямой полярности (коррозионно-стойких и хроможелезоникелевых сталей) и обратной полярности (алюминий, магний). В качестве источника питания применяют сварочные генераторы

с крутопадающей внешней характеристикой.

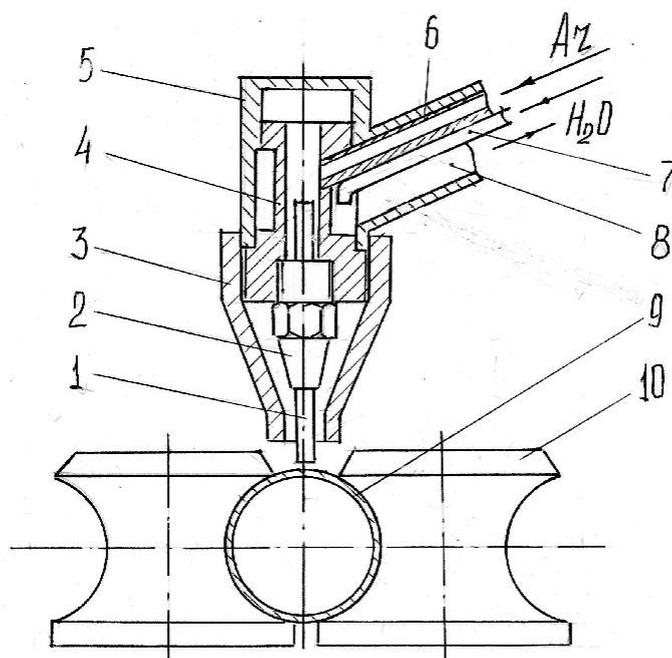


Рис. 1.3. Схема дуговой сварки в среде инертных газов: 1 – электрод вольфрамовый; 2 – зажим электрода; 3 – сопло; 4 – корпус; 5 – камера; 6 – трубка подачи аргона ( $Ar$ ); 7 – трубопровод подвода воды ( $H_2O$ ); 8 – трубопровод отвода воды; 9 – труба свариваемая; 10 – валки сварочной клетки.

Для электродов применяют вольфрам ВТ-15, содержащий  $1,5 \div 2\%$  оксида тория. Диаметр электродов  $1 \div 7,5$  мм. Напряжение дуги  $12 \div 15$  В, сила тока  $150 \div 400$  А. В качестве защитного газа чаще применяют аргон чистотой 99%, подаваемый из баллонов под давлением  $0,02 \div 0,1$  МПа, расход  $10 \div 15$  л/мин. Гелий обладает большей теплоемкостью и теплопроводностью, чем аргон. Он позволяет получать более высокое качество шва по механическим характеристикам, увеличивает скорость сварки до 3 м/мин. Но его использование ограничено вследствие большого расхода (из-за низкой плотности) и высокой стоимости.

Сварочная ванна образуется только из металла кромок свариваемых заготовок. Струя инертного газа, отводящего значительное количество тепла, ускоряет охлаждение и кристаллизацию металла варочной ванны. Необходимое

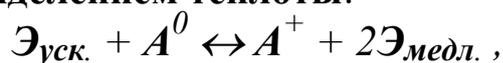
усилие удержания кромок создается шовосжимающими валками.

Основная, центральная часть шва в виде узкой полоски имеет структуру, характерную для литого металла, ширина зоны термического влияния невелика, химический состав стали меняется незначительно. Но может понижаться коррозионная стойкость. Для повышения коррозионной стойкости применяют ультразвуковое или химическое обезжиривание кромок трубной заготовки.

При сварке труб плавлением используют различные источники тепла, имеющие температуру не ниже  $2000^{\circ}\text{C}$  [4]. При электрической сварке источником тепла служит электрическая дуга или электронный луч. При химической сварке используют процессы горения газообразных горючих смесей (газовая сварка). Температура пламени горения должна быть на  $400\div 475^{\circ}\text{C}$  выше температуры плавления металла (для стали  $T_{пл}^0 = 1548^{\circ}\text{C}$ ). В промышленных условиях изготовления сварных труб химическую сварку не применяют.

Электрическая дуга представляет собой один из видов устойчивого электрического разряда через газовый промежуток. Этот разряд характеризуется высокой плотностью тока и температурой. Плотность тока характеризуется эмиссией электронов с поверхности электрода. Различают термоэлектронную, автоэлектронную и фотоэлектронную эмиссии.

Термоэлектронная эмиссия заключается в способности раскаленной поверхности электрода испускать электроны. Автоэлектронная эмиссия вызывается внешним электрическим полем источника питания, а фотоэлектронная эмиссия – мощными потоками световых лучей. При неупругом соударении электронов с нейтральными частицами возникает ионизация газов с выделением теплоты:



где  $\text{Э}_{\text{уск.}}$  – электрон, ускоренный полем катода;  $A^0$  – нейтральный атом;  $A^+$  – ион;  $\text{Э}_{\text{медл.}}$  – медленный электрон.

Температура столба дуги повышается с увеличением силы тока, а также с уменьшением его поперечного сечения. Сжатие столба выполняют специальными горелками, струей газа, охлаждающей периферийные части дуги, электромагнитным сжатием. Эти методы позволяют получить дуговую плазму с температурой примерно до 2000К. Электрическая энергия, потребляемая дугой, переходит в основном в тепловую энергию. Эффективная тепловая мощность дуги  $Q_{эф}$ , то есть часть тепловой мощности, расходуемая на нагрев основного и дополнительного металла, равна:

$$Q_{эф} = K \cdot I_{д} \cdot V_{д} \cdot \eta_{эф} ,$$

где  $I_{д}$  – ток, А;  $V_{д}$  – напряжение дуги, в;  $K$  – коэффициент, определяет род тока (при постоянном токе  $K = 1$ ; при переменном  $K = 0,7 \div 0,8$ );  $\eta_{эф}$  – коэффициент, определяет отношение эффективной мощности дуги к ее полной мощности ( $\eta_{эф} = 0,5 \div 0,6$  при аргонно-дуговой сварке,  $\eta_{эф} = 0,8 \div 0,95$  при сварке труб под слоем флюса).

Температура в точках поверхности сварочной ванны:

$$T = \frac{Q_{эф}}{2\pi \cdot x \cdot \lambda} ,$$

где  $x$  – расстояние точки от оси электрода;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности.

Принимая  $T = T_{плавления}$ ,  $x = L_{св.ванны}$ , получим:

$$L_{св.ванны} = \frac{Q_{эф}}{2\pi \cdot \lambda \cdot T_{пл}} = \frac{K \cdot I_{д} \cdot V_{д} \cdot \eta_{эф}}{2\pi \cdot \lambda \cdot T_{пл}} ,$$

где  $L_{св.ванны}$  – длина сварочной ванны.

Время пребывания металла в расплавленном состоянии:

$$t_{расп} = \frac{L_{св.ванны}}{V_{св}} ,$$

где  $V_{св}$  – скорость сварки ( $V_{св} \approx 1 \div 2$  м/мин).

По построенным номограммам и  $\tau_{расп}$  определяют качество сварного шва.

**Сварка давлением**

В контактах двух металлических поверхностей действие

межатомных сил притяжения начинается на расстояниях  $(4\div 5)\cdot 10^{-4}$  мкм [1]. При отделочных операциях механической обработки (тонкое шлифование, суперфиниширование, хонингование) получают шероховатость поверхности  $R_a = 0,01\div 0,02$  мкм, отклонение формы поверхности не более  $1\div 5$  мкм. Следовательно, атомное взаимодействие при контакте таких поверхностей возможно лишь в отдельных микровыступах. Кроме того, идеально чистая (ювенильная) металлическая поверхность, свободная от оксидных пленок и адсорбированных слоев жидкостных и газовых молекул, может быть создана только в глубоком вакууме или существовать в первые мгновения (малые доли секунды) после его механической обработки. На воздухе все ее микровыступы и впадины мгновенно покрываются оксидными пленками, под которыми размещаются слои адсорбированных молекул воды, газов и жировых веществ. Оксидный слой имеет двойной электрический потенциал (наружный – электроположительный, на границе с металлом – отрицательный). Толщина оксидных пленок не превышает  $3\cdot 10^{-2}$  мкм, толщина пленок паров воды составляет  $50\div 100$  молекул, жировых слоев может достигать  $1\div 5$  мкм. Чтобы получить прочное сварное соединение, необходимо разрушить эти оксидные и жировые пленки. Для осуществления развитого схватывания, а в дальнейшем и сваривания, необходимо либо действие высокого давления, при котором металл в контактной зоне должен быть доведен до пластических деформаций, либо такого нагрева, который приводит к увеличению активности и подвижности частиц кристаллической решетки при одновременном действии и некоторого давления. Расчеты показали, что в холодном состоянии для устойчивой сварки стальных поверхностей необходимо создать контактное давление, превышающее их предел текучести в четыре раза

$$(\sigma_k = 4\sigma_m) [1].$$

Процесс сварки давлением происходит при высоких температурах, при которых металл кромок заготовок находится в пластическом состоянии, но не расплавляется. При

этом разрушаются оксидные и жировые пленки, выступы отдельных зерен получают многочисленные сдвиги с образованием множества осколков. Зерна легко смещаются одно относительно другого, вступают в непосредственно соприкосновение, происходит разрушение самих зерен, новое их образование и рост. Температурой начала сварки будет температура начала рекристаллизации ( $T_{рекр} = 0,4T_{плавл}K$ ). При низких температурах ( $T^{\circ}C = 500\div 600^{\circ}C$ ) для осуществления сварки необходимо длительное время, при высоких ( $T^{\circ}C > 1000^{\circ}C$ ) - в сталях рекристаллизация происходит с большой скоростью.

Процесс сварки заканчивается взаимным прорастанием, свариванием всех пограничных кристаллов одного с другим через поверхность раздела. Прочность сварного соединения определяется температурой нагрева кромок, усилием их сдавливания и временем сварки [4].

При сварке нагретый металл кромок взаимодействует с окружающей средой (специальной защиты шва в технологических операциях не предусмотрено). Наибольшее влияния оказывает кислород воздуха. Окисление кромок заготовок идет по следующей схеме. При температуре  $20^{\circ}C$  образуется защитная пленка  $\gamma-Fe_2O_3$ . При нагреве до  $200^{\circ}C$   $\gamma-Fe_2O_3$  перестраивается в пленку  $\alpha-Fe_2O_3$ , начиная с  $400^{\circ}C$  образуется окисел  $Fe_3O_4$ , а с  $570^{\circ}C$  -  $FeO$ . При  $700^{\circ}C$  окисел  $FeO$  становится преобладающим.

Особое значение при стыковой сварке сталей имеют окисление углерода и обезуглероживание, идущие по реакциям:



Обезуглероживание, вследствие большой подвижности углерода, захватывает более глубокие слои металла, чем окисление. Этому способствует также удаление летучих продуктов  $CO$ . С увеличением температуры и концентрации углерода в стали его окисление увеличивается, причем наиболее интенсивно при  $C > 0,2\%$ . При этом прочность шва

резко уменьшается. Элементы *Cr*, *Ti* ослабляют склонность к обезуглероживанию, а элементы *Si* и *Mo*, наоборот, усиливают ее.

На рис. 1.4 приведена диаграмма состояния железо – углерод, на которой отмечены теоретическая область сварки давлением труб (область 2) и практическая (область 1). На практике содержание углерода при сварке углеродистых труб не должно превышать 0,3%. Структура сварного шва определяется исходной структурой заготовки, режимом сварки. Шов имеет крупнозернистую структуру перегретого металла, зоны термического влияния: от крупнозернистой до мелкозернистой структуры рекристаллизации. При нагреве кромок до температуры оплавления металла, вследствие интенсивного обезуглероживания, в стыке наблюдается белая полоска феррита.

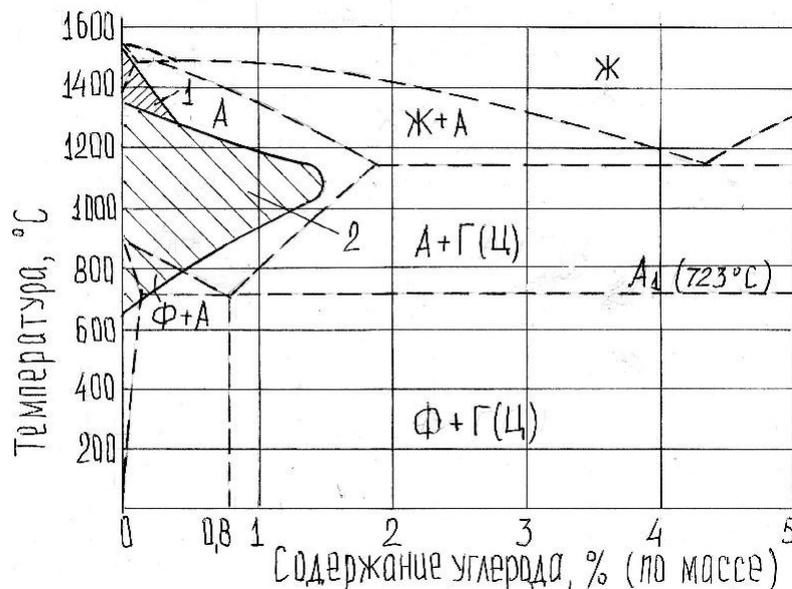


Рис. 1.4. Диаграмма состояния железо – углерод: 1 – практическая область сварки давлением; 2 – теоретическая область сварки давлением.

На рис.1.5 приведены схемы сварки труб токами высокой частоты (ТВЧ) с контактным (а) и индукционным подводом тока (б). Контактный подвод тока более эффективен : при одинаковых параметрах сварки потребляемая мощность в два раза ниже в сравнении с индукционным подводом. Для труб

средних и больших диаметров ( $D_{тр} \geq 200$  мм) индукционный подвод тока не применяют. Сварка токами высокой частоты основана на использовании физических явлений, связанных с протеканием их по сечению проводников: эффекта близости и поверхностного эффекта. Если пропустить переменный ток по двум параллельным проводникам в противоположных направлениях, то плотность тока по сечению проводников будет неравномерной: она максимальна на близлежащих сторонах. Это явление носит название эффекта близости [2]. Плотность тока также неравномерна по сечению проводника: она максимальная в периферийных участках. Причем глубина проникновения тока будет тем меньше, чем больше частота протекающего тока. Это явление носит название поверхностного эффекта.

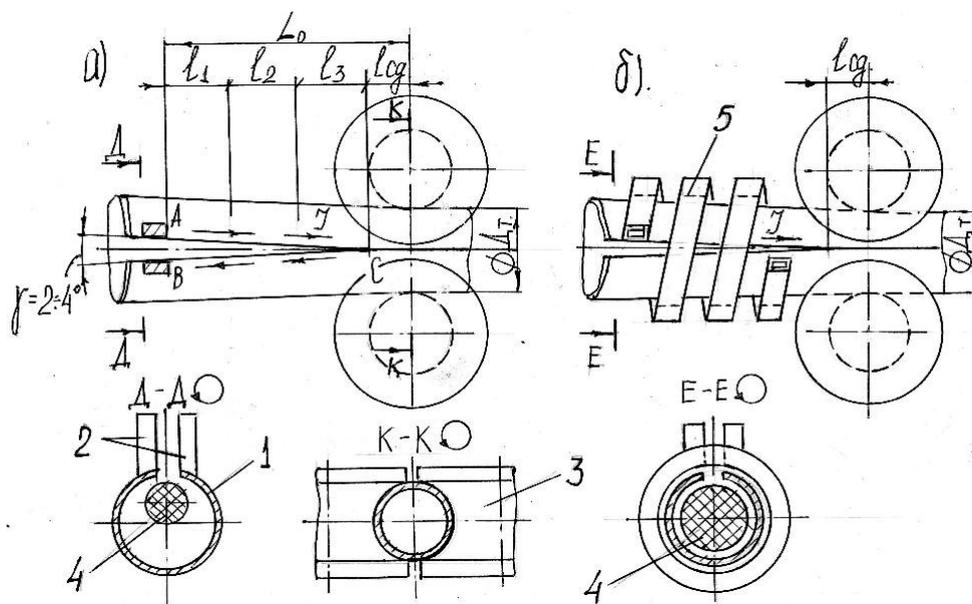


Рис. 1.5. Схемы сварки труб токами высокой частоты с контактным (а) и индукционным (б) подводом тока: 1 – свариваемая труба; 2 – электроды (контакты); 3 – валки сварочной клетки; 4 – ферритовый сердечник; 5 – индуктор.

Применяют два диапазона частот:  $f_1 = 8 \div 10$  кГц и  $f_2 = 440 \div 500$  кГц. Выбор частоты определяет в основном толщина стенки трубы: для толщин стенок  $8 \div 10$  мм применяют частоту  $f = 8 \div 10$  кГц, для стенок  $0,5 \div 6$  мм – соответственно

$f = 440 \div 500$  кГц. Это связано с глубиной нагрева кромок: при большей толщине стенки она должна быть больше, чтобы обеспечить устойчивый контакт и смятие кромок. Скорость сварки также определяется частотой тока: она максимальна ( $v_{св} = 80 \div 100$  м/мин) при  $f = 440 \div 500$  кГц. В зависимости от частоты для питания используют: при  $f = 440 \div 500$  кГц – ламповые генераторы с  $N = 100 \div 200$  кВт, при  $f = 8 \div 10$  кГц – машинные генераторы с  $N = 400 \div 800$  кВт.

При контактном подводе (см. рис. 1.5 а) ток от точки *A* течет по кромке к точке сварки (точка *C*) и далее по противоположной кромке к точке *B*. При этом, следуя эффекту близости и поверхностному эффекту, он концентрируется на наружной поверхности кромок. Второй путь тока от точки *A* к точке *B* по периметру трубы блокируется реактивным сопротивлением ферритовых сердечников, которые вводятся во внутреннюю полость трубы. Протекая по кромкам, ток разогревает их до температуры сварки. Шовосжимающие валки сдавливают и соединяют (сваривают) кромки между собой в пластическом состоянии. Угол схождения кромок  $\gamma$  должен выдерживаться в пределах  $2 \div 3^\circ$ .

При индукционном подводе тока (рис. 1.5 б) в трубной заготовке индуцируется электродвижущая сила, под влиянием которой в металле возникает вторичный ток (движение проводника в магнитном поле). Ток стремится проходить по кольцевому пути под индуктором, но, встречая на своем пути открытую щель трубной заготовки, отклоняется к точке схождения кромок. На кромках трубы происходит его концентрация, как и при контактном подводе тока.

Расчет режимов сварки выполняют в соответствии со схемой рис. 1.5 а, на которой выделены условные температурные зоны нагрева кромок. Зона  $l_1$  – нагрев от исходной температуры до температуры точки Кюри (температуры, при которой металл теряет магнитные свойства, для стали  $T_{Кюри} = 723^\circ\text{C}$ ). Зона  $l_2$  – зона постоянной температуры. Зона  $l_3$  – нагрев от точки Кюри до температуры сварки. Зона  $l_4$  – участок пластической деформации металла и

сварки. Эти зоны определяются скоростью сварки и временем:

$$l_i = v_{св} \cdot \tau_i .$$

**Время нагрева металла до точки Кюри:**

$$\tau_1 = \left( \frac{Q_1}{Pa_1} \right)^2 \cdot \lambda \cdot c \cdot \gamma \cdot 4 ,$$

где  $Q_1$  – температура точки Кюри;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\gamma$  – плотность;  $Pa_1$  – удельная активная мощность.

$$Pa_1 \approx 0,5 H_{me}^2 \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_{отн}}{\rho_0}} ; \quad \omega = 2\pi f ,$$

где  $H_{me}$  – амплитуда напряженности поля на поверхности свариваемой заготовки;  $\rho_0$  – удельная электропроводность стали ( $\rho_0 = 10^6$  1/Ом·м);  $\mu_0$  – магнитная проницаемость ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $\mu_{отн}$  – относительная магнитная проницаемость, %;  $\omega$  – круговая частота.

При переходе через точку Кюри температура кромок расти не будет:

$$\tau_2 = \tau_1 \cdot \frac{1}{\sin \left( \frac{\pi P_2}{Pa_1} \right)} ; \quad P_2 = 0,35 H_{me}^2 \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{\rho_0}}$$

**Время, необходимое для достижения сварочной температуры:**

$$\tau_3 = \tau_2 \left[ 1 + \frac{\frac{Q_3 - 0,98}{Q_1}}{0,156 \cdot \left( 1 + \frac{P_2^2}{Pa_1^2} \right)} \right]$$

где  $Q_3$  – температура в конце сварочного участка.

Определив время  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $\tau_3$ , рассчитывают соответствующие длины и проверяют условие:

$$v_{св} (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) + l_{св} = L , \tag{1.1}$$

где  $v_{св}$  – скорость сварки;  $L$  – расстояние от электродов до оси шовосжимающих валков.

Длину  $l_{св}$  определяют по величине припуска на сварку и углу схождения кромок.

Если условие (1.1) выполняется, то режим сварки выбран правильно. Если  $v_{св} (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) + l_{св} > L$ , то металл недогрет, будет непровар. Если  $v_{св} (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) + l_{св} < L$ , то металл перегрет, может случиться его пережог. Чтобы выполнялось условие (1.1), необходимо или изменить скорость сварки (скорость валков формовочного стана) или изменить мощность питающего источника.

Недостатком труб, изготавливаемых сваркой ТВЧ, является относительно большой внутренний грат (до 60% толщины стенки).

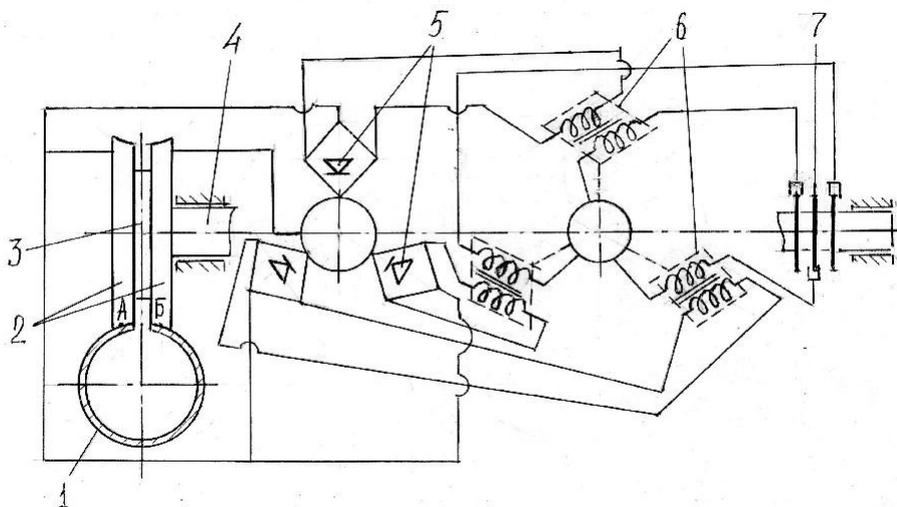


Рис. 1.6. Схема сварки труб сопротивлением постоянным током: 1 – свариваемая труба; 2 – электродные кольца; 3 – изолятор; 4 – вал; 5 – выпрямительный блок; 6 – трансформаторы; 7 – контактные кольца.

На рис. 1.6 приведена принципиальная схема электросварки труб постоянным током методом сопротивления. Данную схему с последующим холодным редуцированием применяют при изготовлении труб диаметром 5–16 мм для автомобильной, тракторной, химической промышленности, толщина стенки труб от 0,5 до 1,2 мм.

Постоянный электрический ток подводится к кромкам трубной заготовки 1 с помощью двух электродных колец 2, разделенных изолятором 3. Ток, подчиняясь закону

наименьшего сопротивления, идет по кромкам ленты от точки *A* к точке *B* контакта электродных колец с заготовкой. Разогрев кромок до температуры сварки происходит за счет джоулева тепла, определяемого по формуле:

$$Q = K \cdot I \cdot U \cdot \tau = KI^2 \cdot (R_{k,k} + 2R_z + R_c) \cdot \tau, \quad (1.2)$$

где *K* – коэффициент (*K* = 0,9); *I* – сварочный ток (А); *U* – напряжение на электродных кольцах (12÷15 В); *τ* – время сварки (время прохождения металлом очага сварки); *R<sub>к,к</sub>* – сопротивление контакта электродных колец с трубой; *R<sub>з</sub>* – сопротивление кромок заготовки; *R<sub>с</sub>* – сопротивление стыка кромок.

Составляющие сопротивлений формулы (1.2) определяют по материалам работы [4] с учетом температуры нагрева, геометрии контакта, усилий на электродных кольцах.

**Сварочный ток вычисляют по формуле:**

$$I = \frac{U}{\sqrt{r_{c,m}^2 + (R_{c,m} + R_{k,k} + 2R_z + R_c)^2}},$$

а температуру нагрева кромок в соответствии с:

$$T_{\text{кромки}} = \frac{Q \cdot \tau}{\gamma \cdot C \cdot S \cdot F_{\text{шва}}}, \quad (1.3)$$

где *r<sub>с,м</sub>* и *R<sub>с,м</sub>* – индуктивное и активное сопротивление сварочного трансформатора; *S* – толщина стенки трубы; *F<sub>шва</sub>* – площадь шва.

Электрическая схема (рис. 1.6) питания электродных колец включает: вращающийся вал 4 с встроенным выпрямительным блоком 5 с германиевыми вентилями и тремя однофазными трансформаторами 6, контактные кольца 7. Вал не приводной, крепится в подшипниках качения, вращение электродных колец – за счет фрикционных сил трения движущейся трубы.

## 1.2. Формовка трубных заготовок

### 1.2.1. Параметры формовки заготовок

Формовка (сворачивание) плоской заготовки (листа, ленты, штрипса) в цилиндрическую – одна из основных

операций технологического процесса производства сварных труб. Она может производиться как с нагревом металла, так и без нагрева.

Формовка в горячем состоянии применяется при печной сварке труб (см. табл. 1.1). Из-за высокой пластичности нагретого металла формовка выполняется в двух парах валков (рис. 1.7). При этом растяжение кромок ленты достигает 20%. Изгиб металла выпуклостью вверх позволяет удалить образующуюся при нагреве окалину с поверхности ленты. Штрипс 1 нагревается в проходной методической печи до температуры  $1280 \div 1320^{\circ}\text{C}$ . В результате обдува воздухом из сопел 2 температура его кромок повышается до  $1380 \div 1420^{\circ}\text{C}$ . В первой (формовочной) клетки с вертикальными приводными валками 3 штрипс сворачивается на угол  $240 \div 270^{\circ}$ . Далее следует вторичный обдув кромок из сопла 5, и их температура повышается до  $1450 \div 1480^{\circ}\text{C}$ . Во второй (сварочной) клетки с приводными горизонтальными валками 4 штрипс сворачивается до соприкосновения кромок. Кромки сдавливаются и свариваются.

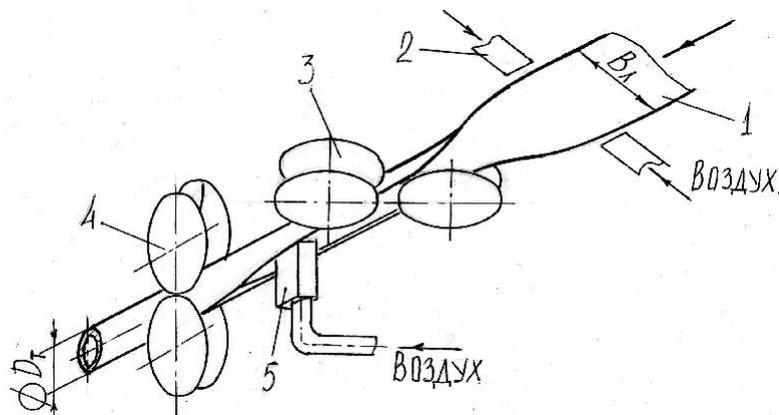


Рис. 1.7. Схема горячей формовки и сварки труб (непрерывной печной сварки).

В формовочной клету калибр выполняют круглым диаметром:

$$d_{\phi} = \frac{2c \cdot B_{ш} \cdot (1 + \alpha T^{\circ}\text{C})}{\psi_{\phi}} + c \cdot S_{ш}, \quad (1.4)$$

где  $c$  – коэффициент, учитывающий угар ( $c = 0,97 \div 0,98$ );  $\alpha$  –

коэффициент линейного расширения ( $\alpha = 11 \div 13 \cdot 10^{-6}$ );  $T^0C$  – средняя температура штрипса ( $T^0C \approx 1300^0C$ );  $B_{ш}$  – ширина штрипса ( $B_{ш} = 360$  мм);  $S_{ш}$  – толщина штрипса;  $\psi_{\phi}$  – угол формовки ( $\psi_{\phi} = 4,27$  рад).

**В сварочной клетки калибр овальный. Размеры**

$$\text{калибра: высота } \overline{H_{св}} = d_i \xi^i ;$$

$$\text{ширина } - B_{св} = d_i \cdot \sqrt{\xi} ;$$

$$\text{радиус } - r_{св} = 0,25d_i \cdot \frac{1 + \xi^2}{\sqrt{\xi}} ,$$

где  $\xi$  – коэффициент овальности ( $\xi = \frac{B_{св}}{H_{св}}$ );  $d_i$  – расчетный диаметр трубы в клетки.

$$d_i = \left[ \frac{1}{1 - 2\varepsilon_{св} + \varepsilon_{св}^2} \cdot \left[ \frac{a \cdot B_{ш} (1 + \alpha \cdot T^0C)}{\pi} + \frac{S_{ш}}{ш} \right] \cdot (1 - \varepsilon_{св}) \right]$$

где  $\varepsilon_{св}$  – обжатие в сварочной клетки ( $\varepsilon_{св} = 0,04$ ).

**Холодная формовка заготовок выполняется:**

- гибкой на вальцах;
- гибкой на прессах;
- на непрерывных валковых станах;
- в формующих устройствах спиральной сварки труб.

**В основе формовки листов на вальцах лежит гибка металла 3 между верхним 1 и двумя боковыми 2 валками (рис. 1.8). Нижний прижимной валок 4 обеспечивает устойчивое сцепление металла с верхним приводным валком. Привод верхнего валка реверсивный, формовка выполняется за 9÷11 реверсивных качаний цилиндра. Боковые валки перемещаются в радиальном направлении к центру формовки. Крайние участки листов предварительно подгибаются на валковых станах (угол подгибки  $60^0$ , радиус равен радиусу трубы). Длина формуемых цилиндров 6 м. Изготавливаются трубы**

диаметром более 426 мм на существующих трубосварочных агрегатах.

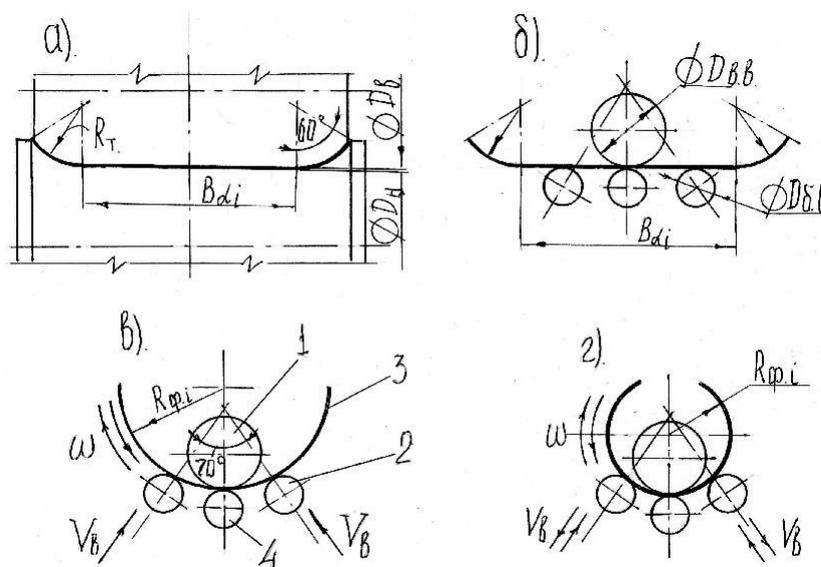


Рис. 1.8. Формовка листов на 4-х валковых гибочных вальцах: а) предварительная валковая подгибка крайних участков; б) задача металла в вальцах; в) и г) – этапы гибки.

Формовка заготовок гибкой на вертикальных гидравлических прессах (рис. 1.9) выполняется в две стадии: на первом прессе лист формуется в V-образную форму, на втором – в цилиндрическую или в полуцилиндрическую формы. Пресс предварительной формовки усилием 20 МН включает два сблокированных пресса с общей траверсой 1, гибочными пуансонами 2 и роликами гибки 3, размещенными на боковых ползунах 4 равномерно вдоль всей длины траверсы. Листы перед гибкой на прессах проходят операцию подгибки кромок на валковых гибочных машинах (рис.1.9 а). Кромки подгибаются на угол  $50 \div 60^{\circ}$  радиусом, равным радиусу цилиндра окончательной формовки. Подгибка кромок необходима, так как на прессах кромки деформируются упруго и не получают необходимую кривизну (радиуса трубы). Гибка листов в V-образную форму (рис. 1.9 б, в) выполняется при перемещении верхнего ползуна пресса с пуансоном вниз и синхронном горизонтальном сведении боковых ползунов. Окончательная гибка листов производится на гидропрессе

усилием 200 МН в разъемном штампе (рис. 1.9 г). Верхний полуштамп снабжен фиксирующей шпонкой 5. После формовки кромки цилиндров свариваются дуговой сваркой под слоем флюса, проходят операцию калибровки (гидроэкспандирование) и гидроиспытание на горизонтальных прессах. Давление жидкости при гидроиспытании 7,5÷10 МПа, при экспандировании - 10÷12,5 МПа.

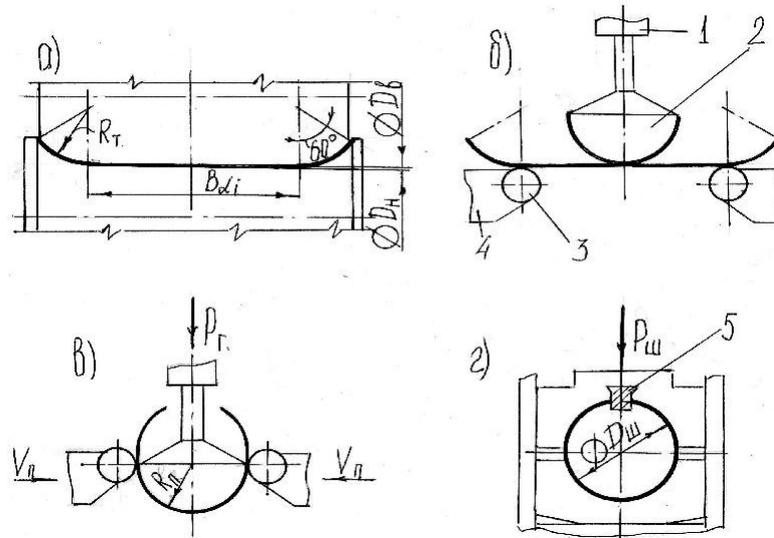


Рис. 1.9. Формовка листов на вертикальных гидравлических прессах: а) предварительная валковая подгибка кромок; б) и в) – гибка листов в V-образную форму; г) окончательная формовка в штампах.

Расчет размеров рабочего инструмента прессов выполняют против хода технологического процесса. Диаметр матриц пресса калибровки принимают на 1÷2 мм больше диаметра готовых труб для учета упругой деформации сжатия после раздачи. Принимая величину раздачи  $\delta = 1,5\%$ , получим значение периметра трубы после стана наружной сварки:

$P_3 = 0,985\pi(D_T + 1\div 2)$ , мм, (1.5) где  $D_T$  – наружный диаметр готовой трубы.

Величину обжатия в прессе окончательной формовки принимаем в пределах 0,3÷1,6%, тогда диаметр штампа равен:

$$D_{ш} = \frac{(0,997 \div 0,984)P_3 + a}{\pi} + S_m, \text{ мм}, \quad (1.6)$$

где  $a$  – ширина фиксирующей шпонки ( $a = 25$  мм);  $S_m$  –

толщина стенки листа.

Радиус пуансона прессы предварительной формовки принимают на  $10 \div 20$  мм меньше радиуса штампа окончательной формовки (для учета упругого распруживания заготовки), т.е.:

$$R_{\text{пуансона}} = (0,5D_{\text{ш}} - 10 \div 20) - 0,5S_m \quad (1.7)$$

Валки кромкогибочной машины выполняют по двухрадиусной калибровке с плоским центральным участком.

При сварке труб электрическим током (ТВЧ, АДС, сопротивлением, индукционной сварке) в диапазоне от 5 до 530 мм применяют формовку листовых заготовок на непрерывных многоклетевых валковых станах. Формовочный стан включает  $6 \div 8$  горизонтальных клеток с приводными нижними валками и  $6 \div 7$  вертикальных клеток с холостыми валками. Основную деформацию металла выполняют горизонтальные валки, вертикальные валки фиксируют формуемую полосу относительно оси стана, предотвращают распруживание профиля. Калибры горизонтальных клеток выполняют открытыми и закрытыми. Последние имеют шайбы, которые обеспечивают угол схождения кромок ленты  $\gamma$  в пределах  $2 \div 4^\circ$ . Ширину шайб принимают по данным производственной практики (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Ширина шайб закрытых калибров

| Диаметр<br>трубы | При двух калибрах |                  | При трех калибрах |                  |                  |
|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|
|                  | Первый<br>калибр  | Второй<br>калибр | Первый<br>калибр  | Второй<br>калибр | Третий<br>калибр |
| 10-20            | 10,8              | 2,4              |                   |                  |                  |
| 20-30            | 12                | 3,2              |                   |                  |                  |
| 30-40            | 13                | 3,2              |                   |                  |                  |
| 40-50            | 14                | 4,0              |                   |                  |                  |
| 50-60            | 16                | 4,7              |                   |                  |                  |
| 60-70            | 16                | 5,0              |                   |                  |                  |
| 70-85            | 16,5              | 5,3              |                   |                  |                  |
| 85-102           | -                 | -                | 16,5              | 11               | 5,5              |
| 102-203          | -                 | -                | 35                | 14               | 7                |
| 203-530          | -                 | -                | 50-100            | 25               | 10               |

При расчете калибровок валков, проектировании формовочных станов необходимо исходить из следующих факторов:

- оптимальной длины формовки (длины стана);
- количества горизонтальных калибров (клетей) –  $N$ ;
- исходной ширины ленты (заготовки) –  $B_l$ .

Наиболее рациональной следует считать формовку трубных заготовок по выдвинутому и обоснованному Емельяненко П.Г. и Жуковским Б.Д. [2] принципу минимального растяжения кромок полосы. Формовочный стан при этом рассматривают как непрерывный очаг сворачивания и считают, что напряжения, возникающие в ленте, не вызывают остаточных деформаций кромок.

На рис. 1.10 приведена условная схема очага сворачивания трубной заготовки. Обозначены:  $L_{кр}$  – длина траектории кромок заготовки;  $L_{ст}$  – длина формовочного стана;  $D_m$  – диаметр трубы;  $B_l$  – ширина ленты.

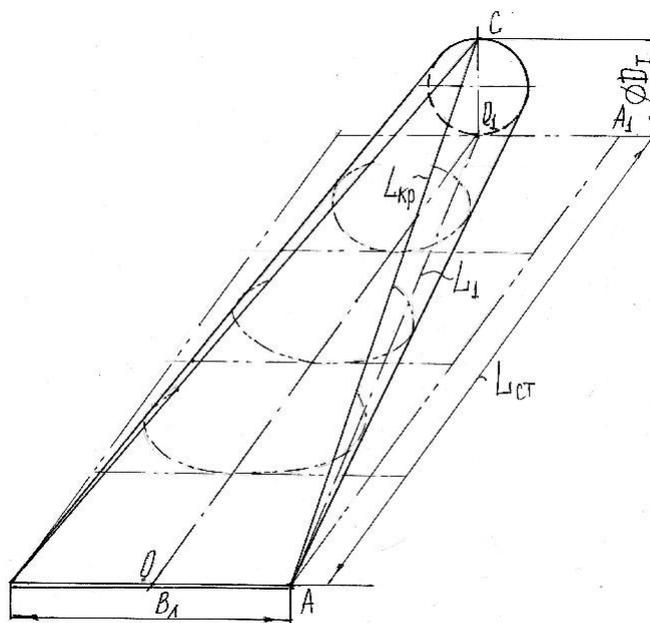


Рис. 1.10. Схема очага сворачивания плоской заготовки в трубу при непрерывной валковой формовке.

Пространственную траекторию движения кромки полосы (точки  $A$ ) заменяем отрезком  $AC$ . Считаем, что:

- 1) поперечные сечения, нормальные к продольной оси

формовки, не искривляются;

2) деформация кромок остается упругой (для углеродистых сталей относительное удлинение не более 0,1%).

Выразим:

$$\delta = \frac{L_{кр} - L_{см}}{L_{см}} = \frac{L_{кр}}{L_{см}} - 1 = [\delta] = 0,001; \quad L_{кр} = \sqrt{L_1^2 + D_m^2};$$

$$L_1^2 = L_{см}^2 + 0,25B_l^2; \quad B_l = \pi D_m;$$

$$L_{кр} = \sqrt{L_{см}^2 + 0,25\pi^2 D_m^2 + D_m^2} = L_{см} \sqrt{1 + 3,465 \frac{D_m^2}{L_{см}^2}} = L_{см} \left(1 + \frac{1}{2} \cdot 3,465 \frac{D_m^2}{L_{см}^2}\right)$$

Подставим значение  $L_{кр}$  в выражение для деформации:

$$\frac{L_{см}}{L_{см}} \left(1 + 1,7325 \frac{D_m^2}{L_{см}^2}\right) - 1 = 0,001$$

После преобразований получаем:

$$\frac{D_m}{L_{см}} = 0,024; \quad L_{см} = 41,7 \cdot D_m$$

При расчетах Жуковский Б.Д. [2] рекомендует принимать длину формовочного стана в пределах  $L_{см} = (40 \div 50) D_{m,max}$ .

Количество горизонтальных клеток (калибров) выбирают по материалам производственной практики в зависимости от диаметра изготавливаемых труб (табл. 1.3).

Таблица 1.3

К выбору количества горизонтальных клеток (калибров  $N$ ) формовочного стана

|                              |       |       |        |      |
|------------------------------|-------|-------|--------|------|
| Диаметр свариваемых труб, мм | 10-30 | 35-60 | 60-102 | >102 |
| Количество клеток            | 5     | 6     | 7      | 8    |

Исходную ширину ленты рассчитывают в зависимости от диаметров изготавливаемых труб с учетом калибровки и припуска на формовку и сварку труб.

Расчетная формула:

$$B_l = \frac{\pi(D_m + \Delta D_{кал} - S_m)}{1 - K}, \quad (1.8)$$

где  $D_m, S_m$  – наружный диаметр и толщина готовой трубы, мм;  $D_{кал}$  – обжатие по диаметру в калибровочном стане ( $D_{кал} = 2 \div 3$  мм);  $K$  – коэффициент, учитывает припуск на сварку и формовку (табл. 1.4).

Таблица 1.4

| Способ сварки             | К выбору коэффициента $K$ |                 |              |                       |
|---------------------------|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------------|
|                           | Токами высокой частоты    | Сопротив-лением | Индукционная | Аргонно-дуговая (АДС) |
| Значение коэффициента $K$ | 0,015                     | 0,025           | 0,03         | 0                     |

### 1.2.2. Расчет профилей калибров формовочных станков

В теории трубного производства разработано пять типов калибровок валков непрерывной валковой формовки сварных труб [3]. На практике, в основном, используют две: однорадиусную и двухрадиусную. Ниже приведена методика расчета основных параметров размеров валков данных калибровок.

#### Калибровка однорадиусная (первый тип)

Рабочий профиль валков выполнен одним, постепенно уменьшающимся радиусом  $R_i$ ; калибры валков открытые (рис. 1.11 а, б) и закрытые (рис. 1.11 в). Исходные данные для расчета:

$N$  – общее количество горизонтальных калибров (клетей) (табл.1.3);

$i$  – порядковый номер горизонтального калибра;

$n$  – порядковый номер первого горизонтального закрытого калибра ( $n = N - (1 \div 2)$ );

$B_l$  – ширина заготовки (ленты);

$S_{ш}$  – ширина разрезных шайб закрытых калибров (размеры приведены в табл. 1.2);

$R_T, S_T$  – наружный радиус и толщина стенки готовой трубы.

#### Калибры горизонтальные открытые

Радиус калибра нижнего валка

$$R_{iH} = \frac{n}{i} \cdot R_T \quad (1.9)$$

Угол формовки  $\varphi_i$  для I клетки

$$\frac{B}{iH} \quad \varphi_i = R^n \quad (1.10)$$

Ширина калибра:

$$\text{при } \varphi < 180^\circ - b_{iH} = 2R_{iH} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right); \text{ при } \varphi \geq 180^\circ - b_{iH} = 2R_{iH} \quad (1.11)$$

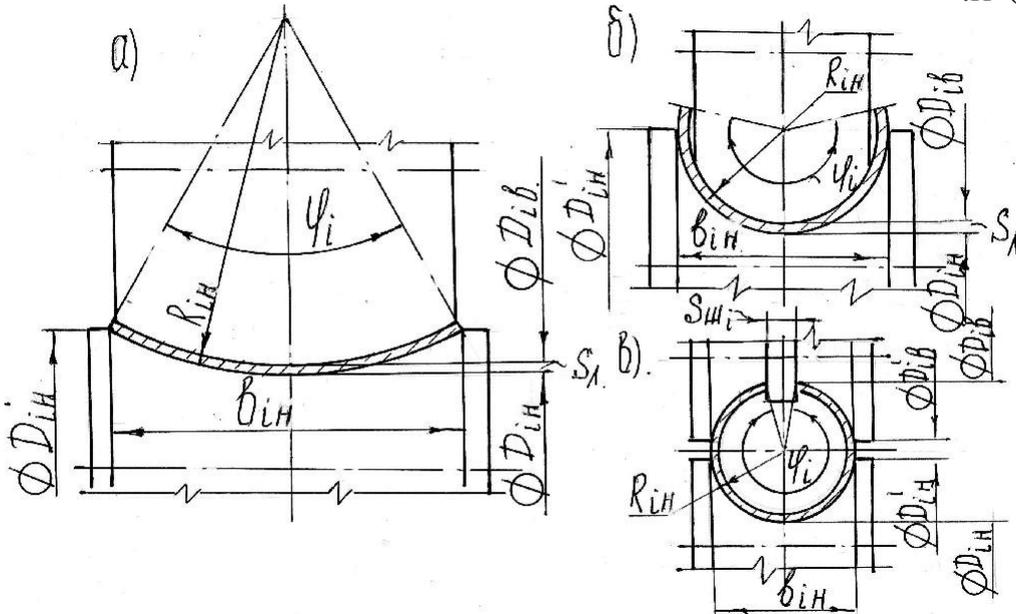


Рис. 1.11. Однорядусная калибровка: а) и б) – открытые калибры; в) закрытый калибр.

Калибры горизонтальные закрытые

Угол формовки  $\varphi_i$ :

$$\varphi_i = 2\pi \cdot \frac{1}{S_{шi}} \cdot \frac{1}{1 + 0,99B_{л}} \quad (1.12)$$

Радиус калибра:

$$R_{iH} = 0,99B_{л} + 0,5S_{л} \quad (1.13)$$

Ширина калибра

$$b_{iH} = 2R_{iH} \cdot \sin\left(\frac{\varphi_i}{2}\right) \quad (1.14)$$

Размеры валков горизонтальных калибров

Диаметр по дну калибра первой горизонтальной клетки:

$$D_{1H} = 2D_{Tmax}, \quad (1.15)$$

где  $D_{Tmax}$  – максимальный диаметр трубы, изготавливаемый на данном агрегате.

Диаметры по дну калибра последующих горизонтальных клеток:

$$D_{iH} = 1,005 \cdot D_{(i-1)H} \quad (1.16)$$

Диаметры нижних валков по ребордам:

При  $\varphi_i \leq 180^\circ$

$$D'_{iH} = D_{iH} + 2R_{iH} \left(1 - \cos \frac{\varphi_i}{2}\right) \quad (1.17)$$

при  $\varphi_i > 180^\circ$

$$D'_{iH} = D_{iH} + 2R_{iH} \quad (1.18)$$

Диаметры верхних валков:

При  $\varphi_i \leq 180^\circ$

$$D_{iB} = D_{Tmax} + 2(R_{iH} - S_l) \left(1 - \cos \frac{\varphi_i}{2}\right) + 40 \div 50 \quad (1.19)$$

при  $\varphi_i > 180^\circ$

$$D_{iB} = D_{Tmax} + 2(R_{iH} - S_l) \cdot \left[1 + \sin\left(\frac{\varphi_i - \pi}{2}\right)\right] + 40 \div 50 \quad (1.20)$$

Ширина нижних валков

При  $\varphi_i \leq 180^\circ$

$$B_{iH} = 2R_{iH} \cdot \sin \frac{\varphi_i}{2} + 40 \div 50 \quad (1.21)$$

при  $\varphi_i > 180^\circ$

$$B_{iH} = 2R_{iH} + 40 \div 50$$

Калибры вертикальных клеток (рис. 1.12).

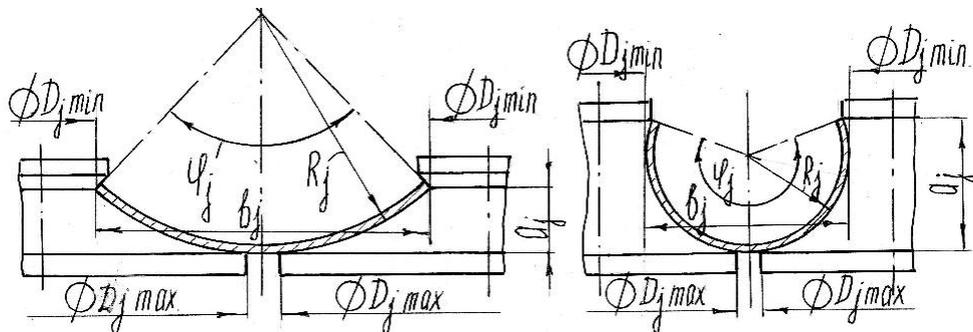


Рис. 1.12. Калибры вертикальных клеток однорадиусной калибровки.

**Угол формовки  $\varphi_j$**

$$\varphi_j = 0,5(\varphi_{i-1} + \varphi_i), \quad (1.22)$$

где  $\varphi_{i-1}$ ,  $\varphi_i$  – соответственно углы формовки горизонтальных калибров до и после вертикального калибра.

Радиус калибра  $R_j$ :

$$R_j = \frac{B_{л}}{\varphi} + 0,5S_{л} \quad (1.23)$$

**Ширина калибра  $b_j$ :**

$$b_j = 2R_j \cdot \sin \frac{\varphi_j}{2} \quad (\text{при } \varphi_j \leq 180^0) \text{ и} \quad (1.24)$$

$$b_j = 2R_j \quad (\text{при } \varphi_j > 180^0) \quad (1.25)$$

**Высота калибра  $a_j$  :**

При  $\varphi_j \leq 180^0$

$$a_j = R_j \cdot (1 - \cos \frac{\varphi_j}{2}) \quad (1.26)$$

при  $\varphi_j > 180^0$ :

$$a_j = R_j + R_j \cdot \sin(\frac{\varphi_j}{2} - \frac{\pi}{2}) \quad (1.27)$$

**Диаметры валков вертикальных калибров** Минимальный диаметр:

$$D_{j.min} = D_{T.max} \quad (1.28)$$

**Максимальный диаметр:**

$$D_{j.max} = D_{j.min} + b_j - \Delta_j, \quad (1.29)$$

где  $\Delta_j$  – зазор между валками ( $\Delta_j = 10 \div 12 \text{ мм}$ ).

Расчеты калибровки валков и их размеров даны в примерах раздела 2.

**Калибровка двухрадиусная (второй тип)**

Характеризуется участками: центральным с углом  $\alpha_i$  и крайними с углом  $\varphi_i$  (рис. 1.13).

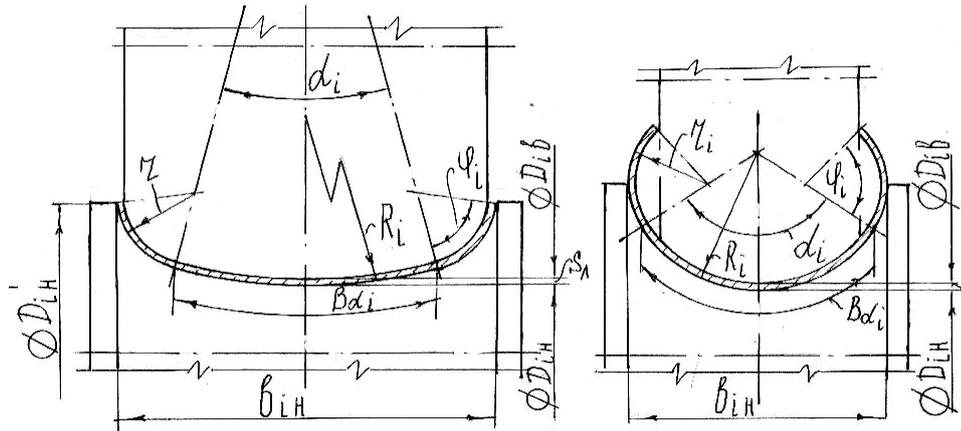


Рис. 1.13. Двухрадиусная калибровка. Открытые калибры.

Ширина центрального участка  $B\alpha_i$ :

$$B\alpha_i = 1,04B_L \cdot \frac{N-i}{N+1} \quad (1.30)$$

Ширину  $B\alpha_i$  рассчитывают для всех горизонтальных калибров.

Калибры горизонтальные открытые

Радиус формовки центрального участка  $R_i$ :

$$R_i = 0,25R_T \left[ (N-2i+1)^2 + m \cdot N \right], \quad (1.31)$$

где  $m$  – порядковый номер горизонтального калибра, в котором  $B\alpha_i \leq 0,5B_L$ .

Для калибров с порядковым номером  $i \geq m+1$ :

$$R_i = (1,7 \div 3,2) \cdot R_T \quad (1.32)$$

Угол центрального участка  $\alpha_i$ :

$$\alpha_i = \frac{B\alpha_i}{R_i} \quad (1.33)$$

Радиус формовки крайних участков принимают равным радиусу трубы  $r_i = R_T$ .

Угол формовки крайних участков  $\varphi_i$ :

$$\varphi_i = \frac{B_L - B\alpha_i}{2r_i} \quad (1.34)$$

Ширина калибров:

При  $(\alpha_i + 2\varphi_i) < 180^\circ$

$$b_{iH} = 2(R_i - r_i) \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2} + 2r_i \cdot \sin \left( \frac{\alpha_i}{2} + \varphi_i \right) \quad (1.35)$$

При  $(\alpha_i + 2\varphi_i) > 180^\circ$  :

$$b_{iH} = 2(R_i - r_i) \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2} + 2r_i \quad (1.36)$$

### Калибры горизонтальные закрытые

**Суммарный угол формовки  $\psi_i$ :**

$$\psi_i = (\alpha_i + 2\varphi_i) = 2\pi \cdot \frac{1}{S_{\text{ш}} \cdot (1 + 0,99B_{\text{л}})} \quad (1.37)$$

**Углы формовки крайних участков  $\varphi_i$  принимают по последнему открытому калибру, как правило,  $\varphi_i = 85-90^\circ$ . Радиусы этих участков  $r_i = R_r$ . Угол формовки центрального**

**участка  $\alpha_I$  определяют как:**

$$\alpha_I = \psi_i - 2\varphi_I \quad (\psi_i \text{ по формуле 1.37})$$

**Радиус центрального участка:**

$$R_i = \frac{B_{\text{л}} - 2r_i \varphi_i}{\alpha_i} + 0,5S_{\text{л}} \quad (1.38)$$

### Размеры валков горизонтальных калибров

**Диаметры по дну калибров рассчитываются по формулам (1.15) и (1.16) аналогично однорадиусной калибровке.**

**Диаметры нижних валков по ребордам:**

**При  $(\alpha_i + 2\varphi_i) < 180^\circ$**

$$D'_{iH} = D_{iH} + 2R_i (1 - \cos \frac{\alpha_i}{2}) + 2r_i \left[ \cos \frac{\alpha_i}{2} - \cos(\frac{\alpha_i}{2} + \varphi_i) \right] \quad (1.39)$$

**При  $(\alpha_i + 2\varphi_i) > 180^\circ$ :**

$$D'_{iH} = D_{iH} + 2R_i (1 - \cos \frac{\alpha_i}{2}) + 2r_i \cdot \sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_i}{2}) \quad (1.40)$$

**Диаметры верхних валков**

**При  $(\alpha_i + 2\varphi_i) < 180^\circ$**

$$D_{iB} = D_{T_{\text{max}}} + 2(R_i - S_{\text{л}})(1 - \cos \frac{\alpha_i}{2}) + 2r_i \left[ \cos \frac{\alpha_i}{2} - \cos(\frac{\alpha_i}{2} + \varphi_i) \right] + 50 \quad (1.41)$$

**При  $(\alpha_i + 2\varphi_i) > 180^\circ$**

$$D_{iB} = D_{T_{\text{max}}} + 2(R_i - S_{\text{л}})(1 - \cos \frac{\alpha_i}{2}) + 2r_i \left[ \sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_i}{2}) + \sin(\frac{\alpha_i}{2} + \varphi_i - \frac{\pi}{2}) \right] + 50 \quad (1.42)$$

### Ширина нижних валков

При  $(\alpha_i + 2\varphi_i) < 180^\circ$

$$B_{iH} = 2(R_i - r_i) \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2} + 2r_i \cdot \sin(\frac{\alpha_i}{2} + \varphi_i) + 50. \quad (1.43)$$

При  $(\alpha_i + 2\varphi_i) > 180^\circ$

$$B_{iH} = 2(R_i - r_i) \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2} + 2r_i + 50. \quad (1.44)$$

### Ширина верхних валков

При  $(\alpha_i + 2\varphi_i) < 180^\circ$

$$B_{iB} = 2(R_i - r_i) \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2} + 2(r_i - S_l) \cdot \sin(\frac{\alpha_i}{2} + \varphi_i).$$

При  $(\alpha_i + 2\varphi_i) > 180^\circ$  для открытых калибров

$$B_{iB} = 2(R_i - r_i) \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2} + 2(r_i - S_l) \cdot \cos(\frac{\alpha_i}{2} + \varphi_i - \frac{\pi}{2}),$$

для закрытых калибров  $B_{iB} = B_{iH}$ .

**Калибры вертикальных клетей (рис. 1.14)**

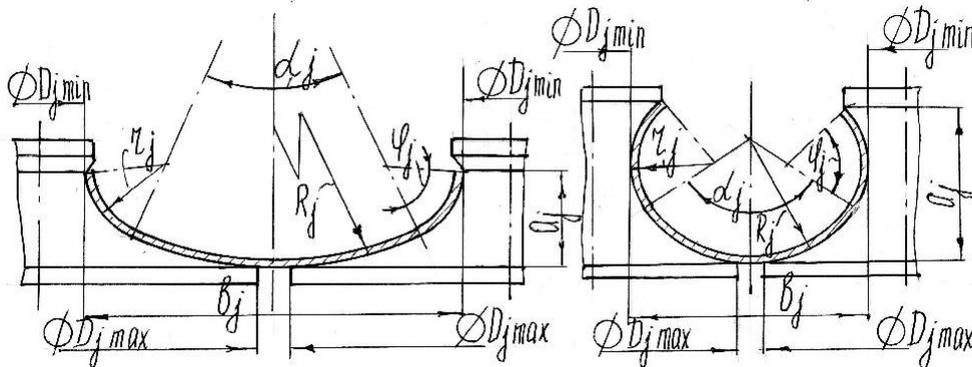


Рис. 1.14. Калибры вертикальных клетей двухрадиусной калибровки.

Углы формовки вертикальных калибров рассчитываются как полусумма соответствующих углов двух смежных горизонтальных калибров, т.е.:

$$\alpha_j = 0,5(\alpha_{i-1} + \alpha_i); \varphi_j = 0,5(\varphi_{i-1} + \varphi_i)$$

Радиусы крайних участков принимаются равными наружному радиусу трубы, т.е.  $r_i = R_T$ . Радиус формовки центрального участка равен:

$$R_j = \frac{B_{л} - 2r_i \cdot \varphi_j}{\alpha_j} \quad (1.45)$$

**Ширина калибров:**

при  $(\alpha_j + 2\varphi_j) < 180^\circ$

$$b_j = 2(R_j - r_j) \cdot \sin \frac{\alpha_j}{2} + 2r_j \cdot \sin(\frac{\alpha_j}{2} + \varphi_j); \quad (1.46)$$

при  $(\alpha_j + 2\varphi_j) > 180^\circ$

$$b_j = 2(R_j - r_j) \cdot \sin \frac{\alpha_j}{2} + 2r_j \cdot \sin(\frac{\alpha_j}{2} + \varphi_j). \quad (1.47)$$

**Высота калибров:**

при  $(\alpha_j + 2\varphi_j) < 180^\circ$

$$a_j = R_j (1 - \cos \frac{\alpha_j}{2}) + r_j [\cos \frac{\alpha_j}{2} - \cos(\frac{\alpha_j}{2} + \varphi_j)]; \quad (1.48)$$

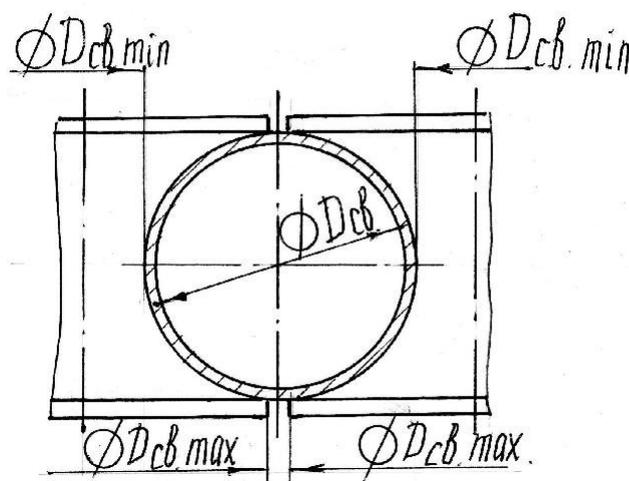
при  $(\alpha_j + 2\varphi_j) > 180^\circ$

$$a_j = R_j (1 - \cos \frac{\alpha_j}{2}) + r_j [\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_j}{2}) + \sin(\frac{\alpha_j}{2} + \varphi_j - \frac{\pi}{2})] \quad (1.49)$$

Диаметры валков вертикальных калибров определяются по формулам (1.28) и (1.29) аналогично однорадиусной калибровке.

**Калибровка валков сварочных клеток**

Калибры сварочных клеток выполняются круглыми (рис. 1.15).



**Рис. 1.15. Калибр сварочной клетки.**

**Расчетные диаметры калибра:**

$$D_{св} = \frac{B_{л} (1 - K_{св})}{\pi} + S_{л}, \quad (1.50)$$

где  $K_{св}$  – коэффициент, учитывающий припуск на сварку и формовку (табл. 1.4).

### **1.2.3. Формовка заготовок в станах спиральной сварки труб**

**В качестве заготовок используется рулонная полоса шириной, равной:**

$$B_{л} = (D_T - S_{л}) \cdot \pi \cdot \sin \alpha,$$

где  $D_T$  – наружный диаметр трубы;  $S_{л}$  – толщина полосы;  $\alpha$  – угол формовки (угол подъема винтовой линии).

**Формовка полосы выполняется в формующих машинах (рис.1.16): втулочных, полувтулочных, валковых, роликовых, валково-оправочных. Элементы формующих машин не приводные. Разнообразие конструктивного исполнения формующих машин определяется большим диапазоном диаметров изготавливаемых труб (от 200 до 1920 мм), системами автоматического регулирования параметрами сварки.**

**Втулочный тип – для каждого размера трубы необходима втулка определенного размера. Втулки изготавливаются из графитизированного чугуна, на внутренней поверхности наносятся твердосплавные полоски для уменьшения износа. Радиус расточки втулки принимают на 1,5÷2 мм больше номинального наружного радиуса трубы. Применяется в станах фирмы «Хеш» (Германия).**

**Полувтулочный тип – половина первого витка формуется в матрице, далее изгиб полосы поддерживается роликами. Применяется в отечественных станах и станах фирмы «Дриам» (Швейцария).**

**В машинах валкового типа формовка полосы на необходимый радиус осуществляется вначале тремя гибочными валками с дальнейшим поддержанием сформованного витка валковой обоймой. В радиальном**

направлении трение скольжения заменяется на трение качения, но в осевом направлении трение скольжения сохраняется. Применяется в станах фирмы «Хеш» (Германия).

В формовочных машинах роликового типа изгиб полосы осуществляется гибочными роликами. Ролики пространственно ориентированы, поддерживают и прижимают в осевом направлении формируемые витки к кромкам свариваемой трубы.

Формующие машины валково-оправочного типа используют при спиральной сварке тонкостенных труб диаметром до 300 мм. Оправка приводная, три валка охватывают полосу снаружи и прижимают ее к оправке. Угол формовки  $\alpha = 63^{\circ}$ , сварка токами высокой частоты. Применяют при изготовлении труб для мелиорации.

### 1.3. Усилия формовки и сварки. Расчет мощности привода машин

#### 1.3.1. Напряженно-деформированное состояние металла при непрерывной формовке ленты в валках

Эпюры действующих напряжений изгиба ленты (полосы) при формовке в валковых станах показаны на рис. 1.17. По оси  $X$  действуют тангенциальные напряжения  $\sigma_{\theta}$  (растяжения – на внешней поверхности, сжатия – на внутренней). По оси  $Z$  в кромках действуют растягивающие напряжения  $\sigma_l$ , в центре полосы (ось  $Z$ ) напряжения  $\sigma_l = 0$ . По оси  $Y$  действуют радиальные напряжения сжатия, максимальные в середине толщины полосы и равные 0 на внешней и внутренней поверхностях. Для сечений центра полосы (ось  $Z$ ) напряжения  $\sigma_{\rho}$  и  $\sigma_{\theta}$  будут главными, и уравнение равновесия в полярной системе координат имеет вид:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \sigma_{\rho} - \sigma_{\theta} = 0,$$

а уравнение пластичности:  $\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta} = \pm \sigma_T$ .

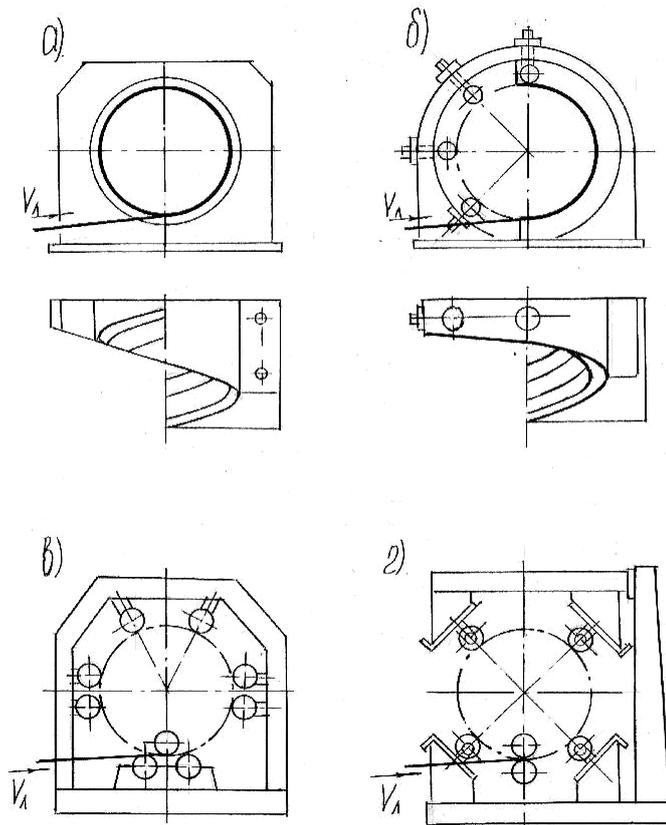


Рис. 1.16. Формующие машины спиральной сварки труб: а) втулочные; б) полувтулочные; в) валковые; г) роликовые.

При совместном решении этих уравнений и использовании граничных условий  $\sigma_\rho = 0$  ( $\rho = R$  и  $\rho = r$ ) получаем:

для зоны растяжения:

$$\sigma_\rho = -\sigma_T \cdot \ln \frac{R}{\rho} ; \sigma_\theta = \sigma_T (1 - \ln \frac{R}{\rho} ) ;$$

для зоны сжатия

$$\sigma_\rho = -\sigma_T \cdot \ln \frac{\rho}{r} ; \sigma_\theta = -\sigma_T (1 - \ln \frac{\rho}{r} ) ,$$

т.е. получаем эпюры распределения тангенциальных напряжений, приведенные на рис. 1.17 а. С учетом упрочнения металла и получения простых выражений представим эти эпюры в виде равновеликих трапеций, как показано на рис. 1.17 б.

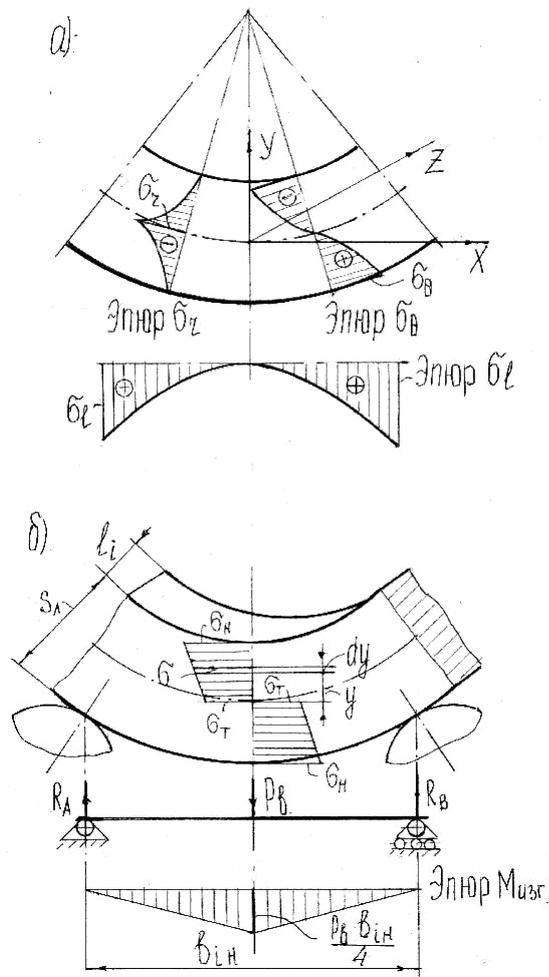


Рис. 1.17. К расчету вертикальных усилий при формовке труб: а) эпюры напряжений изгиба полосы; б) расчетные схемы оценки силовых факторов.

**Элементарный изгибающий момент внутренних сил в сечении:**

$$dM = \sigma \cdot dy \cdot l_i \cdot y$$

**Выразим  $\sigma$  по правилу трапеции, как:**

$$\sigma = \sigma_T + \frac{\sigma_H - \sigma_T}{h} \cdot y.$$

**Суммарный изгибающий момент внутренних сил сечения:**

$$M_{изг.в.с} = 2 \int_{0,5S}^0 \sigma \cdot l_i \cdot y \cdot dy = 2 \int_{0,5S}^0 (\sigma_T + \sigma_H - \sigma_T y) \cdot l_i \cdot y dy =$$

$$= 2\sigma_T l_i \frac{y^2}{2} \Big|_0^{0,5S} - 2\sigma_T \cdot l_i \cdot \frac{y^3}{3 \cdot 0,5S} \Big|_0^{0,5S} + 2\sigma_H \cdot l_i \cdot \frac{y^3}{3 \cdot 0,5S} \Big|_0^{0,5S} = \sigma_T l_i \frac{S^2}{4} - \sigma_T l_i \frac{S^2}{6} +$$

$$+ \sigma_H l_i \frac{S^2}{6} = \sigma_T l_i \frac{S^2}{6} (\frac{\sigma_H}{\sigma_T} + 0,5)$$

Величина  $l_i \frac{S^2}{6} = W_y$  определяет момент сопротивления упругому изгибу полосы длиной  $l_i$ . Напряжения упрочнения

металла выразим, как  $\sigma_H = \sigma_T + \Pi \frac{S}{D}$  ( $\Pi$  – показатель упрочнения,  $\Pi = 110 \div 130$ ).

$$\text{Величина } \frac{\sigma_H}{\sigma_T} + 0,5 = 1,5 + \Pi \frac{S}{D}$$

Момент внутренних сил (пластического изгиба):

$$M_{изг.в.с} = \sigma_T \cdot l_i \cdot \frac{S^2}{6} (1,5 + \Pi \frac{S}{D})$$

В листовой штамповке [6] упрочнение металла при гибке характеризуют коэффициентом  $-0,8 \cdot \varepsilon_{\sigma \text{ вр}}$  ( $\varepsilon_{\sigma \text{ вр}}$  – относительное удлинение материала заготовки при растяжении, соответствующее временному сопротивлению). Момент пластического изгиба определяют по формуле:

$$M_{пл.изг} = \sigma_T \cdot W_{уп} (K + 0,8 \cdot \varepsilon_{\sigma \text{ вр}}),$$

где  $W_{уп}$  – момент сопротивления упругому изгибу;  $K$  – коэффициент (для полосы  $K = 1,5$ , для круга  $K = 1,7$ ).

Определим усилие на валки формовки (рис. 1.17 б). Расчетную схему представим в виде двухопорной балки с расстоянием между опорами, равным ширине формовки нижнего валка ( $l_0 = b_{iH}$ ) и нагруженной в центре усилием  $P_в$ . Максимальный изгибающий момент равен:

$$M_{внеш.сил} = \frac{P_в}{4} b_{iH}$$

Приравняем момент внешних сил моменту пластического

**изгиба полосы:**

$$\frac{P b}{4} = \sigma \frac{l}{r_i} \frac{S^2}{6} (1,5 + \Pi \frac{S}{D}) \quad (1.51)$$

$$P = \frac{\sigma l S^2}{r_i} (1,5 + \Pi \frac{S}{D})$$

**или**

$$P = \frac{\sigma l S^2}{r_i} (K + 0,8\varepsilon) = \frac{\sigma l S^2 m}{1,5b_{iH}} \quad (1.52)$$

где  $l_i$  – длина зоны пластической деформации;  $m$  – коэффициент, учитывает форму сечения полосы и упрочнение металла ( $m = 2$ );  $b_{iH}$  – ширина калибра нижнего валка.

Длина зоны пластической деформации  $l_i$  при валковой формовке не ограничивается контактом металла с валками, ее следует определять по методике Г. Миккельта [4] согласно схеме (рис. 1.18). Изгиб полосы производится непрерывно в калибре, образованном нижним и верхним валками. Контакт верхнего валка с полосой происходит в сечении С-С, длина контактной зоны равна:

$$l_\delta = \sqrt{(R_H' - R_H) \cdot 2R_{np}} = \sqrt{(D_H' - D_H) \cdot \frac{D_H \cdot D_B}{2(D_H + D_B)}} \quad (1.53)$$

где  $D_H'$  – диаметр нижнего валка по ребордам;  $D_H$  – диаметр нижнего валка по дну калибра;  $D_B$  – диаметр верхнего валка.

Из схемы рис. 1.18:

$$l_i \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{4} = l_\delta \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}; \quad l_i = l_\delta \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\gamma}{4}}; \quad \frac{\gamma}{2} = \arccos \frac{2l_\delta}{D_B} \quad (1.54)$$

Подставляя значение  $l_i$  формулы (1.54) в аналитическое выражение (1.52), определяют усилие гибки металла в калибрах валков. Но они составляют только часть усилия на рабочие валки. Современная методика расчета силовых параметров формовочных станков исходит из условия обеспечения перемещения ленты (полосы) при формовке.

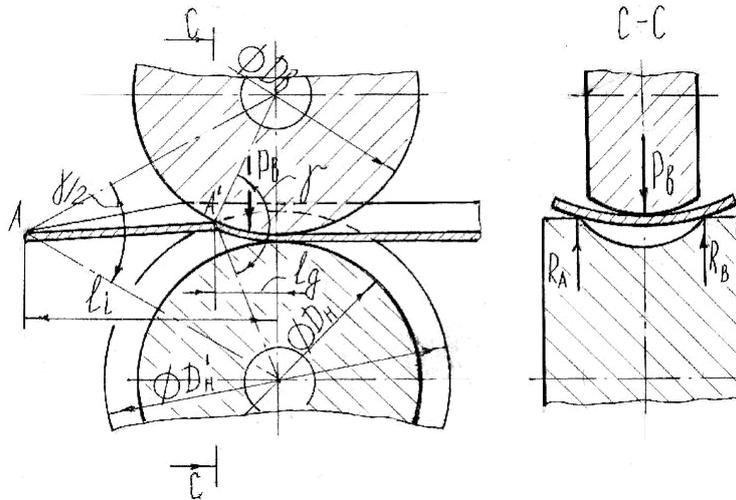


Рис. 1.18. К расчету длины зоны пластической деформации при непрерывной валковой формовке труб.

### 1.3.2. Метод ВНИТИ расчета энергосиловых параметров валковой непрерывной формовки труб

Условие равновесия ленты (полосы):

$$\sum_1^{n_1+n_2} T_{тян} \geq \sum_1^{n_1} F_{iГ.О} + \sum_1^{n_2} F_{iГ.З} + \sum_1^{n_3} F_{jВ.В}, \quad (1.55)$$

где  $T_{тян}$  – активная составляющая протягивания полосы через калибр, Н;  $F_{Г.О}$  – сопротивление перемещению полосы в открытом калибре, Н;  $F_{Г.З}$  – сопротивление перемещению полосы в закрытом калибре, Н;  $F_{В.В}$  – сопротивление перемещению полосы в вертикальном холостом калибре, Н;  $n_1, n_2$  – количество горизонтальных открытых и закрытых калибров соответственно;  $n_3$  – количество вертикальных холостых калибров.

$$F_{iГ.О} = 0,266 \cdot \sigma_T S^2 \alpha \cdot m;$$

$$F_{iГ.З} = 0,266 \cdot \sigma_T S^2 \alpha \cdot m + \sigma_T B_l S \cdot \varepsilon, \quad (1.56)$$

где  $\alpha$  – угол подгибки полосы в данном калибре, радиан;  $B_l$  – ширина ленты, мм;  $\varepsilon$  – обжатие в закрытом калибре ( $\varepsilon = 0,01$ );  $m$  – коэффициент ( $m = 2$ );  $\sigma_T$  – предел текучести материала полосы.

Угол подгибки  $\alpha$  определяют с учетом пружинения металла ( $\beta = 0,15$ ).

Для однорадиусной калибровки:

$$\alpha = (1 + \beta)(\varphi_i - \varphi_{i-1}), \quad (1.57)$$

для двухрадиусной калибровки:

$$\alpha = (1 + \beta)[(\alpha_i + 2\varphi_i) - (\alpha_{i-1} + 2\varphi_{i-1})], \quad (1.58)$$

где  $\alpha_i, \varphi_i$  – углы калибров (см. выше).

$$F_{jB.B} = fP_{jB.B}, \quad (1.59)$$

где  $f$  – коэффициент трения ( $f=0,12$ );  $P_{jB.B}$  – радиальное усилие в вертикальном калибре.

$$P_{jB.B} = (1 + \beta) \frac{\sigma l S^2}{1,5a_j}; l_{jB.B} = \sqrt{(b_{i-1} - b_j) \cdot 0,5D_{jmin}}, \quad (1.60)$$

где  $a_j$  – высота вертикального калибра (ф.1.26);  $b_j$  и  $b_{i-1}$  – ширина калибров вертикального (ф. 1.24) и предшествующего горизонтального (ф. 1.11);  $D_{jmin}$  – минимальный диаметр вертикального калибра (ф. 1.28).

$$T_{итян} = fP_{iB}, \quad (1.61)$$

где  $P_B$  – вертикальное усилие.

Для открытых калибров:

$$P_{jB.O} = (1 + \beta) \sigma T_1 \frac{l_i \cdot m S_2}{5 b_{iH}} \quad (1.62)$$

Для закрытых калибров:

$$P_{iB.3} = (1 + \beta) \frac{F_{iГ.3}}{f} \quad (1.63)$$

Рассчитываем составляющие уравнения (1.55). Если условие уравнения (1.55) выполняется, то расчет заканчиваем, вертикальные усилия на рабочие валки принимаем равными расчетным по формулам 1.62 и 1.63. Если условие уравнения (1.55) не выполняется, то рассчитываем дополнительное вертикальное усилие для открытых калибров:

$$P_{iB.дон} = \frac{\sum_1^{n_1} F_{iГ.O} + \sum_1^{n_2} F_{iГ.3} + \sum_1^{n_3} F_{jB.B} - \sum_1^{n_1+n_2} T_{тян}}{n_1 \cdot f}, \quad (1.64)$$

Дополнительное вертикальное усилие в открытых калибрах создается за счет специальных пружин, которые

прижимают верхний валок к нижнему. Пружины размещаются между нажимными винтами и подушками валков. Суммарное вертикальное усилие в открытом калибре на рабочие валки равно:

$$P_{iB.\Sigma} = P_{iB.O} + P_{iB.\partial on} \quad (1.65)$$

**В закрытых калибрах вертикальное усилие определяется по формуле (1.63).**

**Момент привода одного нижнего валка открытого калибра:**

$$M'_{iK} = P_{iB.O} \cdot \psi \cdot l_{i\partial} \left(1 + \frac{D_{iH}}{D_{iB}}\right) + P_{iB.\partial on} \cdot f \frac{D_{iH}}{2} + P_{iB.\Sigma} \cdot \mu \frac{d_{\partial on}}{2} \left(1 + \frac{D_{iH}}{D_{iB}}\right) \quad (1.66)$$

где  $\psi$  – коэффициент плеча ( $\psi = 0,5$ );  $f$  – коэффициент трения скольжения ( $f = 0,1$ );  $\mu$  – коэффициент трения качения ( $\mu = 0,005$ );  $d_{\partial on}$  – средний диаметр подшипников качения опор валков.

**Момент привода валков закрытого калибра (для 2-х валков):**

$$M''_{iK} = F_{iГ.З} \cdot \left( D_{iH} + \frac{2}{3} \cdot R_{iH} \right) + P_{iB.З} \cdot \mu \cdot d_{\partial on}, \quad (1.67)$$

где  $R_{iH}$  – радиус закрытого калибра.

**Расчет мощности привода валков формовочного стана рассмотрен в примерах.**

### Усилия в сварочной клетке

Суммарное радиальное усилие складывается из усилия доформовки ленты и усилия сдавливания ее кромок:

$$P_{св} = \sigma_T \cdot \frac{S^2 \cdot l_{\partial.ф}}{3 \cdot d_{св}} \cdot K_p + 2,3 \sigma_T S \cdot \frac{l_c}{v}, \quad (1.68)$$

где  $d_{св}$  – диаметр калибра сварочной клетки;  $l_{\partial.ф}$  – длина зоны доформовки;  $l_c$  – длина зоны сварки;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий растяжение кромок ( $K_p = 1,2$ );  $v$  – коэффициент, учитывающий нагрев кромок ленты ( $v = 1,7 \div 2,0$ ).

$$l_c = \frac{KB_{л}}{2 \operatorname{tg} \bar{2}} \gamma; l_{d.ф} = \sqrt{R_{св} \sqrt{d_{ф}^2 - d_{св}^2} - l_c},$$

где  $K$  – коэффициент (табл. 1.4);  $R_{св}$  – радиус вала сварочной клетки;  $d_{ф}$  – диаметр калибра последней формовочной клетки.

### 1.3.3. Усилия формовки на гидравлических прессах

Предварительная формовка листов в  $V$ -образный профиль выполняется с перемещением подвижных роликовых опор (рис. 1.19), поэтому для расчета максимального усилия формовки используют метод работ [4]. Схема гибки листов и диаграмма действующих усилий на подвижный пуансон приведена на рис. 1.19 а.

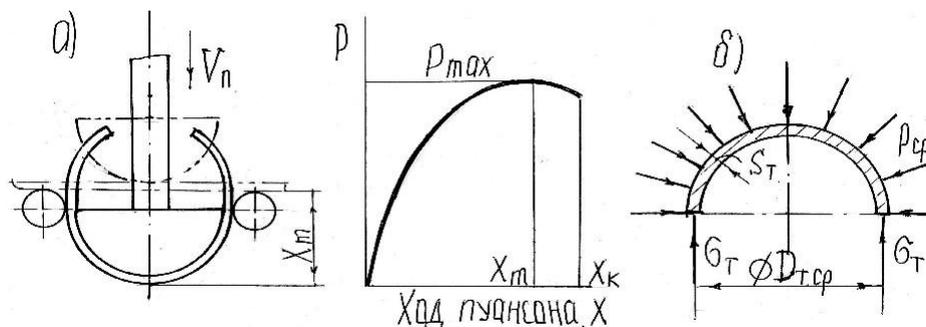


Рис. 1.19. Расчетные схемы определения усилий формовки листов на гидравлических прессах: а) предварительной гибки  $V$ -образного профиля; б) окончательной формовки в штампах.

Механическая работа гибки листов (по диаграмме рис. 1.19 а) равна:

$$A_{W1} = \int_0^{X_k} P dx = \int_0^{X_m} P dx + P_{max} (X_k - X_m)$$

$$X_K \approx 1,15R; \quad X_{TP} \approx R; \quad P = P_{max} \left( \frac{X}{X_m} \right)^n.$$

Подставляя значения параметров в уравнение работы и преобразовывая, получим:

$$A_{W1} = P_{max} \cdot R \cdot \frac{1,15 + 0,15n}{n + 1}$$

где  $n$  – коэффициент, определяемый материалом заготовок и трением скольжения ( $n = 0,35$ );  $R_{TP}$  – радиус готовой трубы.

Механическую работу определяют [4] также и как произведение объема изогнутой части листа на среднюю работу гiba:

$$A_{W2} = \pi \cdot R_{TP} \cdot S_l \cdot L_l \left( \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} + \frac{2}{3} \Pi \cdot \frac{S_l}{D_{TP}} \right) \approx 0,91 (\sigma_T + 1,15\Pi) \cdot S_l^2 \cdot L_l,$$

где  $\Pi$  – показатель упрочнения металла ( $\Pi = 110 \div 130$ );  $S_l, L_l$  – соответственно толщина и длина формуемых листов.

Приравняв  $A_{W1} = A_{W2}$  и подставив  $n = 0,35$ , окончательно получим:

$$P_{max} = 1,02 (\sigma_T + 1,15\Pi) \cdot \frac{S_l^2 \cdot L_l}{R_{TP}}, \quad (1.69)$$

Усилие при окончательной формовке определяется из условия равновесия выделенного элемента (рис. 1.19 б):

$P = 2K \cdot \sigma_T \cdot S_l \cdot L_l$ , (1.70) где  $K$  – коэффициент ( $K = 1,05$ ).

### 1.3.4. Усилия и мощность привода машин при спиральной сварке труб

На рис. 1.20 а приведена расчетная схема действующих нагрузок в полувтулочной машине. Усилие на опорный ролик:

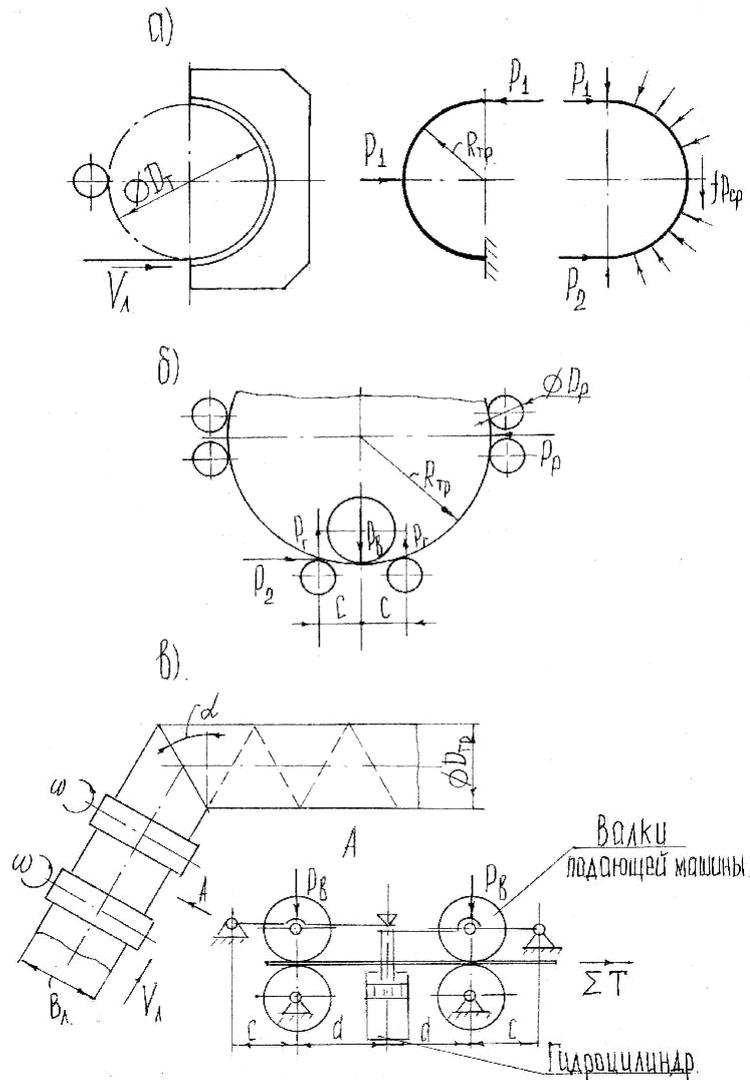
$$P_1 = R_{TP} \frac{M_{nl}}{2M},$$

где  $M_{nl}$  – момент пластического изгиба полосы;  $R_{TP}$  – радиус формовки (трубы).

Момент пластического изгиба с учетом упрочнения металла:

$$\frac{M_{nl}}{B_l} = \sigma_T \cdot W_{yn} (K + 0,8\varepsilon_{\sigma_{свр}}) = \sigma_T \cdot \frac{S_l^2 \cdot B_l}{6 \cdot \cos \alpha} (1,5 + 0,8\varepsilon_{\sigma_{свр}}),$$

где  $\cos \alpha$  – длина ребра гiba [4];  $\alpha$  – угол формовки ( $\alpha = 19 \div 40^\circ$ ).



**Рис. 1.20. Схемы к расчету усилий при спиральной сварке труб: а) в полувтулочных формующих машинах; б) в валковых формующих машинах; в) в машинах подачи металла.**

**При движении металла по направляющим полувтулки возникают силы трения скольжения, равные:**

$$F_{TP} = f \cdot P_{cp} \cdot B_L \cdot \pi \cdot R_{TP},$$

где  $f$  – коэффициент трения ( $f = 0,1 \div 0,12$ );  $P_{cp}$  – контактное среднее давление на полувтулку.

$$P_{cp} = \frac{P_1}{2R_{TP} B_L}; \quad F_{TP} = P_1 \cdot f \cdot \frac{\pi}{2}.$$

**Рассматриваем полосу как жесткую подвижную ленту, усилие  $P_1$  переносим в точку  $C$ . Окончательно усилие формовки  $P_2$ :**

$$P_2 = P + F = P \left( 1 + f \frac{\pi}{2} \right) = \frac{\sigma_T \cdot S^2 \cdot B_{л}}{3 \cdot \cos \alpha \cdot R_{TP}} (1,5 + 0,8 \varepsilon_{\sigma_{вр}}) \left( 1 + f \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.71)$$

На рис. 1.20 б приведена расчетная схема действующих нагрузок в валковых машинах. Радиальные усилия на гибочные валки:

$$P_{Г} = \frac{M_{пл}}{C} = \sigma_T \cdot \frac{S^2 \cdot B_{л}}{6C \cdot \cos \alpha} (1,5 + 0,8 \varepsilon_{\sigma_{вр}})$$

$$P_{в} = 2P_{Г}.$$

Радиальные усилия на поддерживающие ролики:

$$P_{Р} = \frac{2M}{R_{ТР}}$$

Усилие формовки  $P_2$ :

$$P_2 = 4P_1 \frac{K + \mu \cdot R_{П}}{R_{в}} + 3P_{Р} \cdot \frac{K}{R_{Р}}, \quad (1.72)$$

где  $K$  – плечо трения качения ( $K = 1 \div 1,2$  мм);  $\mu$  – коэффициент трения подшипников качения ( $\mu = 0,005$ );  $R_{П}$  – радиус подшипников качения;  $R_{в}$  – радиус валков гибки;  $R_{Р}$  – радиус поддерживающих роликов.

Движение полосы при спиральной сварке труб (рис. 1.20 в) обеспечивается подающей машиной. Суммарное усилие протягивания полосы:

$$\sum T = P_2 + T_1 + T_2, \quad (1.73)$$

где  $T_1$  – сопротивление перемещения полосы в кромкострогальном устройстве;  $T_2$  – сопротивление перемещению полосы при резке кромок дисковыми ножницами.

Усилие  $T_1$  определяем в соответствии с [8]:

$$T_1 = 2C_P \cdot t^x \cdot S_{л}^y, \quad (1.74)$$

где  $C_P = 200$ ;  $x = 1,0$ ;  $y = 0,75$ ;  $t$  – глубина строгания ( $t = 2$  мм);  $S_{л}$  – толщина полосы.

Дисковые ножи не приводные, усилие  $T_2$  определяем из условия равенства моментов:

$$T_2 \cdot R_H = 2P_{рез} \cdot a; \quad T_2 = \frac{2P_{рез} \cdot a}{R_H}, \quad (1.75)$$

где  $P_{рез}$  – усилие резания дисковыми ножницами;  $a$  – плечо приложения силы  $P_{рез}$ ;  $R_H$  – радиус ножей.

В соответствии с [9]:

$$P_{рез} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{3 - \varepsilon}{4 \operatorname{tg} \alpha} \cdot H \cdot \varepsilon_H \cdot \sigma_{вр} \cdot S_{л}^2$$

$$K_1 = 0,7; K_2 = 1,25; K_3 = 1,25; \varepsilon_H = 0,35.$$

$$\alpha = \arccos \left[ 1 - \frac{0,5(S_{л} + \Delta)}{R_H} \right]; \quad a = R_H \cdot \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Величина перекрытия ножей = 1 мм.

Вертикальное усилие на валки подающей машины:

$$P_{верт} = \frac{\sum T}{4f}, \quad (1.76)$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения ( $f = 0,1 \div 0,12$ ).

Мощность электродвигателя привода валков подающей машины:

$$N_{дв} = \frac{\sum T \cdot V_{св}}{1,02 \cdot 60 \cdot \eta}, \quad \text{кВт}, \quad (1.77)$$

где  $V_{св}$  – скорость сварки ( $V_{св} = 2$  м/мин);  $\eta$  – к.п.д. привода

( $\eta = \eta_m^2 \cdot \eta_{ред} \cdot \eta_{ш.кл} \cdot \eta_{дн.шт}^4 \approx 0,65$ ).

#### 1.4. Формовка гнутых профилей

В производственной практике применяется несколько способов валковой формовки гнутых профилей [10]:

1) непрерывное профилирование рулонной заготовки в рабочих клетях с порезкой готовых профилей на мерные длины летучими пилами или стационарными ножницами с остановкой формовочного стана (сортовые, коробчатые, перфорированные и просечные профили). Для обеспечения бесконечного процесса профилирования в линии подготовки концевые участки двух смежных рулонов свариваются встык

(сварка плавлением) или внахлест (при толщине полосы до 1,2 мм);

2) поштучное профилирование заготовок с предварительной их порезкой на мерные длины (гофрированные профили). Резку заготовок выполняют на стационарных гильотинных ножницах;

3) комбинированный: рулонную заготовку формуют до профиля открытой переходной формы, режут летучими ножницами и доформовывают в рабочих валковых клетях до готовых размеров (сортовые профили). В линии подготовки заготовки свариваются в бесконечную полосу.

В зависимости от формы гнутых профилей применяют несколько систем калибровок [10]:

1) последовательную, при формовке от оси к периферии, и наоборот (гофрированные, перфорированные профили);

2) одновременную, при формовке профиля сразу по всей ширине заготовки (сортовые профили);

3) комбинированную, сочетающую последовательные и одновременные операции (С-образные профили, коробки).

Выбор той или иной системы определяется материалом исходных заготовок, количеством рабочих клеток формовочного стана.

В основу расчетов каждой из систем калибровок может быть положен один из следующих трех принципов формовки (рис. 1.21 а):

1) переменные радиусы закруглений с постоянным расстоянием между центрами дуг мест изгиба;

2) постоянные радиусы закруглений мест изгиба с переменным расстоянием между центрами их дуг;

3) постоянные радиусы закруглений с постоянным расстоянием между центрами дуг мест изгиба.

По первому принципу формовки переменные радиусы закруглений мест изгиба определяются из условия постоянства ширины криволинейных участков (рассчитывают по конечным размерам изделий). При этом обеспечивается свободный доступ металла к местам изгиба, уменьшаются нагрузки на

валки и их износ. Недостатки: несколько ухудшается геометрия профиля, большее, в сравнении с постоянными радиусами формовки, количество клетей.

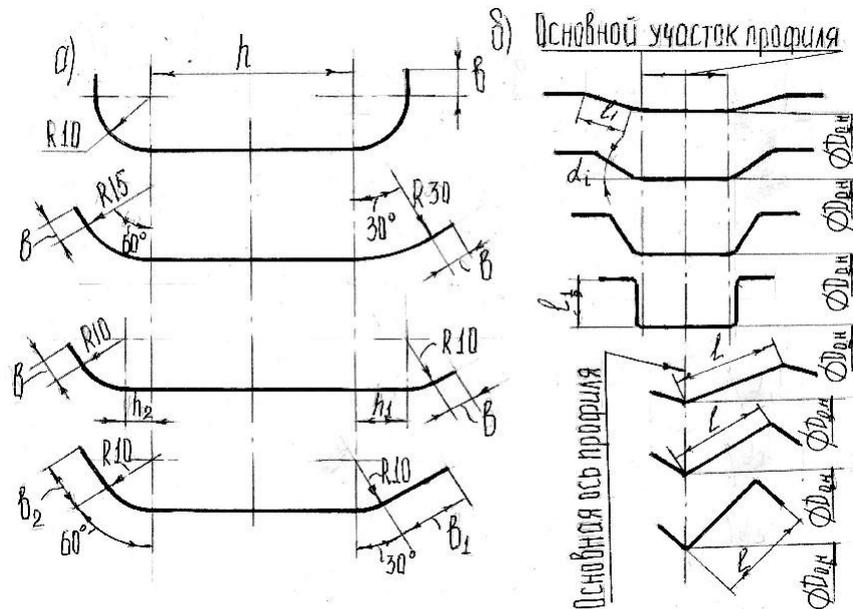


Рис. 1.21. Схемы к выбору параметров калибровки валков профилирования гнутых профилей: а) основные принципы формовки; б) положение профиля в валках.

По второму и третьему принципам радиус формовки определяется размерами конечного профиля, формовка мест изгиба выполняется за счет металла центральных или периферийных участков. Применение постоянных радиусов при формовке позволяет получать более точную геометрию готового профиля, но при этом требуется большее усилие при профилировании, увеличивается износ валков. При изготовлении швеллеров сложно выдержать угол  $90^\circ$  между стенкой и полками в последних калибрах (металла отформовывают за счет осевых усилий, что сложно выполнить горизонтальными валками). В этом случае применяют перегиб полки на угол  $92^\circ$  вертикальными валками, но при этом возникают большие упругие деформации в стенке швеллера. Поэтому получить заданную геометрию профиля весьма затруднительно.

**В производственных условиях наибольшее распространение получил первый принцип формовки.**

Для устойчивости заготовки в процессе профилирования, предохранения ее от продольной деформации и скручивания необходимо правильно выбрать основную ось или основной участок профиля (рис. 1.21 б). Основной осью профиля называется прямая линия, проходящая вдоль заготовки через такую точку сечения профиля, которая на всем пути ее формоизменения не меняет своего положения и не подвержена деформации на всех переходах. Участок профиля, параллельный осям валков, называется основным участком.

Для симметричных профилей основная ось проходит по середине их ширины или по месту изгиба (уголки). Профиль следует располагать таким образом, чтобы его полки подгибались вверх.

Для получения оптимального скоростного режима, обеспечивающего минимальные потери на трение, необходимо, по возможности, располагать участкигиба металла на основных (катающих) диаметрах рабочих валков. Основные (катающие) диаметры определяют скорости формовки заготовок, для нижнего валка это минимальные диаметры дна калибра. Их выбирают из условия прочности валкового узла, возможности термической обработки элементов рабочего инструмента. Соотношение основных диаметров верхнего и нижнего валков  $D_{O.V} / D_{O.H}$  определяется передаточным числом шестеренной клетки –  $иш.кл$  (при двухвалковом приводе  $D_{O.V} = D_{O.H} \cdot иш.кл$ ). При приводе только нижних валков основные диаметры верхних валков определяются максимальной высотой формовки ( $n_{max}$ ), прочностью валкового узла.

Агрегаты для производства гофрированных листовых профилей обычно изготавливаются с равными основными диаметрами валков ( $D_{O.V} = D_{O.H}$ ). При этом врез калибра осуществляется поровну в верхний и нижний валок.

#### ***Расчет ширины заготовки***

Ширину заготовки определяют аналитическим, графо-

аналитическим и графическим методами в зависимости от сложности сечения профиля и точности расчета. При определении ширины исходной заготовки аналитическим методом сечение профиля делится на элементарные участки: прямолинейные и места закруглений. Ширина исходной заготовки:

$$B_3 = \sum_1^{n_1} b_{i\Pi} + \sum_1^{n_2} b_{iИ}, \quad (1.78)$$

где  $b_{i\Pi}$  – ширина прямолинейного элемента;  $b_{iИ}$  – ширина места изгиба;  $n_1$  – количество прямолинейных участков;  $n_2$  – количество мест закруглений.

Ширину участка закруглений (изгиба) определяют по нейтральной линии деформации:

$$b_{ii} = \frac{\pi \cdot \rho_i \cdot \alpha_i}{180},$$

где  $\alpha$  – угол, образуемый между участкам профиля при его подгибке (град);  $\rho_i$  – радиус закругления по нейтральной линии деформации  $\rho_i = r_{в} + K \cdot S$ , где  $r_{в}$  – внутренний радиус закругления мест изгиба;  $S$  – толщина заготовки;  $K$  – коэффициент (табл. 1.5).

Таблица 1.5

| К расчету коэффициента $K$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Отношение $r_{в}/S$        | 1    | 1,2  | 1,3  | 1,5  | 2    | 3    | 4    | 5    | 6,6  | >6,5 |
| Значение $K$               | 0,41 | 0,42 | 0,43 | 0,44 | 0,45 | 0,46 | 0,47 | 0,48 | 0,49 | 0,5  |

### 1.4.1. Формовка сортовых гнутых профилей

Одним из дефектов при производстве данных профилей является волнистость кромок вследствие больших углов подгибки за проход. Волнистость обусловлена продольными растягивающими напряжениями кромок полосы и сжимающими вдоль мест изгиба. Неравномерность деформации продольных элементов уменьшается с увеличением длины переходных зон. Как отмечено в [2], для

гнуемых профилей, как и при валковой формовке сварных труб, при расчете калибровки валков необходимо исходить из принципа минимального растяжения кромок полосы. Профилегибочный стан в этом случае следует рассматривать как непрерывный очаг подъема кромок полосы. На рис. 1.22 а приведены условные схемы гибки металла для швеллера и равнобокого уголка. Обозначены:  $L_{KP}$  – длина траектории кромок полосы;  $L_{\Phi}$  – длина профилегибочного стана;  $B$  – ширина полки элемента профиля;  $K$  – деформация кромок (допустимое относительное удлинение  $K = 0,05\%$ );  $\alpha_c$  – суммарный угол подгибки элемента профиля.

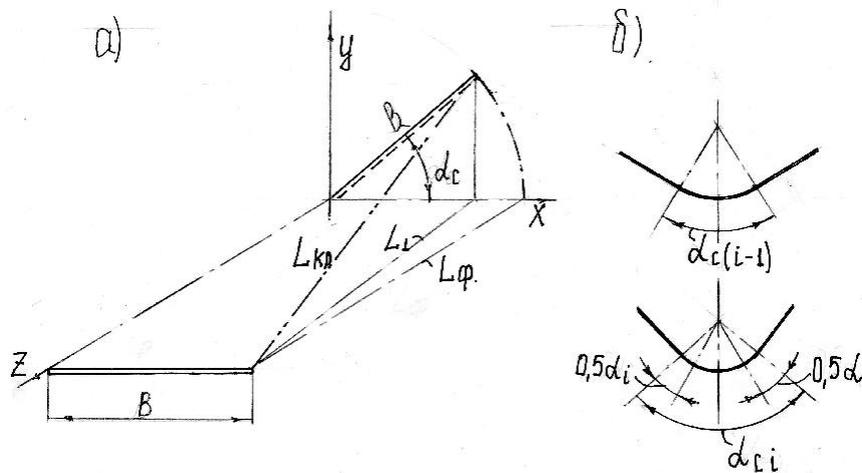


Рис. 1.22. Схемы к расчету: а) длины стана профилировки сортовых профилей; б) углов подгибки.

Выразим:

$$K = \frac{L_{KP} - L_{\Phi}}{L_{\Phi}} = \frac{L_{KP}}{L_{\Phi}} - 1 \quad (1.79)$$

Из геометрических соотношений:

$$\begin{aligned} L_{KP}^2 &= L_{\Phi}^2 + (B \sin \alpha_c)^2; & L_{\Phi}^2 &= L^2 + (B - B \cos \alpha_c)^2; \\ L_{KP} &= \sqrt{L_{\Phi}^2 + B^2 [\sin^2 \alpha_c + (1 - \cos \alpha_c)^2]} = \\ &= L_{\Phi} \cdot \sqrt{1 + \frac{B^2}{L_{\Phi}^2} [\sin^2 \alpha_c + (1 - \cos \alpha_c)^2]} \end{aligned} \quad (1.80)$$

**Обозначим:**

$$\Delta = [\sin^2 \alpha_c + (1 - \cos \alpha_c)^2] = \sin^2 \alpha_c + 1 - 2 \cos \alpha_c + \cos^2 \alpha_c = \\ = 2 - 2 \cos \alpha_c = 2(1 - \cos \alpha_c)$$

Разложим подкоренное выражение формулы (1.80) в ряд и ограничимся двумя первыми членами ряда:

$$L_{KP} = L_{\phi} \left( 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{L_{\phi}^2} \cdot D \right) = L_{\phi} \left[ 1 + \frac{B^2}{L_{\phi}^2} (1 - \cos \alpha_c) \right].$$

Подставим значение  $L_{KP}$  в уравнение (1.79) и решим его относительно отношения  $\frac{B}{L_{\phi}}$ :

$$K = \frac{L_{\phi}}{L_{\phi}} \left[ 1 + \frac{B^2}{L_{\phi}^2} (1 - \cos \alpha_c) \right] - 1 = \frac{B^2}{L_{\phi}^2} (1 - \cos \alpha_c); \\ \frac{B}{L_{\phi}} = \sqrt{\frac{K}{1 - \cos \alpha_c}} \quad (1.81)$$

Подставляя в уравнение (1.81) значение  $K = 0,005$ , получим минимальную длину формовки:

для швеллеров ( $\alpha_c = 90^0$ ):

$$L_{\phi} = \frac{B}{\sqrt{K}} = \frac{B}{\sqrt{0,0005}} = 44,72B \approx 45B \quad (1.82)$$

для уголков ( $\alpha_c = 45^0$ ):

$$L_{\phi} = \frac{B}{\sqrt{\frac{K}{1 - \cos 45^0}}} = \frac{B}{\sqrt{\frac{0,0005}{1 - 0,707}}} = 24,2B \approx 25B \quad (1.83)$$

Формулы (1.82) и (1.83) позволяют дать оценку длины профилегибочного стана, при расчетах следует принимать максимальные значения ширины  $B$  расчетного сортамента агрегата.

Профилегибочный стан включает рабочие клетки с горизонтальными и вертикальными калибрами. Гибка металла производится в горизонтальных калибрах. Вертикальные калибры фиксируют полосу по продольной оси стана, в последних клетях участвуют в разгибке металла для

компенсации пружинения. Число технологических переходов на различных заводах определяется по разному. На основе производственного опыта, по материалам литературных источников [10] в табл. 1.6 приведены рекомендуемые данные выбора количества горизонтальных калибров (клетей) стана профилегибки. Материалы даны для максимальных значений толщины стенки сортамента профилей.

Таблица 1.6

**К выбору количества горизонтальных  
клетей профилегибочного стана**

| Тип профиля | Ширина подгибаемой полки, мм |    |     |         |
|-------------|------------------------------|----|-----|---------|
|             | 50                           | 58 | 100 | 120÷160 |
|             | Количество калибров (клетей) |    |     |         |
| Уголок      | 7                            | 8  | 8   | 9       |
| Швеллер     | 10                           | 12 | 12  | -       |

Режимы формовки полос характеризуются углами подгибки за переход, радиусами кривизны мест изгиба, размерами и геометрией рабочего инструмента. Суммарным углом подгибки  $\alpha_c$  считается центральный угол, опирающийся на криволинейный участок сечения профиля места изгиба (рис. 1.22 б). Угол подгибки  $\alpha_i$  в данном переходе:

$$\alpha_i = \alpha_{ci} - \alpha_{c(i-1)},$$

где  $\alpha_{c(i-1)}$  – суммарный угол подгибки предшествующего горизонтального калибра;  $\alpha_{ci}$  – суммарный угол подгибки расчетного калибра.

Углы подгибки  $\alpha_i$  принимают в зависимости от ширины подгибаемого элемента профиля, толщины полосы, способа формовки (непрерывного или штучного). На рис. 1.23 приведены диаграммы допустимых углов подгибки  $\alpha_i$  за проход для уголков и швеллеров по материалам работы [10]. Значения углов  $\alpha_i$  следует выбирать при формовке углеродистых сталей для промежуточных рабочих клетей профилегибочного стана. Валки первой клетки, как правило, выполняют цилиндрическими. Они служат для создания необходимых тянущих усилий формовки. В последней и

предпоследней клетях суммарные углы подгибки ( $\alpha_c$ ) принимают равными углам конечного профиля. В промежуточной вертикальной клетке между ними производят разгибку на  $2 \div 3^\circ$  в сторону, обратную проводившейся подгибке.

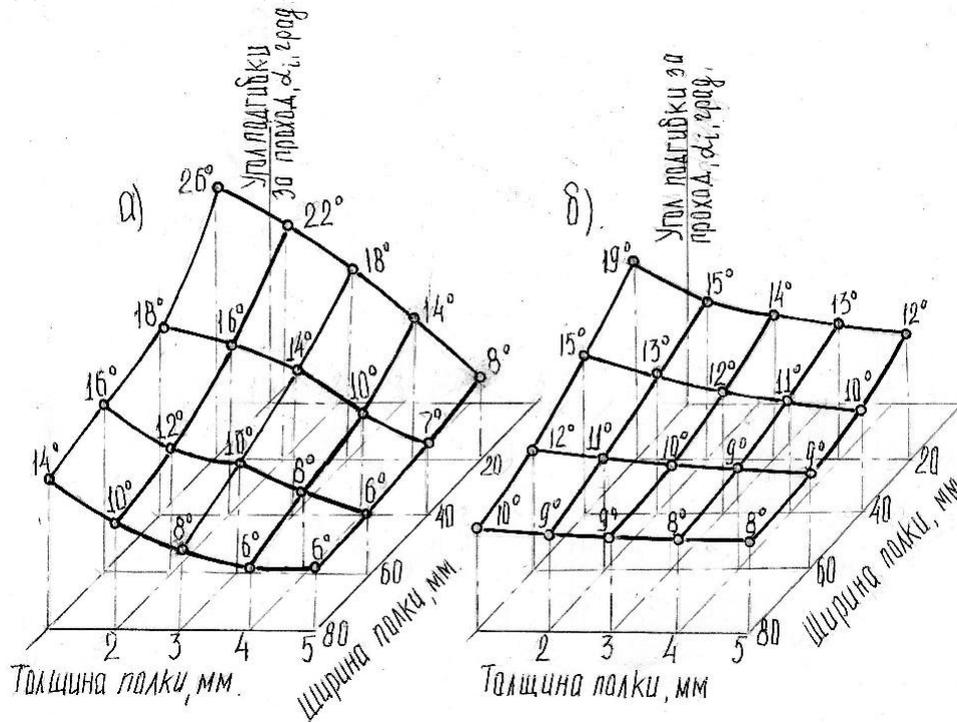


Рис. 1.23. Диаграммы допустимых углов подгибки при формовке:  
а) уголков; б) швеллеров.

С учетом выше сказанного, и принимая равномерное распределение деформации металла в средних калибрах, угол подгибки следует определять как:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_{с.изг}}{N-2}, \quad (1.84)$$

где  $\alpha_{с.изг}$  – суммарный угол подгибки изделия;  $N$  – количество горизонтальных калибров (клетей) (табл. 1.6).

Произведем оценку предложенной методики расчета углов подгибки  $\alpha_i$  для швеллера 180x80x6 и уголка 120x120x5.

Швеллер:  $N = 12$ ;  $\alpha_{с.изг} = 90^\circ$ .

$$\alpha_i = \frac{90}{12-2} = 9^\circ.$$

По графику рис. 1.23 б –  $\alpha_i$  до  $10^\circ$ .

Уголок:  $N = 9$ ;  $\alpha_{с.изг} = 45^0$ .

$$a_i = \frac{45}{9} - 2 = 6^0 30'.$$

По графику рис. 1.23 а –  $\alpha_i = 6^0 7^0$ .

#### 1.4.2. Формовка гофрированных гнутых профилей

Все многообразие используемых в народном хозяйстве гофрированных профилей разделяют [10] на 3 группы:

- профили, все поперечное сечение которых гофрировано, между гофрами нет прямолинейных участков (волнистые);
- профили, в поперечном сечении которых гофры отделены друг от друга прямолинейными участками (трапециевидные);
- профили типа сортовых с мелкими гофрами.

Размеры (высота гофр, шаг, форма) профилей стандартизированы (ГОСТ 10551-89, ГОСТ 9234-89).

Формовку гофрированных профилей выполняют по последовательной, одновременной или комбинированной (с осадкой волнистой заготовки) калибровкам рабочих валков. Выбор системы калибровки зависит от сложности сечения профиля, числа клетей стана, ширины крайних участков готового профиля. Одновременную систему применяют при малом количестве рабочих клетей, при количестве ребер или волн в пределах  $3 \div 4$ , узкой ширине крайних участков ( $b/s < 12$ ).

Ширину исходной заготовки определяют по формуле (1.78), длину развертки криволинейных участков (по нейтральной линии) принимают постоянной по размерам готового профиля. Радиусы формовки промежуточных калибров – переменные. Количество калибров (горизонтальных клетей) и режимы профилирования определяют исходя из размеров заготовки и готового профиля, непрерывного или поштучного технологического процесса.

При непрерывном процессе режимы выбирают одинаковыми (в пределах  $10 \div 15^0$ ), за исключение последней клетки ( $\alpha = 5 \div 6^0$ ). При поштучном профилировании в первой и последней клетях  $\alpha = 5 \div 8^0$ , в промежуточных  $\alpha = 10 \div 15^0$ . Основная ось формовки

должна проходить по оси центрального ребра или волны, которые после отформовки препятствуют смещению профилированной полосы в поперечном направлении. Число технологических переходов по обе стороны от основной оси желательно иметь одинаковым.

### *Расчет параметров профилирования волнистых листов (калибровка одновременная)*

По чертежу готового профиля (задание 7) определяют длину развертки волны (по нейтральной линии), ширину исходной заготовки. Рассчитывают форму и размеры сечений переходных калибров. Основной принцип расчета: сохранение неизменной длины развертки волны. Углы подгибки принимают в пределах рекомендованных значений ( $10 \div 20^\circ$ ). Наружный  $R_H$  и внутренний  $R_B$  радиусы волн (рис. 1.24) определяют как:

$$R_{Hi} = \rho_i + S(1 - K); \quad R_{Bi} = \rho_i - KS; \quad \rho_i = \frac{180^\circ \cdot l_B}{4\pi \cdot \alpha_{iC}},$$

где  $l_B$  – длина развертки волны;  $K$  – коэффициент смещения нейтрального слоя деформации (табл.1.5);  $\alpha_{iC}$  – суммарный угол подгибки профиля. Ширина  $B_{ш}$  и высота профильных элементов валька:

$$B_{ш} = 2(R_H + R_B) \cdot \sin \alpha; \quad H = (R_H + R_B) \cdot (1 - \cos \alpha).$$

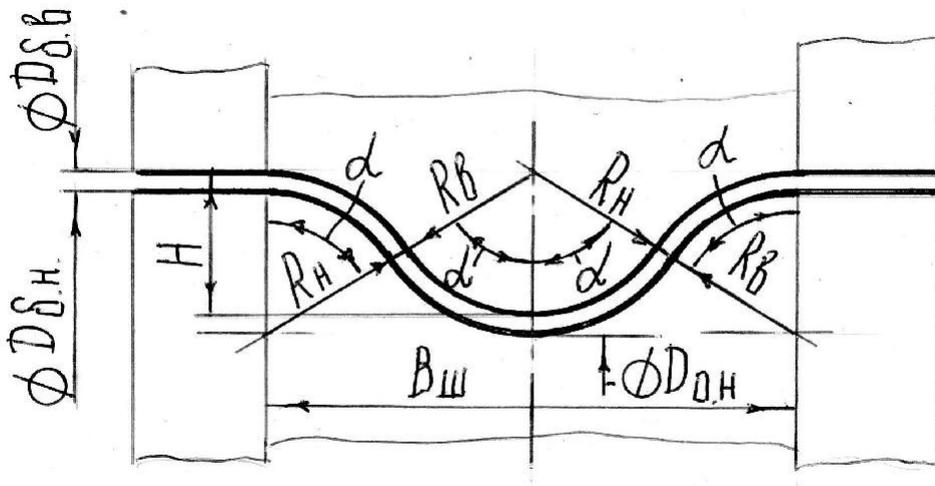


Рис. 1.24. Схема к расчету переходов и форм волнистых листов

Основные диаметры валков ( $D_{O.H} = D_{O.B}$ ) определяют из условия прочности валкового узла ( $D_{O.H} = 2d_{\text{вала}}$ ), врез калибров – симметричный ( $0,5H$ ). Натяжение металла полосы создается за счет увеличения высоты профиля.

### *Расчет параметров профилирования ребристых плит (трапециевидных)*

Такие листы в зависимости от высоты  $H$  имеют от 5 до 11 трапециевидных гофров с промежуточными прямолинейными участками. Их изготавливают как непрерывным способом, так и поштучно, система формообразования – последовательная. За основную ось формовки выбирают центральный гофр.

По чертежу готового профиля поперечное сечение разбивают на отдельные прямолинейные и криволинейные участки. Определяют положение нейтрального сечения, радиусы кривизны  $\rho_i$ , по формуле (1.78) рассчитывают ширину листов. Формовку начинают с центрального гофра, одновременно формируют два смежных гофра (слева и справа). Углы подгибки стенок центрального гофра выбирают на основе общих рекомендаций ( $\alpha_i = 18 \div 20^\circ$ ), углы смежных гофров рассчитываются из условия равенства статических моментов сечений относительно горизонтальной плоскости листа. Гофр изгибают в направлении верхнего вала. После отформовки центрального гофра аналогично выполняют гибку двух симметричных боковых гофр. При этом кромки листов смещаются к центральной основной оси. Для равномерного их растяжения и исключения волнистости листов необходимо выдерживать линейное изменение этого смещения по клетям стана.

### **1.5. Расчет усилий и крутящих моментов при профилировании**

В работе [10] все профили рассматриваются как комбинации четырех основных типов элементов, формируемых различными методами:

- 1) с одним местом изгиба и свободной полкой (полки уголков, швеллеров);
- 2) с двумя местами изгиба при подгибке смежных элементов в одну сторону (стенки швеллеров, корытных, С-образных);
- 3) с двумя местами изгиба при подгибке смежных элементов в разные стороны (стенки зетовых профилей);
- 4) места изгиба.

Рабочие нагрузки на элементы определены из условия пластического изгиба полосы в продольном (ось  $Z$ ) и поперечном (ось  $X$ ) направлениях с учетом растягивающих напряжений по оси изделия (ось  $Z$ ).

Для расчета распределенной нагрузки получены аналитические выражения.

Для элементов первого типа:

$$P_{XB} = \frac{\sigma_T \cdot S^2}{4X} + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \cdot S^{2,6} \cdot b^{-2,6} \cdot X \quad (1.85)$$

Для элементов второго типа:

$$P_{XH} = \frac{\sigma_T \cdot S^2 \cdot h}{4X(h-X)} + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \cdot S^{2,6} \cdot h^{-1,4}, \quad (1.86)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала полосы, МПа;  $\alpha$  – угол подгибки профиля за проход (град);  $b$  – ширина подгибаемой полки, мм;  $E$  – модуль упругости материала полосы ( $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа);  $X$  – расстояние от точки защемления до измеряемой точки;  $S$  – толщина стенки подгибаемого элемента;  $h$  – высота стенки профиля.

На рис. 1.25 приведены эпюры распределенных нагрузок на валки при профилировании уголков (а) и швеллеров (б). Суммарные усилия при формовке:

$$\begin{aligned} \text{равнобоких уголков} - P_B &= 2 \int_C^b P_{XB} \cdot \cos \alpha_C \cdot dx \\ \text{швеллеров} - P_B &= 2 \int_C^b P_{XB} \cdot \cos \alpha_C \cdot dx + \int_C^{h-C} P_{Xh} \cdot dx, \quad (1.87) \end{aligned}$$

где  $b$  – расстояние от вершины угла профиля до кромки

полосы;  $C$  – проекция половины криволинейного участка профиля на ось  $X$ ;  $\alpha_C$  – суммарный угол подгибки профиля.

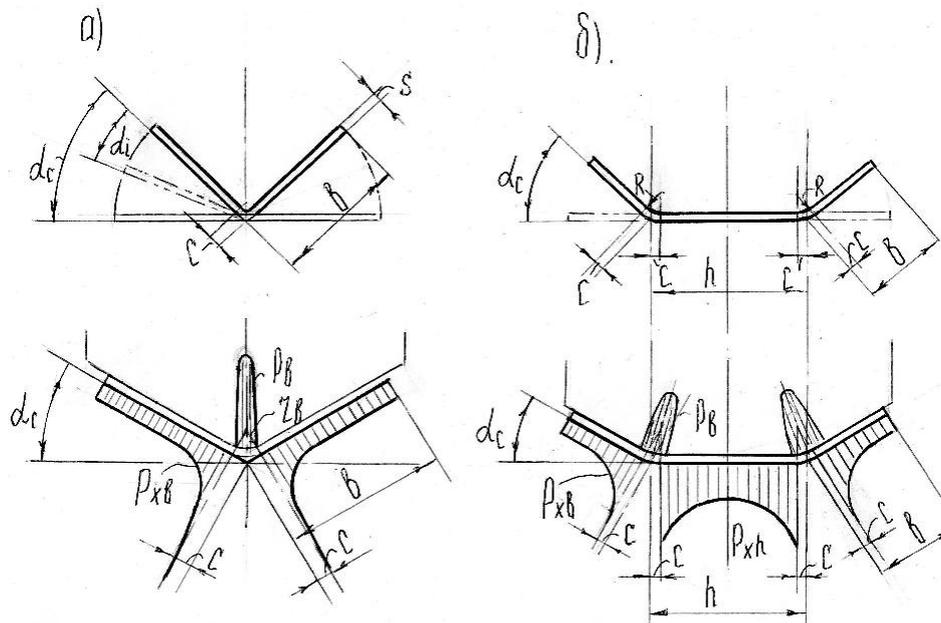


Рис. 1.25. Схемы к расчету усилий при профилировании: а) уголков; б) швеллеров

Подставляя в формулы (1.87) значения  $P_{XB}$  и  $P_{Xh}$  из формул (1.85) и (1.86) и интегрируя, получаем аналитические расчетные формулы определения вертикальных усилий:

для уголков :

$$P_B = \cos \alpha_C \left[ \frac{\sigma_T \cdot S^2}{2} \ln \frac{b}{c} + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \cdot S^{2,6} \cdot \frac{b^2 - C^2}{b^{2,6}} \right] \quad (1.88)$$

для швеллеров:

$$P_B = \frac{\sigma \cdot S^2}{2} \ln \left[ \frac{h - C}{C} \left( \frac{b}{C} \right)^{\cos \alpha} \right] + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \cdot S^{2,6} \times \left( \frac{b^2 - C^2}{b^{2,6}} \cdot \cos \alpha_C + \frac{h - 2C}{h^{1,6}} \right) \quad (1.89)$$

Крутящий момент на верхнем валке определяется только силами трения качения и рассчитывается по формуле:

$$M_{iKpв.в} = P_{Bi} \cdot \mu_K \cdot 10^{-6}, \text{ кНм}, \quad (1.90)$$

где  $P_B$  – вертикальное усилие, Н;  $\mu_K$  – плечо трения качения ( $\mu_K = 1 \div 1,2$  мм).

**Крутящий момент на нижнем валке для уголков определяется трением скольжения конических шайб:**

$$M_{кр.н.в} = 2 \int_c^b P_{ХВ} \left( \frac{D_{о.н}}{2} + X \cdot \sin \alpha_C \right) \cdot \mu_C \cdot dx$$

или подставляя значения параметров и интегрируя:

$$M_{кр.н.в} = 2\mu \left\{ \frac{\sigma_T \cdot S^2}{4} \left[ \frac{D_{о.н}}{2} \ln \frac{b}{C} + (b - c) \cdot \sin \alpha_C \right] + \right. \\ \left. + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot E\alpha^{1,4} S^{2,6} b^{-2,6} \left[ \frac{D_{о.н}}{2} \cdot \frac{b^2 - C^2}{2} + \frac{b^3 - C^3}{3} \sin \alpha_C \right] \right\} \quad (1.91)$$

Крутящий момент на нижнем валке для швеллеров определяется силами трения качения цилиндрических шайб по формуемой стенке и силами трения скольжения конических шайб по формуемым полкам:

$$M_{кр.н.в} = \int_c^{h-C} P_{Хh} \cdot \mu_K \cdot dx + 2 \int_c^b P_{ХВ} \left( \frac{D_{о.н}}{2} + X \cdot \sin \alpha_C \right) \cdot \mu_C \cdot dx$$

или

$$M_{кр.н.в} = \frac{\sigma_T \cdot S^2}{2} \left\{ \mu_K \cdot \ln \frac{h-C}{C} + \mu_C \left[ \frac{D_{о.н}}{2} \ln \frac{b}{C} + \right. \right. \\ \left. \left. + (b - c) \cdot \sin \alpha_C \right] \right\} + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot E\alpha^{1,4} S^{2,6} \left\{ \mu_K \frac{h-2C}{b^{2,6}} + \right. \\ \left. + \frac{\mu}{b^{2,6}} \left[ \frac{D_{о.н}}{2} \cdot \frac{b^2 - C^2}{2} + \frac{b^3 - C^3}{3} \sin \alpha_C \right] \right\} \quad (1.92)$$

где  $D_{о.н}$  – основной диаметр нижнего валка;  $\mu_C$  – коэффициент трения скольжения ( $\mu_C = 0,1$ ).

Определение усилий на валки при профилегибке волнистых листов и ребристых плит производят в соответствии с расчетной моделью [10] рис. 1.26. Поперечные элементы заготовки изгибаются на участке гофра, а свободные части листа подтягиваются к гофру. В этих элементах действуют напряжения изгиба и растяжения.

Выделенный поперечный элемент огибает поверхность шайбы по радиусу  $R$ , его можно считать защемленным в сечении  $cd$  и нагруженным силой  $P_\alpha$ . В точках  $c$  и  $d$  (рис. 1.26)

действуют моменты пластического изгиба. Для их определения необходимо знать длину участка плавного перехода  $L$  [10] (длину зоны пластической деформации металла по оси  $Z$ ). Длину участка плавного перехода ( $L$ ) в работе [10] рассчитывают по схеме рис. 1.27. Для формовки профиля в клетях 0-1 (консольный изгиб):

$$L_1 = 0,134 \cdot \sqrt[5]{\frac{\alpha^2 b^7}{S_2}} + b = K_1 \cdot b_1^{1,4} + b_1 \quad (b_1 = b)$$

$$K_1 = \frac{0,134 \alpha_1^{0,4}}{S^{0,4}}$$

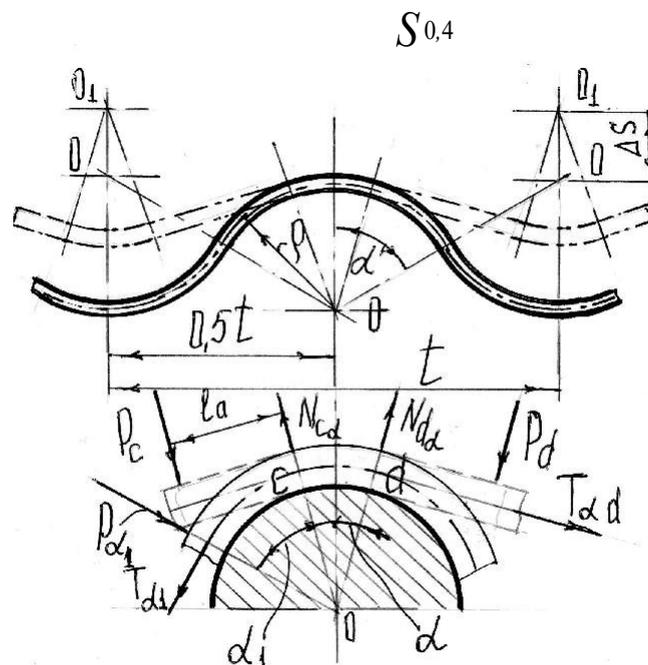


Рис. 1.26. Расчетные схемы к определению усилий при формовке волнистых листов.

Для формовки профиля по режиму 0-II (свободный участок отгибается в сторону, противоположную направлению подгибки полуволны):

$$L_2 = K_2 \cdot b_2^{1,4} + b_2 - (K_1 b_1^{1,4} + b_1) \quad (b_2 = b_1 + l)$$

$$K_2 = \frac{0,134 \alpha_2^{0,4}}{S^{0,4}}$$

Для формовки профиля по режиму 0-III:

$$L_3 = (K_3 \cdot b_3^{1,4} + b_3) - (K_2 b_2^{1,4} + b_2) + (K_1 b_1^{1,4} + b_1)$$

$$b_3 = b_1 + 2l; b_2 = b_1 + l; \quad K_3 = \frac{0,134\alpha_3^{0,4}}{S^{0,4}}$$

В этих формулах:  $l$  – длина полуволны;  $b_1$  – ширина первого подгибаемого элемента;  $\alpha_i$  – угол подгибки профиля перехода (рис. 1.26).

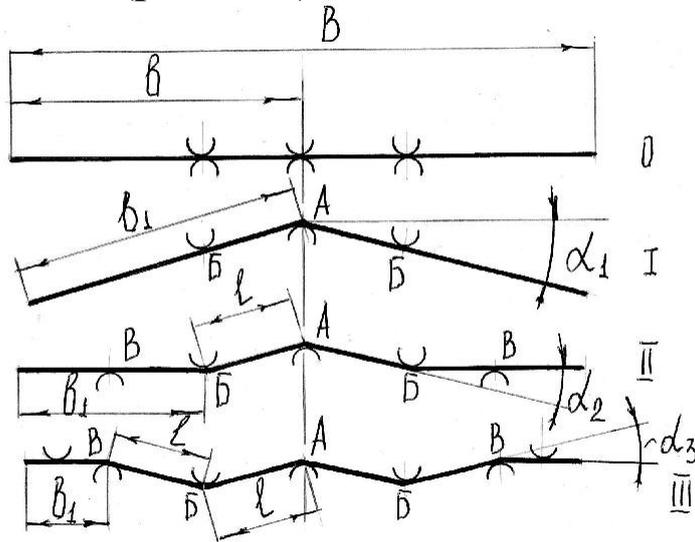


Рис. 1.27. Схема к определению длины участка плавного перехода ( $L$ ).

Для расчета момента пластического изгиба в работе [10] предложено аналитическое выражение:

$$M_{п.изг} = \frac{\sigma_T S_2 \cdot Z_s}{4} - \frac{L_i \sigma_T}{3E(1 - \frac{\sigma_T}{E})} \times \frac{\sigma_T \rho_2 \rho_1}{L} + E \varepsilon S^2 \cdot \frac{(L - Z_s)^2}{12L} \quad (1.93)$$

$$Z_s = L \left(1 - \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_t}\right); \quad \varepsilon_t = \frac{\sigma_T}{E}; \quad \varepsilon = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\frac{2}{S} + \frac{1}{\rho_1}}$$

где  $\rho_1, \rho_2$  – радиусы кривизны гофра до и после перехода, мм;

$Z_s$  – участок упруго-пластического изгиба;  $\varepsilon_t$ ,  $\varepsilon$  – относительные удлинения волокон на поверхности гофра.

Полное усилие в сечении (рис. 1.26):

$$P_C = \frac{2M_{\text{п.изг}}}{l_a}, \quad (1.94)$$

где  $l_a$  – ширина прямолинейного участка полуволны в сечении валков.

Особенностью процесса формовки волнистых листов и ребристых плит является скольжение металла по поверхности валков от периферии к центру полосы. При этом возникают силы трения на поверхности валков, а в элементах полосы растягивающие усилия  $T_a$ . Если выделенный элемент считать гибким, то согласно выводу Эйлера взаимосвязь между силами

натяжения  $T_{aC}$  и  $T_{ad}$ :  $T_{ad} = T_{aC} \cdot e^{(\mu_c \cdot \varphi)}$  ( $\mu_c$  – коэффициент скольжения). Полное натяжение в точке  $d$ :

$$T_{ad} = T_{aC} (1 + e^{(\mu_c \cdot \varphi)}) + P_d \cdot \mu_c.$$

Суммарное усилие на валки определяют как сумму проекций на ось  $Y$  всех действующих усилий на элементы гибки полуволны профиля:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{vi} \cdot \cos \frac{\varphi_{ic}}{2} + \sum_{i=1}^n T_{ai} \cdot \sin \frac{\varphi_{ic}}{2}, \quad (1.95)$$

где  $n$  – количество полуволн профиля,  $\varphi_{ic}$  – угол контакта гибкого элемента.

Расчет начинают с крайнего участка, усилие от подгибки определяют по аналитическим выражениям для элементов первого типа [10]:

$$P_1 = \frac{\sigma_{\text{с}} \cdot S_2}{4} \cdot \ln \frac{b}{C} + 1,76 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \cdot S^{2,6} \cdot b^{-2,6} \cdot (b^2 - C^2), \quad (1.96)$$

где  $C$  – длина дуги полуволны, огибающей гребень формирующей шайбы.

Пример расчета усилий и моментов привода дан в задании 7.

## 2. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ ТРУБ И ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

### 2.1. Задание 1

Произвести расчеты калибровки валков формовочного стана, сварочной клетки, силовых параметров процессов при изготовлении электросварных труб  $\varnothing 102 \times 6$  из стали 20 сварки ТВЧ на ТЭСА 20-102. Калибровка валков – однорадиусная.

Исходные данные:

Наружный диаметр трубы: 102 мм

Толщина стенки трубы: 6 мм

Количество горизонтальных калибров ( $N$ ): 7

Количество закрытых горизонтальных калибров: 2

Ширина разрезных шайб закрытых калибров:  $B_{ш6} = 16,5$  мм;

$B_{ш7} = 5,5$  мм

Обжатие в калибровочном стане:  $D_{кал} = 3$  мм

Предел текучести материала ленты:  $\sigma_T = 250$  МПа

Количество вертикальных клетей: 6

Определяем ширину ленты (ф.1.8,  $K = 0,015$ ):

$$B_{л} = \frac{\pi \cdot (102 + 3 - 6)}{1 - 0,015} = 315,6 \text{ мм}$$

Радиусы открытых калибров нижних валков (ф.1.9,  $n = 6$ ;  $R_T = 51$  мм):

$$R_{1H} = \frac{6}{1} \cdot 51 = 306 \text{ мм};$$

$$R_{2H} = \frac{6}{2} \cdot 51 = 153 \text{ мм};$$

$$R_{3H} = \frac{6}{3} \cdot 51 = 102 \text{ мм};$$

$$R_{4H} = \frac{6}{4} \cdot 51 = 76,5 \text{ мм};$$

$$R_{5H} = \frac{6}{5} \cdot 51 = 61,2 \text{ мм.}$$

**Углы формовки открытых калибров (ф. 1.10):**

$$\varphi_1 = \frac{315}{306} \cdot 6 = 1,031 \text{ рад } (59^0); \quad \varphi_2 = \frac{315}{153} \cdot 6 = 2,063 \text{ рад } (118,2^0);$$

$$j_3 = \frac{315}{102} \cdot 6 = 3,094 \text{ рад } (177,3^0); \quad \varphi_4 = \frac{315}{76,5} \cdot 6 = 4,125 \text{ рад } (236,4^0);$$

$$j_5 = \frac{315}{61,2} \cdot 6 = 5,157 \text{ рад } (295,5^0).$$

**Углы и радиусы формовки закрытых калибров (ф. 1.12, 1.13):**

$$\varphi_6 = \frac{2\pi}{\frac{16,5}{1 + 0,99 \cdot 315,6}} = 5,965 \text{ рад } (341,8^0);$$

$$\varphi_7 = \frac{2\pi}{\frac{5,5}{1 + 0,99 \cdot 315,6}} = 6,17 \text{ рад } (353,6^0).$$

$$R = \frac{0,99 \cdot 315,6}{5,965} + 0,5 \cdot 6 = 55,4 \text{ мм};$$

$$R_7 = \frac{0,99 \cdot 315,6}{6,17} + 0,5 \cdot 6 = 53,6 \text{ мм.}$$

**Ширина горизонтальных калибров:**

**При  $\varphi_i < 180^0$  (ф. 1.11):**

$$b_{1H} = 2 \cdot 306 \cdot \sin(29,5^0) = 301,4 \text{ мм};$$

$$b_{2H} = 2 \cdot 153 \cdot \sin(59,1^0) = 262,6 \text{ мм};$$

$$b_{3H} = 2 \cdot 102 \cdot \sin(88,65^0) = 204 \text{ мм}$$

**При  $\varphi_i > 180^0$  (ф. 1.14):**

$$b_{4H} = 2 \cdot 76,5 = 153 \text{ мм}; \quad b_{5H} = 2 \cdot 61,2 = 122,4 \text{ мм};$$

$$b_{6H} = 2 \cdot 55,4 = 110,8 \text{ мм}; \quad b_{7H} = 2 \cdot 53,6 = 107,2 \text{ мм.}$$

**Углы и радиусы формовки калибров вертикальных клеток (ф. 1.22 и 1.23):**

$$\varphi_{1-2} = 0,5(59 + 118,2) = 88,6^{\circ};$$

$$j_{2-3} = 0,5(118,2 + 177,3) = 147,75^{\circ};$$

$$j_{3-4} = 0,5(177,3 + 236,4) = 206,85^{\circ};$$

$$j_{4-5} = 0,5(236,4 + 295,5) = 266^{\circ};$$

$$j_{5-6} = 0,5(295,5 + 341,8) = 318,65^{\circ};$$

$$j_{6-7} = 0,5(341,8 + 353,6) = 347,7^{\circ}.$$

$$R_{1-2} = 315,6 \cdot \frac{57,3}{88,6} + 3 = 207,1 \text{ мм}; \quad R_{2-3} = 125,4 \text{ мм};$$

$$R_{3-4} = 90,4 \text{ мм}; \quad R_{4-5} = 71 \text{ мм}; \quad R_{5-6} = 59,8 \text{ мм}; \quad R_{6-7} = 55 \text{ мм}.$$

**Ширина и высота калибров вертикальных клеток:**

**При  $\varphi_i < 180^{\circ}$  (ф. 1.24 и 1.26):**

$$b_{1-2} = 2 \cdot 207,1 \cdot \sin(44,3^{\circ}) = 289,3 \text{ мм};$$

$$a_{1-2} = 207,1 \cdot (1 - \cos 44,3^{\circ}) = 58,9 \text{ мм}.$$

$$b_{2-3} = 2 \cdot 125,4 \cdot \sin(73,87^{\circ}) = 240,9 \text{ мм};$$

$$a_{2-3} = 125,4 \cdot (1 - \cos 73,87^{\circ}) = 90,6 \text{ мм}.$$

**При  $\varphi_i > 180^{\circ}$  (ф. 1.25 и 1.27):**

$$b_{3-4} = 2 \cdot 90,4 = 180,4 \text{ мм};$$

$$a_{3-4} = 90,4 \cdot [1 + \sin(103,42 - 90)] = 111,4$$

$$\text{мм}; \quad b_{4-5} = 2 \cdot 71 = 142 \text{ мм};$$

$$a_{4-5} = 71 \cdot (1 + \sin 43^{\circ}) = 119,4$$

$$\text{мм}; \quad b_{5-6} = 2 \cdot 59,8 = 119,4 \text{ мм};$$

$$a_{5-6} = 59,8 \cdot (1 + \sin 69,3^{\circ}) = 115,7$$

$$\text{мм}; \quad b_{6-7} = 2 \cdot 55 = 110 \text{ мм};$$

$$a_{6-7} = 55 \cdot (1 + \sin 83,85^{\circ}) = 109,7 \text{ мм}.$$

## Расчет размеров валков формовочного стана.

Диаметры валков по дну калибра (ф. 1.15 и 1.16):

$$\begin{aligned}D_{1H} &= 2 \cdot 102 = 204 \text{ мм}; & D_{2H} &= 204 \cdot 1,005 = 205 \text{ мм}; \\D_{3H} &= 205 \cdot 1,005 = 206 \text{ мм}; & D_{4H} &= 206 \cdot 1,005 = 207 \text{ мм}; \\D_{5H} &= 207 \cdot 1,005 = 208,1 \text{ мм}; & D_{6H} &= 208,1 \cdot 1,005 = 209,1 \text{ мм}; \\D_{7H} &= 209,1 \cdot 1,005 = 210,2 \text{ мм}.\end{aligned}$$

Диаметры нижних валков по ребордам (ф. 1.17 и 1.18):

$$\begin{aligned}D_{1H}' &= 204 + 2 \cdot 306(1 - \cos 29,5^\circ) = 283,6 \text{ мм}; \\D_{2H}' &= 205 + 2 \cdot 153(1 - \cos 59,1^\circ) = 354 \text{ мм}; \\D_{3H}' &= 206 + 2 \cdot 102(1 - \cos 88,65^\circ) = 405,3 \text{ мм}; \\D_{4H}' &= 207 + 2 \cdot 76,3 = 360 \text{ мм}; \\D_{5H}' &= 208,1 + 2 \cdot 61,2 = 330,5 \text{ мм}; \\D_{6H}' &= 209,1 + 2 \cdot 55,4 - 2 = 317,9 \text{ мм}; \\D_{7H}' &= 210,2 + 2 \cdot 53,6 - 2 = 315,4 \text{ мм}.\end{aligned}$$

Диаметры верхних валков:

При  $\varphi_i < 180^\circ$  (ф. 1.19):

$$\begin{aligned}D_{1B} &= 102 + 2 \cdot (306 - 6) \cdot (1 - \cos 29,5^\circ) + 50 = 230 \text{ мм}; \\D_{2B} &= 102 + 2 \cdot (153 - 6) \cdot (1 - \cos 59,1^\circ) + 50 = 295 \text{ мм}; \\D_{3B} &= 102 + 2 \cdot (102 - 6) \cdot (1 - \cos 88,65^\circ) = 340 \text{ мм};\end{aligned}$$

При  $\varphi_i > 180^\circ$  (ф. 1.20):

$$\begin{aligned}D_{4B} &= 102 + 2 \cdot (76,5 - 6) \cdot [1 + \sin(118,2 - 90)] + 50 = 359,6 \text{ мм}; \\D_{5B} &= 102 + 2 \cdot (61,2 - 6) \cdot [1 + \sin(142,75 - 90)] + 50 = 355,8 \text{ мм}; \\D_{6B} &= D_{6H}' = 317,9 \text{ мм}; \\D_{7B} &= D_{7H}' = 315,4 \text{ мм}.\end{aligned}$$

**Ширина нижних валков (ф. 1.21):**

$$B_{1H} = 301,4 + 40 = 341,4 \text{ мм}; B_{2H} = 262,6 + 40 = 302,6 \text{ мм};$$

$$B_{3H} = 204 + 40 = 244 \text{ мм}; B_{4H} = 153 + 40 = 193 \text{ мм};$$

*B*

$${}_{5H} = 122,4 + 40 = 162,4 \text{ мм}; B_{6H} = 110,8 + 40 = 150,8 \text{ мм};$$

*B*

$${}_{7H} = 107,2 + 40 = 147,2 \text{ мм}.$$

**Диаметры валков вертикальных калибров (ф. 1.28 и 1.29).**

**Минимальный диаметр для всех калибров:**

$$D_j \text{эд. min} = 102 \text{ мм}; \text{ зазор } j = 10 \text{ мм}.$$

**Максимальные диаметры валков:**

$$D_{(1-2)max} = 102 + 289,3 - 10 = 381,3 \text{ мм};$$

$$D_{(2-3)max} = 102 + 240,9 - 10 = 332,9 \text{ мм};$$

$$D_{(3-4)max} = 102 + 180,4 - 10 = 272,4 \text{ мм};$$

$$D_{(4-5)max} = 102 + 142 - 10 = 234 \text{ мм};$$

$$D_{(5-6)max} = 102 + 119,4 - 10 = 211,4 \text{ мм};$$

$$D_{(6-7)max} = 102 + 110 - 10 = 202 \text{ мм}.$$

**Диаметр сварочного калибра:**

$$D_{CB} = \frac{B_{л}(1 - K_{CB})}{\pi} + S = \frac{315,6(1 - 0,015)}{\pi} + 6 = 105 \text{ мм}.$$

**Диаметры валков сварочного калибра:**

$$D_{minCB} = D_{Tmax} = 102 \text{ мм}.$$

$$D_{maxCB} = D_{minCB} + D_{CB} - 3 = 102 + 105 - 3 = 204 \text{ мм}.$$

**Калибровка валков формовочного стана ТЭСА 20-102 дана на рис. 2.1.**

**Расчет усилий и мощности привода формовочного стана**

**Расчет производим по методу ВНИТИ (ф.1.55). Углы подгибки в горизонтальных калибрах:**

$$\alpha_1 = (1 + 0,15) \cdot (1,031 - 0) = 1,186 \text{ рад};$$

$$\alpha_2 = (1 + 0,15) \cdot (2,063 - 1,031) = 1,186 \text{ рад};$$

$$\alpha_3 = (1 + 0,15) \cdot (3,094 - 2,063) = 1,186 \text{ рад};$$

$$\alpha_4 = (1 + 0,15) \cdot (4,125 - 3,094) = 1,186 \text{ рад};$$

$$\alpha_5 = 1,186 \text{ рад};$$

$$\alpha_6 = 1,15 \cdot (5,965 - 5,197) = 0,883 \text{ рад};$$

$$\alpha_7 = 1,15 \cdot (6,17 - 5,965) = 0,236 \text{ рад}.$$

**Сопротивления перемещению полосы в горизонтальных калибрах (ф. 1.56):**

$$F_{1Г.О} = 0,266 \cdot 250 \cdot 6^2 \cdot 1,186 \cdot 2 = 5679 = 5,68$$

$$\text{кН}; F_{2Г.О} = 5,68 \text{ кН}; F_{3Г.О} = 5,68 \text{ кН};$$

$$F_{4Г.О} = 5,68 \text{ кН}; F_{5Г.О} = 5,68 \text{ кН};$$

$$F_{6Г.З} = 0,266 \cdot 250 \cdot 6^2 \cdot 2 \cdot 0,883 + 250 \cdot 315,6 \cdot 0,01 \cdot 6 = 8962 = 8,96 \text{ кН}; F_7$$

$$Г.З = 0,266 \cdot 250 \cdot 6^2 \cdot 2 \cdot 0,236 + 250 \cdot 315,6 \cdot 0,01 \cdot 6 = 5864 = 5,86 \text{ кН}.$$

**Длина контактной зоны в открытых калибрах (ф. 1.53):**

$$l_{\partial 11} = \sqrt{(283,6 - 204) \cdot \frac{204 \cdot 230}{2(204 + 230)}} = 65,6 \text{ мм};$$

$$l_{\partial 21} = \sqrt{(354 - 205) \cdot \frac{205 \cdot 295}{2 \cdot 500}} = 94,9 \text{ мм};$$

$$l_{\partial 31} = \sqrt{(405,3 - 206) \cdot \frac{206 \cdot 340}{2 \cdot 546}} = 113 \text{ мм};$$

$$l_{\partial 41} = \sqrt{(360 - 207) \cdot \frac{207 \cdot 359,6}{2 \cdot 566,6}} = 100,3 \text{ мм};$$

$$l_{\partial 51} = \sqrt{(330,5 - 208,1) \cdot \frac{208,1 \cdot 355,8}{2 \cdot 563,9}} = 89,6 \text{ мм}.$$

**Расчетные значения угла  $\gamma$  (ф. 1.54):**

$$\frac{g}{1} = \arccos\left(\frac{2 \cdot 65,6}{230}\right) = 55,2^\circ; \quad \frac{g}{2} = \arccos\left(\frac{2 \cdot 94,9}{295}\right) = 50^\circ;$$

$$\frac{g}{2} = \arccos\left(\frac{2 \cdot 113}{340}\right) = 48,3^\circ; \quad \gamma_4 = \arccos\left(\frac{2 \cdot 100,3}{359,6}\right) = 56^\circ;$$

$$\frac{g}{2}$$

$$\frac{3}{2}$$

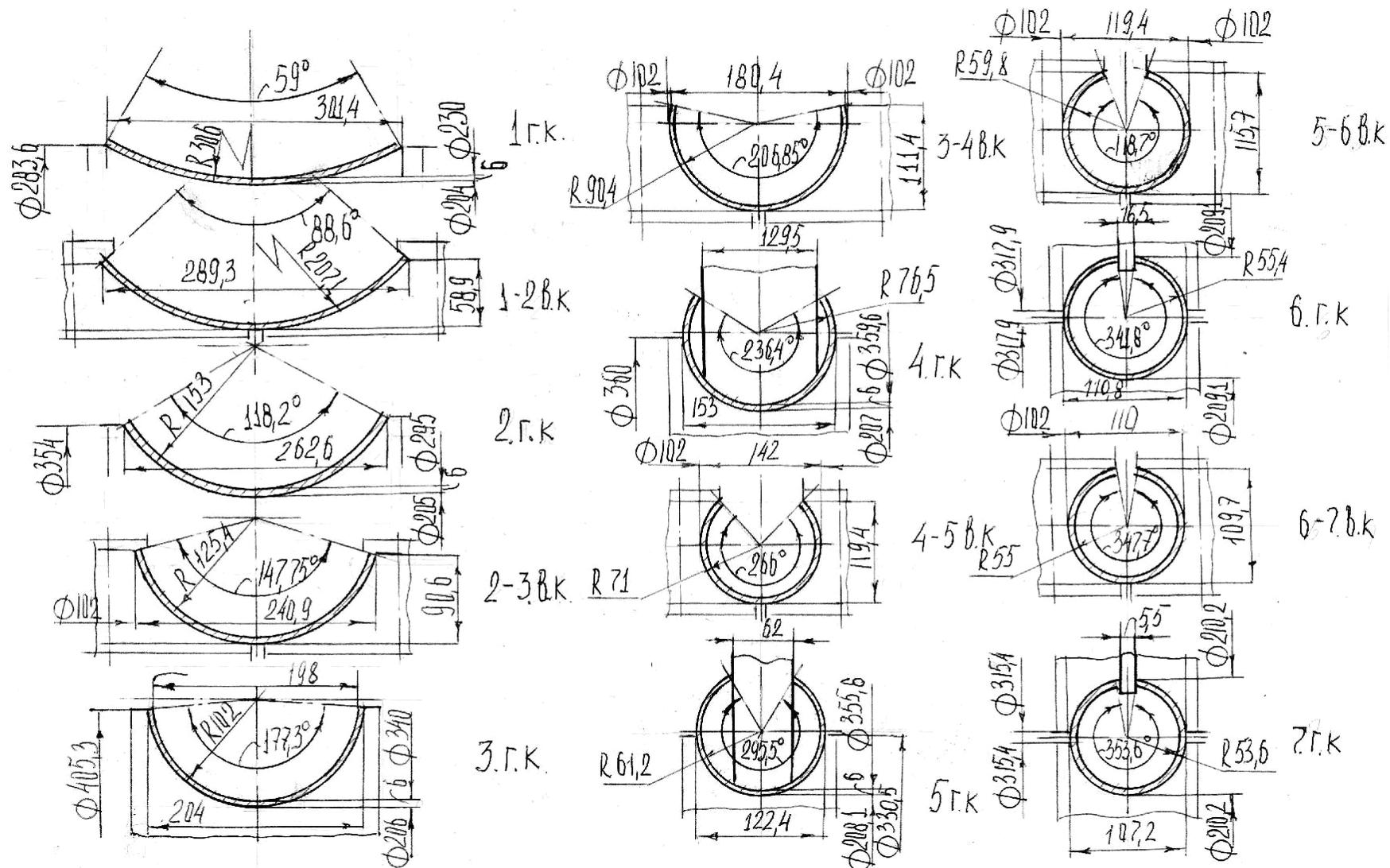


Рис. 2.1. Калибровка валков (однорядусная) формовочного стана ТЭСА 20-102 для трубы  $\Phi 102 \times 6$  мм.

$$g_5 = \arccos\left(\frac{2 \cdot 89,6}{2355,8}\right) = 59,8^\circ.$$

Расчетные значения зоны пластической деформации  $l_i$  горизонтальных открытых калибров (ф. 1.54):

$$l_1 = 65,6 \cdot \frac{\operatorname{tg}55,2^\circ}{\operatorname{tg}27,6^\circ} = 180,5 \text{ мм}; \quad l_2 = 94,9 \cdot \frac{\operatorname{tg}50^\circ}{\operatorname{tg}25^\circ} = 242,5 \text{ мм};$$

$$l_3 = 113 \cdot \frac{\operatorname{tg}48,3^\circ}{\operatorname{tg}24,15^\circ} = 282,8 \text{ мм}; \quad l_4 = 100,3 \cdot \frac{\operatorname{tg}56^\circ}{\operatorname{tg}28^\circ} = 279,7 \text{ мм};$$

$$l_5 = 89,6 \cdot \frac{\operatorname{tg}59,8^\circ}{\operatorname{tg}29,9^\circ} = 267,7 \text{ мм}.$$

**Вертикальные усилия в открытых горизонтальных калибрах (ф. 1.62):**

$$P_{1B.O} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 250 \cdot 6^2 \cdot 180,5 \cdot 2}{1,5 \cdot 301,4} = 8264,4H = 8,265 \text{ кН};$$

$$P_{2B.O} = \frac{1,15 \cdot 250 \cdot 6^2 \cdot 242,5 \cdot 2}{1,5 \cdot 262,6} = 12743,7H = 12,74 \text{ кН};$$

$$P_{3B.O} = \frac{1,15 \cdot 250 \cdot 6^2 \cdot 282,8 \cdot 2}{1,5 \cdot 204} = 19130H = 19,13 \text{ кН};$$

$$P_{4B.O} = \frac{1,15 \cdot 250 \cdot 6^2 \cdot 279,7 \cdot 2}{1,5 \cdot 153} = 25228H = 25,23 \text{ кН};$$

$$P_{5B.O} = \frac{1,15 \cdot 250 \cdot 6^2 \cdot 267,7 \cdot 2}{1,5 \cdot 122,4} = 30182H = 30,18 \text{ кН}.$$

**Вертикальные усилия в закрытых горизонтальных калибрах (ф. 1.63):**

$$P_{6B.3} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 8,96}{0,1} = 103 \text{ кН}; \quad P_{7B.3} = \frac{(1 + 0,15) \cdot 5,86}{0,1} = 67,4 \text{ кН}.$$

**Длина контактной поверхности калибров вертикальных клеток (ф. 1.60):**

$$l_{1-1B.B} = \sqrt{(301,4 - 289,3) \cdot 0,5 \cdot 102} = 28,8 \text{ мм};$$

$$l_{2-3B.B} = \sqrt{(262,6 - 240,9) \cdot 0,5 \cdot 102} = 37,3 \text{ мм};$$

$$l_{3-4B.B} = \sqrt{(204 - 180,4) \cdot 0,5 \cdot 102} = 38,6 \text{ мм};$$

$$l_{4-5B.B} = \sqrt{(153 - 142) \cdot 0,5 \cdot 102} = 29,4 \text{ мм};$$

$$l_{5-6B.B} = \sqrt{(122,4 - 119,4) \cdot 0,5 \cdot 102} = 21,2 \text{ мм};$$

$$l_{6-7B.B} = \sqrt{(110,8 - 110) \cdot 0,5 \cdot 102} = 18,6 \text{ мм}.$$

**Радиальные усилия в калибрах вертикальных клеток (ф. 1.60):**

$$P_{1-2B} = (1 + 0,15) \frac{250 \cdot 2 \cdot 28,8 \cdot 6^2}{1,5 \cdot 58,9} = 6852H = 6,85 \text{ кН};$$

$$P_{2-3B} = (1 + 0,15) \frac{250 \cdot 2 \cdot 37,3 \cdot 6^2}{1,5 \cdot 90,6} = 5803H = 5,8 \text{ кН};$$

$$P_{3-4B} = (1 + 0,15) \frac{250 \cdot 2 \cdot 38,6 \cdot 6^2}{1,5 \cdot 111,4} = 4,95 \text{ кН};$$

$$P_{4-5B} = (1 + 0,15) \frac{250 \cdot 2 \cdot 29,4 \cdot 6^2}{119,4} = 3,55 \text{ кН};$$

$$P_{5-6B} = (1 + 0,15) \frac{250 \cdot 2 \cdot 21,2 \cdot 6^2}{1,5 \cdot 115,7} = 2,66 \text{ кН};$$

$$P_{6-7B} = (1 + 0,15) \frac{250 \cdot 2 \cdot 18,6 \cdot 6^2}{1,5 \cdot 109,7} = 2,48 \text{ кН}.$$

**Сопротивление перемещению полосы в калибрах вертикальных клеток (ф. 1.59)**

$$\sum_1^6 F_{jB.B} = f \cdot \sum_1^6 P_{jB.B} = 0,1(6,85 + 5,8 + 4,95 + 3,55 + 2,66 + 2,48) =$$

$$= 2,629 \text{ кН} \approx 2,63 \text{ кН}$$

Проверяем условие уравнения (1.55):

$$\sum_1^{n_1+n_2} T_{тян} = f \sum_1^{n_1+n_2} P_{iB} = 0,1(8,265 + 12,74 + 19,13 + 25,23 + 30,18 + 103 +$$

$$+ 67,4) = 26,6 \text{ кН}$$

**Сумма сопротивлений перемещению полосы в калибрах формовочного стана:**

$$\sum_1^{n_1+n_2+n_3} F_{сокр} = 5,68 \cdot 5 + 8,96 + 5,86 + 2,63 = 45,85 \text{ кН}.$$

**Условие уравнения 1.55 не выполняется.**

**Определим дополнительное вертикальное усилие в открытых калибрах (создается за счет упругих элементов) (ф. 1.64):**

$$P_{iB.дон} = \frac{45,85 - 26,6}{0,1 \cdot 5} = 38,5 \text{ кН.}$$

**Суммарные вертикальные усилия на валки в открытых горизонтальных калибрах:**

$$P_{1B\Sigma} = 38,5 + 8,265 = 46,765 \text{ кН}; P_{2B\Sigma} = 38,5 + 12,74 = 51,24 \text{ кН}; P_{3B\Sigma} = 38,5 + 19,13 = 57,63 \text{ кН}; P_{4B\Sigma} = 38,5 + 25,23 = 63,73 \text{ кН}; P_{5B\Sigma} = 38,5 + 30,18 = 68,68 \text{ кН.}$$

**Моменты привода нижних валков горизонтальных открытых калибров (ф. 1.66):**

$$M_{1'Пр} = 8,265 \cdot 0,5 \cdot 0,0656 \left(1 + \frac{204}{230}\right) + 38,5 \cdot 0,1 \frac{0,204}{2} +$$

$$+ 46,765 \cdot 0,005 \frac{0,12}{2} \left(1 + \frac{204}{230}\right) = 0,931 \text{ кНм}$$

$$M_{2'Пр} = 12,74 \cdot 0,5 \cdot 0,0949 \left(1 + \frac{205}{295}\right) + 38,5 \cdot 0,1 \frac{0,205}{2} +$$

$$+ 51,24 \cdot 0,005 \frac{0,12}{2} \left(1 + \frac{205}{295}\right) = 1,445 \text{ кНм}$$

$$M_{3'Пр} = 19,13 \cdot 0,5 \cdot 0,113 \left(1 + \frac{206}{340}\right) + 38,5 \cdot 0,1 \frac{0,206}{2} +$$

$$57,63 \cdot 0,005 \frac{0,12}{2} \left(1 + \frac{206}{340}\right) = 2,16 \text{ кНм}$$

$$M_{4'Пр} = 25,23 \cdot 0,5 \cdot 0,1003 \left(1 + \frac{207}{359,6}\right) + 38,5 \cdot 0,1 \frac{0,207}{2} +$$

$$+ 63,73 \cdot 0,005 \frac{0,12}{2} \left(1 + \frac{207}{359,6}\right) = 2,417 \text{ кНм}$$

$$M_{5'Пр} = 30,18 \cdot 0,5 \cdot 0,0896 \left(1 + \frac{208,1}{355,8}\right) + 38,5 \cdot 0,1 \frac{0,2081}{2} +$$

$$68,68 \cdot 0,005 \frac{0,12}{2} \left(1 + \frac{208,1}{355,8}\right) = 2,576 \text{ кНм}$$

**Моменты привода валков закрытых калибров (ф. 1.67):**

$$M_{6\text{Пр}}^{\prime\prime} = 8,96 \cdot (0,2091 + \frac{2}{3} \cdot 0,0554) + 103 \cdot 0,005 \cdot 0,12 = 2,266 \text{ кНм};$$

$$M_{7\text{Пр}}^{\prime\prime} = 5,86 \cdot (0,2102 + \frac{2}{3} \cdot 0,0536) + 67,4 \cdot 0,005 \cdot 0,12 = 1,377 \text{ кНм}.$$

**Суммарный момент привода горизонтальных валков:**

$$M_{\Sigma\text{Пр}} = 0,931 + 1,445 + 2,16 + 2,417 + 2,576 + 2,266 + 1,377 = 13,172 \text{ кНм}.$$

**Скорость сварки ТВЧ для трубы 102х6 принимаем 80 м/мин [1]. Частота вращения валков:**

$$n_B = \frac{v_{CB}}{\pi(D_{7H} + \frac{2}{3}R_{7H})} = \frac{80}{\pi \cdot (0,2102 + \frac{2}{3} \cdot 0,0536)} = 103,6 \text{ об/мин}.$$

**Мощность двигателя привода стана:**

$$N_{\text{дв}} = \frac{M_{\Sigma\text{Пр}} \cdot n_B}{9,75\eta} = \frac{13,172 \cdot 103,6}{9,75 \cdot 0,85} = 164,7 \text{ кВт}.$$

**Выбираем электродвигатель постоянного тока 4ПФ250L ( $N = 160 \text{ кВт}$ ,  $n = 1000 \text{ об/мин}$ ).**

## 2.2. Задание 2

Разработать калибровку (двухрадиусную) валков формовочного стана ТЭСА 102-220 сварки ТВЧ  $\varnothing 203 \times 8 \text{ мм}$  из стали 10. Рассчитать силовые параметры формовки.

**Исходные данные:**

|   |  |
|---|--|
| <b>Наружный диаметр трубы:</b>                      | 203 мм   |
| <b>Толщина стенки трубы:</b>                        | 8 мм   |
| <b>Количество горизонтальных калибров:</b>          | 8  |
| <b>Количество закрытых горизонтальных калибров:</b> | 3  |
| <b>Ширина шайб закрытых калибров:</b>               | $B_{ш6} = 60 \text{ мм}$ ;                           |
|   | $B_{ш7} = 25 \text{ мм}$ ; $B_{ш8} = 5,5 \text{ мм}$ |
| <b>Обжатие в калибровочном стане:</b>               | $D_{\text{кал}} = 4 \text{ мм}$                      |
| <b>Предел текучести материала ленты:</b>            | $\sigma_T = 230 \text{ МПа}$                         |
| <b>Количество вертикальных калибров:</b>            | 7  |

Определяем ширину полосы ленты (ф. 1.8,  $K = 0,015$ ):

$$B_{л} = \frac{\pi \cdot (203 + 4 - 8)}{1 - 0,015} = 634,4 \text{ мм}$$

Ширина центрального участка калибров  $B_{\alpha i}$  (ф. 1.30):

$$B_{\alpha 1} = 1,04 \cdot 634,4 \cdot \frac{8 - 1}{8 + 1} = 513,16$$

$$\text{мм}; B_{\alpha 2} = 1,04 \cdot 634,4 \cdot \frac{6}{9} = 439,85 \text{ мм};$$

$$B_{\alpha 3} = 1,04 \cdot 634,4 \cdot \frac{5}{9} = 366,54 \text{ мм};$$

Принимаем  $m = 3$ ,  $R_T = 0,5 \cdot D_T = 0,5 \cdot 203 = 101,5 \text{ мм}$ .

Радиусы формовки центрального участка (ф.1.31):

$$R_1 = 0,25 \cdot 101,5 \left[ (8 - 2 \cdot 1 + 1)^2 + 3 \cdot 8 \right] = 1852,4 \text{ мм};$$

$$R_2 = 0,25 \cdot 101,5 \left[ (8 - 2 \cdot 2 + 1)^2 + 3 \cdot 8 \right] = 1243 \text{ мм};$$

$$R_3 = 0,25 \cdot 101,5 \left[ (8 - 2 \cdot 3 + 1)^2 + 3 \cdot 8 \right] = 837,4 \text{ мм}.$$

Углы центрального участка  $\alpha_i$  (ф. 1.33):

$$\alpha_1 = \frac{513,16}{1852,4} = 0,277 \text{ рад } (15,87^\circ);$$

$$\alpha_2 = \frac{439,85}{1243,87,4} = 0,354 \text{ рад } (20,3^\circ); \alpha_3 = \frac{366,54}{837,4} = 0,438 \text{ рад } (25^\circ).$$

Углы формовки крайних участков  $\varphi_i$  (ф. 1.34)

$$\varphi_1 = \frac{634,4 - 513,16}{2 \cdot 101,5} = 0,597 \text{ рад } (34,2^\circ);$$

$$\varphi_2 = \frac{634,4 - 439,85}{2 \cdot 101,5} = 0,958 \text{ рад } (54,9^\circ);$$

$$\varphi_3 = \frac{634,4 - 366,54}{2 \cdot 101,5} = 1,32 \text{ рад } (75,6^\circ).$$

Для последующих горизонтальных калибров ( $i \geq m + 1$ ) принимаем  $\varphi_i = 85^0$  (1,483 рад).

Ширина крайних участков:  $2B \varphi_i = 2 \cdot 101,5 \cdot 1,483 = 301$  мм.

Ширину центрального участка определяем

как  $B\alpha_i = B_L - 2B \varphi_i = 634,4 - 301 = 331,4$  мм,

а радиус  $R_i$  по формуле (1.32):

$R_4 = 3,2 \cdot 101,5 = 324,5$  мм;  $R_5 = 1,7 \cdot 101,5 = 172,5$  мм.

Углы центрального участка (ф. 1.33):

$$\alpha_4 = 324 \frac{331,4}{324,5} = 1,021 \text{ рад } (58,5^0); \alpha_5 = 172 \frac{331,4}{172,5} = 1,92 \text{ рад } (110^0).$$

Определяем по формуле (1.37) суммарный угол формовки закрытых калибров:

$$\psi_6 = \frac{2\pi}{60} = 5,732 \text{ рад } (328,5^0);$$

$$1 + 0,99 \cdot 634,4$$

$$\psi_7 = \frac{2\pi}{25} = 6,0396 \text{ рад } (346^0);$$

$$1 + 0,99 \cdot 634,4$$

$$\psi_8 = \frac{2\pi}{5,5} = 6,225 \text{ рад } (356,7^0)$$

$$1 + 0,99 \cdot 634,4$$

Определяем углы центрального участка:

$$\alpha_6 = \psi_6 - 2\varphi_i = 328,5 - 2 \cdot 85 = 158,5^0; \alpha_7 = 346 - 2 \cdot 85 = 176^0;$$

$$\alpha_8 = 356,7 - 2 \cdot 85 = 186,7^0.$$

Определяем радиусы центрального участка (ф. 1.38):

$$R_6 = \frac{(634,4 - 2 \cdot 101,5 \cdot 1,483) \cdot 57,3}{158,5} + 0,5 \cdot 8 = 124,5 \text{ мм};$$

$$R_7 = \frac{(634,4 - 2 \cdot 101,5 \cdot 1,483) \cdot 57,3}{176} + 0,5 \cdot 8 = 112,5 \text{ мм};$$

$$R_8 = \frac{(634,4 - 2 \cdot 101,5 \cdot 1,483) \cdot 57,3}{186,7} + 0,5 \cdot 8 = 106,3 \text{ мм}.$$

Проверяем изменение углов подгибки формуемой полосы по клетям по условию:

$$\Delta\psi_i = (\alpha_i + 2\varphi_i) - (\alpha_{i-1} + 2\varphi_{i-1}); \Delta\psi_1 = 15,87 + 2 \cdot 34,2 = 84,27^0$$

$$; \Delta\psi_2 = (20,3 + 2 \cdot 54,9) - 84,27 = 45,83^0 ;$$

$$\Delta\psi_3 = (25 + 2 \cdot 75,6) - (20,3 + 2 \cdot 54,9) = 46,1^0 ; \Delta\psi_4 =$$

$$52,3^0 ; \Delta\psi_5 = 51,5^0 ; \Delta\psi_6 = 48,5^0 ; \Delta\psi_7 = 17,5^0 ; \Delta\psi_8 = 9,3^0 .$$

**Изменение углов подгибки получили в пределах допустимых значений ( $10^0$ ), поэтому пересчет параметров профиля калибров не производим. В табл. 2.1 приведены значения  $\alpha_i$ ,  $\varphi_i$ ,  $R_i$  горизонтальных калибров. Рассчитаем углы и радиусы формовки вертикальных калибров (ф. 1.45).**

$$\alpha_{1-2} = 0,5 \cdot (15,87 + 20,3) = 18,1^0 ;$$

$$\varphi_{1-2} = 0,5 \cdot (34,2 + 54,9) = 44,55^0 .$$

$$R_{1-2} = (634,4 - 2 \cdot 101,5 \cdot \frac{44,55}{57,3}) \cdot \frac{57,3}{18,1} = 1508,7 \text{ мм}.$$

**Для остальных вертикальных калибров расчетные значения углов и радиусов формовки приведены в табл. 2.2.**

**Таблица 2.1**

**Расчетные значения углов и радиусов формовки горизонтальных калибров**

| Параметр  | Номер калибра |       |       |       |       |       |       |       |
|---|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| Радиус формовки центрального участка $R_i$ , мм | 1852,4        | 1243  | 837,4 | 324,5 | 172,5 | 124,5 | 112,5 | 106,3 |
| Радиус формовки крайних участков, $r_i$ , мм    | 101,5         | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 |
| Углы центрального участка, $\alpha_i$ , град    | 15,87         | 20,3  | 25    | 58,5  | 110   | 158,5 | 176   | 186,7 |
| Углы крайних участков $\varphi_i$ , град        | 34,2          | 54,9  | 75,6  | 85    | 85    | 85    | 85    | 85    |

Таблица 2.2

**Расчет значения углов и радиусов формовки  
вертикальных калибров**

| Параметр   | Номер калибра |        |       |       |       |       |       |
|--|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 1-2           | 2-3    | 3-4   | 4-5   | 5-6   | 6-7   | 7-8   |
| Углы центрального участка, $\alpha_j$ , град     | 18,1          | 22,6   | 41,7  | 84,2  | 134,2 | 167,2 | 181,4 |
| Углы крайних участков, $\varphi_j$ , град        | 44,55         | 65,3   | 80,3  | 85    | 85    | 85    | 85    |
| Радиус формовки крайних участков, $r_j$ , мм     | 101,5         | 101,5  | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 | 101,5 |
| Радиус формовки центрального участка, $R_j$ , мм | 1508,7        | 1021,9 | 480,8 | 226,8 | 142,3 | 118,2 | 109,3 |

Рассчитываем ширину горизонтальных калибров (ф. 1.35 и 1.36), ширину и высоту вертикальных калибров (ф. 1.46-1.49).

$$b_{1H} = 2(1852,4 - 101,5) \cdot \sin(7,94^\circ) + 2 \cdot 101,5 \cdot \sin(7,94 + 34,2)^\circ = 620 \text{ мм};$$

$$b_{1-2} = 2(1508,7 - 101,5) \cdot \sin(9,05^\circ) + 2 \cdot 101,5 \cdot \sin(9,05 + 44,55)^\circ = 606 \text{ мм};$$

$$a_{1-2} = 1508,7(1 - \cos 9,05^\circ) + 101,5[\cos 9,05 - \cos(9,05 + 44,55)] = 58,8 \text{ мм};$$

$$b_{4H} = 2(324,5 - 101,5) \cdot \sin(29,25^\circ) + 2 \cdot 101,5 = 420,9 \text{ мм};$$

$$b_{4-5} = 2(226,8 - 101,5) \cdot \sin(42,1^\circ) + 2 \cdot 101,5 = 371 \text{ мм};$$

$$a_{4-5} = 226,8(1 - \cos 42,1^\circ) + 101,5[\sin(90 - 42,1) + \sin(42,1 + 85 - 90)] = 195 \text{ мм}.$$

Для остальных калибров расчетные значения параметров даны в табл. 2.3.

Таблица 2.3

## Расчетные значения ширины и высоты калибров

| Параметр                                      | Номер калибра |       |       |       |       |       |       |       |
|---|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| Ширина горизонтального калибра, $B_{iH}$ , мм | 620           | 578,2 | 521,5 | 420,9 | 319,3 | 248,3 | 224,8 | 212,6 |
| Ширина вертикального калибра, $B_j$ , мм      | 606           | 558,2 | 473   | 371   | 278,2 | 236,2 | 218,6 | -     |
| Высота вертикального калибра, $a_j$ , мм      | 58,8          | 95,8  | 134,1 | 195   | 216,1 | 215,8 | 210,4 | -     |

Диаметры валков горизонтальных калибров.

Диаметры нижних валков по дну калибра (ф. 1.15, 1.16):

$$D_{1H} = 1,9 \cdot 203 = 386 \text{ мм};$$

$$D_{2H} = 386 \cdot 1,005 = 388 \text{ мм};$$

$$D_{3H} = 390 \text{ мм};$$

$$D_{4H} = 391,5 \text{ мм};$$

$$D_{5H} = 393,5 \text{ мм};$$

$$D_{6H} = 395,4 \text{ мм};$$

$$D_{7H} = 397,4 \text{ мм};$$

$$D_{8H} = 399,4 \text{ мм}.$$

Диаметры нижних валков по ребордам (ф. 1.39, 1.40):

$$D'_{1H} = 385,7 + 2 \cdot 1852,4(1 - \cos 7,94^\circ) + 2 \cdot 101,5 \cdot [\cos 7,94^\circ - \cos(7,94 + 34,2)] = 471,7 \text{ мм};$$

$$D'_{4H} = 391,5 + 2 \cdot 324,5(1 - \cos 29,25^\circ) + 2 \cdot 101,5 \cdot \sin(90 - 29,25)^\circ = 651,4 \text{ мм}$$

Диаметры верхних валков (ф. 1.41 и 1.42):

$$D_{1B} = 203 + 2(1852,4 - 8)(1 - \cos 7,94^\circ) + 2 \cdot 101,5[\cos 7,94^\circ - \cos(7,94 + 34,2)] + 50 = 338,9 \text{ мм};$$

$$D_{4B} = 203 + 2(324,5 - 8)(1 - \cos 29,25^0) + 2 \cdot 101,5[\sin(90 - 29,25)^0 + \sin(29,25 + 85 - 90)] + 50 = 594,2 \text{ мм.}$$

Для остальных калибров диаметры приведены в табл. 2.4.

**Ширина нижних валков (ф. 1.43 и 1.44):**

$$B_{1H} = 2(1852,4 - 101,5) \cdot \sin(7,94^0) + 2 \cdot 101,5 \cdot \sin(7,94 + 34,2)^0 + 50 = 670 \text{ мм};$$

$$B_{4H} = 2(324,5 - 101,5) \cdot \sin(29,25^0) + 2 \cdot 101,5 + 50 = 470,9 \text{ мм.}$$

**Ширина верхних валков:**

$$B_{1B} = 2(1852,4 - 101,5) \cdot \sin(7,94^0) + 2 \cdot (101,5 - 8) \cdot \sin(7,94 + 34,2)^0 = 606,4 \text{ мм};$$

$$B_{4B} = 2(324,5 - 101,5) \cdot \sin(29,25^0) + 2 \cdot (101,5 - 8) \cdot \cos[29,25 + 85 - 90]^0 = 388,4 \text{ мм.}$$

Для остальных калибров ширина валков приведена в табл. 2.4.

**Диаметры валков вертикальных калибров**

Минимальный диаметр для всех калибров  $D_{j \text{эд. min}} = 203$  мм; зазор = 12 мм. Максимальные диаметры валков:

$$D_{(1-2) \text{ max}} = 203 + 606 - 12 = 797 \text{ мм};$$

$$D_{(2-3) \text{ max}} = 203 + 558,2 - 12 = 749 \text{ мм};$$

$$D_{(3-4) \text{ max}} = 203 + 473 - 12 = 664 \text{ мм};$$

$$D_{(4-5) \text{ max}} = 562 \text{ мм}; \quad D_{(5-6) \text{ max}} = 469 \text{ мм};$$

$$D_{(6-7) \text{ max}} = 419 \text{ мм}; \quad D_{(7-8) \text{ max}} = 401 \text{ мм.}$$

**Калибровка валков формовочного стана ТЭСА 102-220** приведена на рис. 2.2. В приложении дан расчет в Mathcad параметров калибровки валков формовочного стана ТЭСА 203-530 для трубы  $\varnothing 219 \times 8$ .

Таблица 2.4

## Расчетные значения диаметров валков горизонтальных калибров

| Параметр   | Номер калибра |       |       |       |       |       |       |       |
|--|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 1             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| Диаметр нижних валков по ребордам, $D_{iH}$ , мм | 471,7         | 540,7 | 620,8 | 651,4 | 657   | 632   | 610   | 600   |
| Диаметр верхних валков, $D_{iB}$ , мм            | 338,9         | 405,9 | 483,8 | 594,2 | 640,4 | 632   | 610   | 600   |
| Ширина нижних валков, $B_{iH}$ , мм              | 670           | 628,2 | 571,5 | 470,9 | 369,3 | 298,2 | 274,8 | 262,6 |
| Ширина верхних валков, $B_{iB}$ , мм             | 606,4         | 571,8 | 505,4 | 388,4 | 230,5 | 298,2 | 274,8 | 262,6 |

**Расчет усилий и мощности привода клетей  
формовочного стана**

Расчет, как в задании 1, производим по методу ВНИТИ (ф. 1.55).

Углы подгибки в горизонтальных калибрах (ф. 1.58):

$$\alpha_1 = \frac{(1+0,15) \cdot [15,87 + 2 \cdot 34,2 - 0]}{57,3} = 1,69 \text{ рад};$$

$$\alpha_2 = \frac{(1+0,15) \cdot [(20,3 + 2 \cdot 54,9) - (15,87 + 2 \cdot 34,2)]}{57,3} = 0,919 \text{ рад};$$

$$\alpha_3 = \frac{(1+0,15) \cdot [(25 + 2 \cdot 75,6) - (20,3 + 2 \cdot 54,9)]}{57,3} = 0,925 \text{ рад};$$

$$\alpha_4 = \frac{(1+0,15) \cdot [(58,5 + 2 \cdot 85) - (25 + 2 \cdot 75,6)]}{57,3} = 1,0496 \text{ рад};$$

$$\alpha_5 = \frac{(1+0,15) \cdot [(110 + 2 \cdot 85) - (58,5 + 2 \cdot 85)]}{57,3} = 1,0336 \text{ рад};$$

$$\alpha_6 = \frac{(1+0,15) \cdot (328,5 - 280)}{57,3} = 0,973 \text{ рад};$$

$$\alpha_7 = \frac{(1+0,15) \cdot (346 - 328,5)}{57,3} = 0,351 \text{ рад};$$

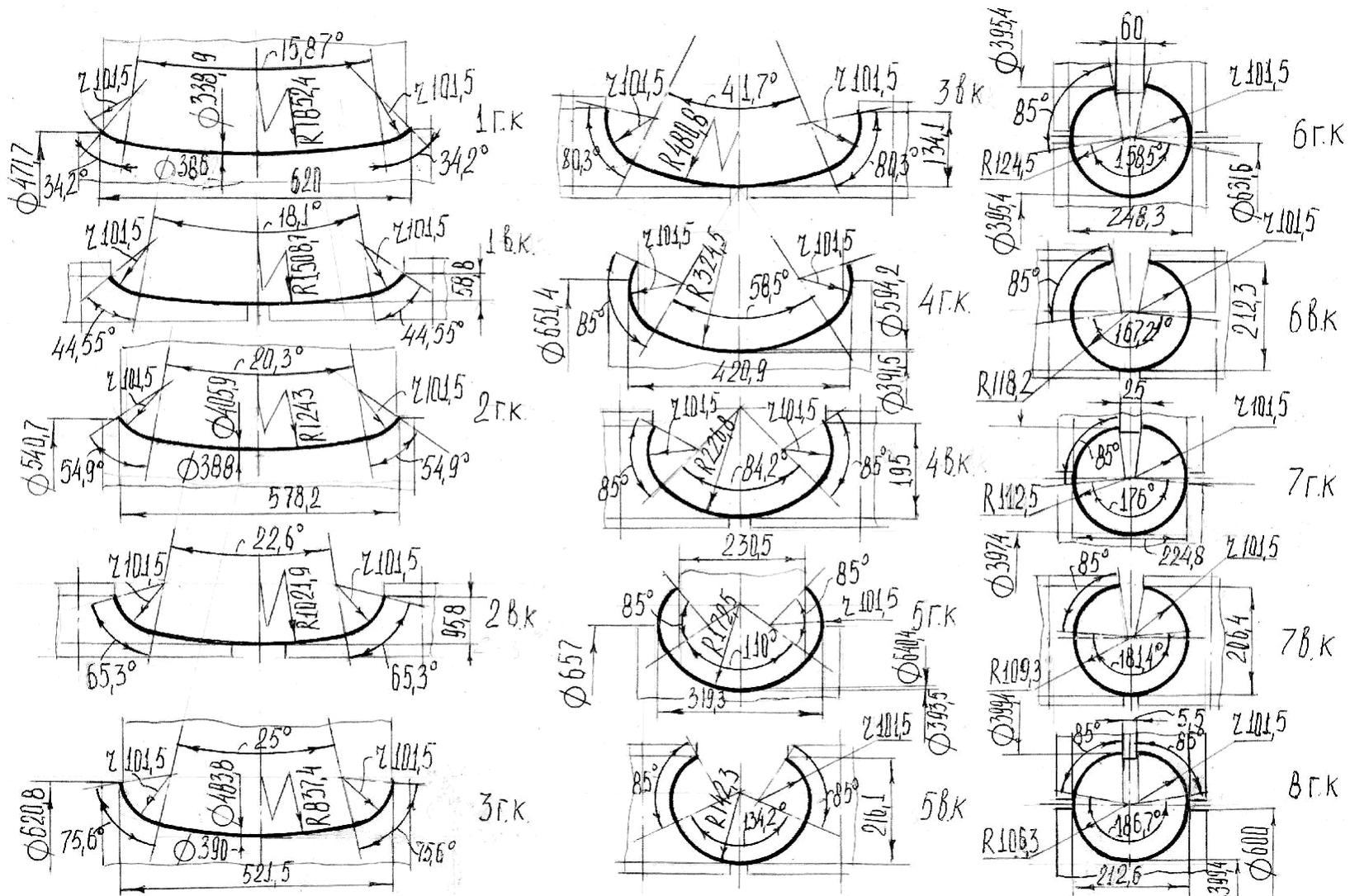


Рис. 2.2. Калибровка валков (двухрадиусная) формовочного стана ТЭСА 102-220 для трубы  $\phi 102 \times 6$  мм.

$$\alpha_8 = \frac{(1+0,15) \cdot (356,7 - 346)}{57,3} = 0,215 \text{ рад.}$$

Рассчитываем по формуле (1.56) сопротивления перемещению полосы в горизонтальных калибрах, данные приведены в табл. 2.5.

По формулам (1.53) и (1.54) определяем длину контактной зоны  $l_\partial$  и длину зоны пластической деформации  $l_i$ , данные расчетов приведены в табл. 2.5.

Рассчитываем по формулам (1.62) и (1.63) вертикальные усилия в открытых и закрытых горизонтальных калибрах, а по формулам (1.59) и (1.60) – длину контактной поверхности, радиальные усилия и сопротивления перемещению полосы вертикальных калибров. Расчетные значения параметров приведены в табл. 2.5.

Проверяем условие уравнения (1.55).

Сумма тянущих усилий ( $f=0,1$ ):

$$\sum_1^{n_1+n_2} T_{тян} = 0,1 \cdot (8,54 + 11,62 + 15,8 + 23,1 + 32,1 + 202,6 + 151,4 + 140,3) = 58,546 \text{ кН.}$$

Сумма сопротивлений перемещению полосы:

$$\sum_{n_1+n_2+n_3} F = 12,08 + 6,57 + 6,61 + 7,5 + 7,39 + 17,62 + 13,17 + 12,2 + 1,87 + 1,37 + 1,52 + 1,06 + 0,87 + 0,48 + 0,36 = 90,67 \text{ кН.}$$

Условие уравнения (1.55) не выполняется.

Рассчитываем дополнительное вертикальное усилие открытых калибров по формуле (1.64):

$$= 90,67 - 58,546 =$$

$$P_{iB.\partial on} = \frac{64,25 \text{ кН.}}{0,1 \cdot 5}$$

По формуле (1.65) рассчитываем суммарное вертикальное усилие в открытых калибрах. Данные расчетов приведены в табл. 2.5.

По формулам (1.66) и (1.67) рассчитываем моменты привода валков горизонтальных калибров ( $d_{нод} = 160$  мм):

Таблица 2.5

**Расчетные значения усилий в горизонтальных и вертикальных калибрах формовочного стана ТЭСА 110-203**

| Параметр  | Номер калибра |       |       |       |       |       |       |       |
|---|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1             | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| <b>Соппротивление перемещению полосы</b><br><i>F<sub>Г.0</sub>, F<sub>Г.3</sub>, кН</i> | 12,08         | 6,57  | 6,61  | 7,5   | 7,39  | 17,62 | 13,17 | 12,2  |
| <b>Длина контактной поверхности</b><br><i>l<sub>0</sub>, мм</i>                         | 88,1          | 123,2 | 158   | 175,1 | 179,2 | -     | -     | -     |
| <b>Расчетное значение угла</b><br><i>γ/2, град</i>                                      | 58,7          | 52,6  | 49,2  | 53,9  | 56    | -     | -     | -     |
| <b>Длина зоны пластической деформации</b><br><i>l<sub>i</sub>, мм</i>                   | 257           | 326   | 400   | 472   | 498   | -     | -     | -     |
| <b>Вертикальные усилия формовки,</b><br><i>P<sub>В.0</sub>, P<sub>В.3</sub>, кН</i>     | 8,54          | 11,62 | 15,8  | 23,1  | 32,1  | 202,6 | 151,4 | 140,3 |
| <b>Длина контактной поверхности вертикальных калибров</b> <i>l<sub>j</sub>, мм</i>      | 53,3          | 63,7  | 99,2  | 100,6 | 91,34 | 49,6  | 36    | -     |
| <b>Радиальное усилие вертикальных калибров,</b> <i>P<sub>j</sub>, кН</i>                | 18,7          | 13,7  | 15,2  | 10,6  | 8,7   | 4,8   | 3,6   | -     |
| <b>Соппротивление перемещению полосы вертикальных калибров</b> <i>F<sub>j</sub>, кН</i> | 1,87          | 1,37  | 1,52  | 1,06  | 0,87  | 0,48  | 0,36  | -     |
| <b>Вертикальные усилия на валки горизонтальных калибров,</b> <i>кН</i>                  | 72,79         | 75,87 | 80,05 | 87,35 | 95,35 | 202,6 | 151,4 | 140,3 |

$$M_{1Pr} = 8,54 \cdot 0,5 \cdot 0,0881 \left(1 + \frac{385,7}{338,9}\right) + 64,25 \cdot 0,1 \frac{0,3857}{2} +$$

$$+ 72,79 \cdot 0,005 \cdot 0,08 \left(1 + \frac{385,7}{338,9}\right) = 2,105 \text{ кНм}$$

$$M_{2Pr} = 2,7 \text{ кНм}; M_{3Pr} = 3,563 \text{ кНм}; M_{4Pr} = 4,671 \text{ кНм};$$

$$M_{5Pr} = 5,93 \text{ кНм}; M_{6Pr} = 8,463 \text{ кНм}; M_{7Pr} = 6,247 \text{ кНм};$$

$$M_{8Pr} = 0,888 \text{ кНм};$$

$$\overset{8}{\underset{1}{\dot{a}}} M_{Pr} = 34,567 \text{ кНм}.$$

Принимаем скорость сварки трубы – 50 м/мин. Частота вращения валков:

$$n = \frac{CB}{\pi \left( \frac{D_{8H}}{2} + \frac{R_{38H}}{3} \right)} = \frac{50}{\pi \cdot \left( 0,3994 + \frac{2}{3} \cdot 0,102 \right)} = 34 \text{ об/мин.}$$

**Мощность привода валков формовочного стана:**

$$N_{Pr} = \frac{\overset{8}{\underset{1}{\dot{a}}} M_{Pr} \cdot v}{9,75} = 120,54 \text{ кВт.}$$

**Мощность электродвигателя привода:**

$$N_{дв} = \frac{120,54}{0,85} = 141,8 \text{ кВт.}$$

### 2.3. Задание 3

Рассчитать таблицу прокатки, размеры рабочего инструмента, усилия формовки на прессах при изготовлении сварных труб  $\varnothing 1420 \times 14$  мм из стали 17Г1С. Способ сварки – дуговая, под слоем флюса.

**Исходные данные:**

**Наружный диаметр трубы:** 1420 мм

**Толщина стенки трубы:** 14 мм

**Длина трубы:** 12 м

**Механические характеристики стали 17Г1С:**  $\sigma_T = 252$  МПа,

$$\sigma_{вр} = 510 \text{ МПа.}$$

Технологический процесс изготовления сварных труб большого диаметра с формовкой на прессах включает операции: подгибку кромок листов на валковых машинах, предварительную и окончательную формовку на гидравлических прессах, дуговую сварку под слоем флюса в станах внутренней и наружной сварки, калибровку (раздачу) на горизонтальных гидравлических прессах, гидроиспытание. Расчет таблицы прокатки выполняют [1] против хода технологического процесса. Диаметр матрицы калибровки:

$$D_{M.K} = 1420 + 2 = 1422 \text{ мм}$$

Периметр трубы после сварочных станков (ф. 1.5):

$$P_S = 0,985 \cdot \pi \cdot 1422 = 4398,1 \text{ мм.}$$

Калибр клеток стана наружной сварки выполняют овальным (рис. 2.3 а) высотой  $H$ , шириной  $B$ , радиусами расточки  $\rho$  и  $R$ . Расчетными параметрами для определения размеров калибра служат  $P_S$ , угол  $\alpha$  и  $H - B$  (в расчетах принимают  $\alpha = 20^\circ$ ,  $= 90 \text{ мм}$  для  $\varnothing 1420 \text{ мм}$ ).

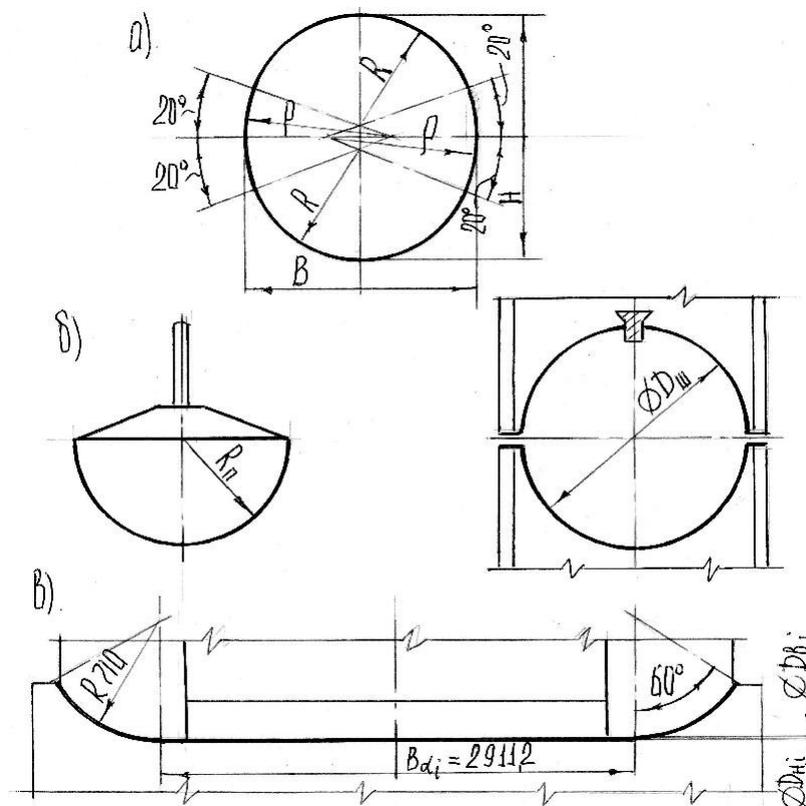


Рис. 2.3. К расчету рабочего инструмента формовки листов на прессах.

**Из геометрических соотношений (рис. 2.3):**

$$P_s = 4R \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) + 4\rho \cdot \beta,$$

$$H = 2[ R + (\rho - R) \cdot \sin \alpha ] = 2[ R + K \cdot \sin \alpha ],$$

$$B = 2[ \rho - (\rho - R) \cdot \cos \alpha ] = 2[ \rho - K \cdot \cos \alpha ],$$

$$\Delta = H - B.$$

**Из решения данных уравнений получаем:**

$$K = \frac{0,5\Delta}{\sin \alpha + \cos \alpha - 1}.$$

**Для трубы  $\varnothing 1420 \times 14$  мм получаем:**

$$K = \frac{0,5 \cdot 90}{\sin 20^\circ + \cos 20^\circ - 1} = 160 \text{ мм.}$$

**Выражая  $\rho = R + K = R + 160$  и подставляя в уравнение для  $P_s$ , получаем:**

$$P_s = 4R \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) + 4R\alpha + 4K\alpha,$$

$$R = \frac{P_s - 4K\alpha}{2\pi} = \frac{4398,1 - 4 \cdot 160 \cdot \frac{20}{57,3}}{2\pi} = 664,8 \text{ мм,}$$

$$H = 2(664,8 + 160 \cdot \sin 20^\circ) = 1439 \text{ мм; } \rho = 824,8 \text{ мм;}$$

$$B = 2[824,8 - 160 \cdot \cos 20^\circ] = 1348,9 \text{ мм.}$$

**На рис. 2.3 а приведены основные размеры сварочного калибра для трубы  $\varnothing 1420 \times 14$  мм.**

**Диаметр штампа окончательной формовки (ф. 1.6, рис. 2.3 б):**

$$D = \frac{0,984 \cdot 4398,1 + 25}{\pi} + 14 = 1400 \text{ мм.}$$

**Радиус пуансона пресса предварительной формовки (ф. 1.7, рис. 2.3 б):**

$$R_{\text{пуансона}} = 0,5 \cdot 1400 - 20 - 0,5 \cdot 14 = 673 \text{ мм.}$$

**Калибры стана предварительной подгибки кромок выполняют по двухрадиусной калибровке с плоским центральным участком. Угол подгибки крайних участков  $\varphi_i = 60^\circ$ , радиус подгибки равен радиусу свариваемой трубы,**

т.е.  $r = 710$  мм. Ширина центрального участка равна:

$$B = P - 2r \cdot \varphi = 4398,1 - 2 \cdot 710 \cdot \frac{60}{57,3} = 2911,2 \text{ мм}.$$

Калибр валков стана предварительной подгибки кромок приведен на рис. 2.3 в. Усилие гибки листов на прессе предварительной формовки определяем по формуле (1.69):

$$P_{\text{Прес.пр.}\varphi} = 1,02 \cdot (353 + 1,15 \cdot 120) \cdot \frac{14_2 \cdot 12 \cdot 10_3}{673 + 14} = 1715 \text{ кН}.$$

Усилие окончательной формовки (ф.1.70):

$$P_{\text{Ок.}\varphi} = 2 \cdot 1,05 \cdot 353 \cdot 14 \cdot 12 \cdot 10^3 = 124,5 \cdot 10^3 \text{ кН}.$$

## 2.4. Задание 4

Рассчитать усилия в формующих машинах, мощность привода подающей машины при изготовлении спиральношовных труб  $\varnothing 1420 \times 14$  мм из стали 14Г2СФА. Формующие машины двух типов: 1) полувтулочные;

2) валковые.

**Исходные данные:**

Наружный диаметр трубы: 1420 мм

Толщина стенки трубы: 14 мм

Скорость сварки (подача полосы): 2 м/мин

Угол формовки ( $\alpha$ ):  $30^\circ$

Диаметр валков подающей машины: 600 мм

Диаметр ножей дисковых ножниц: 600 мм

Параметры валковой гибочной машины:  $C = 200$  мм;

$R_{II} = 75$  мм;  $R_B = 100$  мм;  $R_V = 75$  мм

Механические характеристики материала полосы:

$\sigma_{вр} = 540$  МПа;  $\sigma_T = 345$  МПа

Определяем ширину полосы:

$$B_{л} = \pi(D_T - S_{II}) \cdot \sin \alpha = \pi(1420 - 14) \cdot 0,5 = 2207,4 \text{ мм}$$

Рассчитываем сопротивление перемещению полосы в кромкострогальном устройстве (ф. 1.74):

$$T_1 = 2 \cdot 2000 \cdot 2 \cdot 14^{0,75} \cdot \left( \frac{540}{750} \right)^{0,75} = 45257 \text{ Н} = 45,3 \text{ кН}$$

По формуле (1.75) определяем сопротивление перемещению полосы при резке кромок дисковыми ножницами:

$$\alpha = \arccos\left[1 - \frac{0,5(14+1)}{300}\right] = 12,84^{\circ}; \quad a = 300 \cdot \sin 6,42^{\circ} = 33,5;$$

$$P_{рез} = 0,7 \cdot 1,25 \cdot 1,25 \cdot \frac{1,5 - 0,35}{4 \cdot \operatorname{tg} 12,84^{\circ}} \cdot 0,35 \cdot 540 \cdot 14^2 \cdot 10^{-3} = 51,09 \text{ кН}$$

$$T_2 = \frac{2 \cdot 51,09 \cdot 33,5}{300} = 11,4 \text{ кН.}$$

Рассчитываем усилие формовки для двух типов формирующих машин (ф. 1.71 и 1.72).

Момент пластического изгиба полосы:

$$M_{пл} = \sigma_T \cdot \frac{S_2 \cdot B}{\alpha^L} \cdot (1,5 + 0,8 \varepsilon_{свп}) =$$

$$= 345 \cdot \frac{14_2 \cdot 2207,4}{50 \text{ кНм} \cdot 6 \cdot 0,866} \cdot (1,5 + 0,8 \cdot 0,3) \cdot 10^{-6} =$$

Для полулунной формирующей машины (вариант 1):

$$P_2 = \frac{2 \cdot M_n}{R_{TP}} \cdot (1 + f \frac{\pi}{2}) = \frac{2 \cdot 50}{0,71} \cdot (1 + 0,1 \cdot \frac{\pi}{2}) = 163 \text{ кН.}$$

Для валковой формирующей машины (вариант 2):

$$P_{Г} = \frac{M_n}{C} = \frac{50}{0,2} = 250 \text{ кН}; \quad P_{P} = \frac{2M_n}{R_{TP}} = \frac{2 \cdot 50}{0,71} = 140,8 \text{ кН}$$

$$P_2 = 4 \cdot 250 \cdot \frac{1 + 0,005 \cdot 75}{100} + 3 \cdot 140,8 \cdot \frac{1}{75} = 19,38 \text{ кН}$$

Суммарное усилие протягивания полосы (ф. 1.73):

для полулунной формирующей машины:

$$\dot{a} \quad T_1 = 163 + 45,3 + 11,4 = 219,7 \text{ кН,}$$

для валковой формирующей машины:

$$\dot{a} \quad T_2 = 19,38 + 45,3 + 11,4 = 76,08 \text{ кН.}$$

Мощность привода электродвигателя подающей машины:

Для первого варианта:

$$N_{\dot{a}1} = \frac{219,7 \cdot 2}{1,02 \cdot 60 \cdot 0,65} = 11,05 \text{ кВт;}$$

для второго варианта:

$$N_{\partial \sigma^2} = \frac{76,08 \cdot 2}{1,02 \cdot 60 \cdot 0,65} = 3,83 \text{ кВт.}$$

Выбираем электродвигатель 4ПФ132L ( $N = 11$  кВт,  $n = 825$  об/мин).

## 2.5. Задание 5

Произвести расчет калибровки валков, силовых параметров при профилировании равнобоких уголков 120x120x6 мм из стали Ст3кп. Валки составные, диаметр вала посадки калибра 100 мм.

Исходные данные:

Ширина полки уголков,  $B$ : 120 мм

Толщина стенки полки,  $S$ : 6 мм

Внутренний радиус профиля,  $r_{\sigma}$ : 9 мм

Механические характеристики материала полосы:

$\sigma_{\sigma p} = 470$  МПа;  $\sigma_T = 240$  МПа.

Определяем ширину полосы (ф.1.78):

$$B_z = \pi(r + KS) \cdot \frac{\alpha_c}{180} + 2[B - (r + S)] =$$

Дл

$$= \pi(9 + 0,44 \cdot 6) \cdot \frac{90}{180} + 2[120 - (9 + 6)] = 18,28 + 210 = 229 \text{ мм.}$$

ина криволинейного участка профиля:  $2C = 18,28$  мм.

Выбираем общее количество горизонтальных калибров  $N = 9$  (табл. 1.6). Угол подгибки в калибре (ф.1.84):

$$\alpha_i = \frac{45}{9 - 2} \approx 6^{\circ}30'.$$

Расчетное значение угла  $\alpha_i$  согласуется с данными рис. 1.23 а.

Расчет размеров валков стана производим в соответствии со схемой рис. 2.4. Верхний валок выполняем цельным с радиусом при вершине гребня, равным внутреннему радиусу профиля ( $r_{\sigma} = 9$  мм). Основной диаметр верхнего валка проходит по вершине гребня. Его размеры определим по

последнему 9 калибру с учетом подъема профиля, вала и гаек осевой фиксации:

$$D_{o.в} = 100 + 50 + 2B \cdot \sin 45^0 = 320 \text{ мм.}$$

Основной диаметр нижнего валка принимаем для всех калибров одинаковым по дну калибра профиля, его определяем конструктивно:  $D_{o.н} = 2d_{\text{вала}} = 2 \cdot 100 = 200 \text{ мм.}$

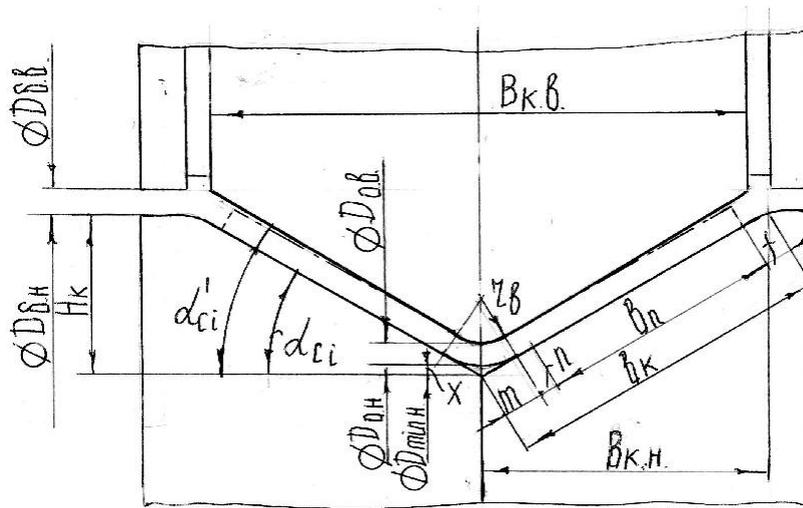


Рис. 2.4. Схема для определения размеров валков при профилировании уголков.

Передаточное отношение шестеренной клетки:  
 $i_{ш} = \frac{D_{o.в}}{D_{o.н}} = \frac{320}{200} = 1,6$ . Нижний валок выполняем составным из  $D_{o.н}$  200

двух усеченных конусов.

Рассчитаем размеры валков 2-го калибра:

$$\alpha_{2C} = 6^0 30'; D_{2o.н} = 200 \text{ мм}; f = 4 \text{ мм.}$$

Ширина наклонного участка калибра нижнего валка:

$$b_k = m + n + b_n + f;$$

$$m = (r_v + S) \cdot \operatorname{tg} \alpha_{2C} = (9 + 6) \cdot \operatorname{tg} 6^0 30' = 1,71 \text{ мм};$$

$$n = \frac{\pi}{180} (r_v + KS)(45 - \alpha_{2C}) = \frac{\pi}{180} (9 + 0,44 \cdot 6)(45 - 6,5) = 7,82 \text{ мм}; b_n = 120 - (r_v + S) = 120 - (9 + 6) = 105 \text{ мм.}$$

$$b_k = 1,71 + 7,82 + 105 + 2 = 116,5 \text{ мм.}$$

В этих формулах:  $n$  – запас металла в полке для формовки места закругления;  $b_n$  – ширина прямолинейного участка полки.

**Ширина калибра нижнего валка:**

$$2B_{K.H} = 2b_k \cdot \cos \alpha_{2C} = 2 \cdot 116,5 \cdot \cos 6^{\circ}30' = 231,5 \text{ мм.}$$

**Ширина калибра верхнего валка:**

$$B_{K.B} = 2(b_k \cdot \cos \alpha_{2C} - S \cdot \operatorname{tg} \alpha_{2C}) = \\ = 2 \cdot (116,5 \cdot \cos 6^{\circ}30' - 6 \cdot \operatorname{tg} 6^{\circ}30') = 230,1 \text{ мм.}$$

**Глубина калибра нижнего валка:**

$$H_K = b_k \cdot \sin \alpha_{2C} = 116,5 \cdot \sin 6^{\circ}30' = 13,2 \text{ мм.}$$

Ширину буртов принимаем в пределах 16 мм, канавок  $B_1 - 5$  мм.

**Параметр**

$$X = (r + S) \cdot \left( \frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right) = (9 + 6) \cdot \left( \frac{1}{\cos 6^{\circ}30'} - 1 \right) = 0,097 \text{ мм.}$$

**Минимальный диаметр нижнего валка:**

$$D_{\min H} = D_{O.H} - 2X = 200 - 2 \cdot 0,097 = 199,8 \text{ мм}$$

**Диаметры буртов валков:**

$$D_{B.H} = D_{\min H} + 2H_K = 199,8 + 2 \cdot 13,2 = 226,2 \text{ мм.}$$

$$D_{B.B} = D_{O.B} - 2H_K + 2X = 320 - 2 \cdot 13,2 + 2 \cdot 0,097 = 293,8 \text{ мм.}$$

Для остальных калибров размеры валков приведены в табл. 2.6.

Вертикальные усилия на рабочие валки определяем по формуле (1.88), крутящие моменты – по формулам (1.90) и (1.91).

Ниже приведен расчет  $P_6$ ,  $M_{KР.В.В}$  и  $M_{KР.Н.В}$  для валков второй горизонтальной клетки (второго калибра), для остальных клеток данные приведены в табл. 2.7.

$$P_{2B} = \cos 6^{\circ}30' \left[ \frac{240 \cdot 6_2}{2} \cdot \ln \frac{120}{9,14} + \right. \\ \left. + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot (6,5)^{1,4} \cdot \sqrt{120_{2,6}^2 - 9,14^2} \right] = 17,04 \text{ кН.}$$

Таблица 2.6

## Размеры валков профилегибочного стана формовки равнобоких уголков 120x120x6 мм

| № горизонтального калибра | Суммарный угол профиля, $\alpha_c$ | Ширина наклоного участка, $b_k$ | Ширина калибров, мм     |                          | Глубина калибра $H_k$ , мм | Диаметры валков, мм |          |          |
|---------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|----------|----------|
|                           |                                    |                                 | Нижнего валка $2B_{KH}$ | Верхнего валка, $B_{KV}$ |                            | $D_{minH}$          | $D_{BH}$ | $D_{BV}$ |
| 2                         | $6^{\circ}30'$                     | 116,5                           | 231,5                   | 230,1                    | 13,2                       | 199,8               | 226,2    | 293,8    |
| 3                         | $13^{\circ}$                       | 117,0                           | 228                     | 225,2                    | 26,3                       | 199,2               | 251,8    | 268,2    |
| 4                         | $19^{\circ}30'$                    | 117,5                           | 221,5                   | 217,3                    | 39,2                       | 198,2               | 276,6    | 243,4    |
| 5                         | $26^{\circ}$                       | 118,2                           | 212,5                   | 206,6                    | 51,8                       | 196,6               | 300,2    | 219,8    |
| 6                         | $32^{\circ}30'$                    | 119,1                           | 200,9                   | 193,2                    | 64                         | 194,4               | 322,4    | 197,6    |
| 7                         | $39^{\circ}$                       | 120,4                           | 187,2                   | 177,4                    | 75,8                       | 191,4               | 343      | 177,0    |
| 8                         | $45^{\circ}$                       | 122                             | 175,2                   | 160,5                    | 86,3                       | 187,6               | 360,3    | 159,8    |
| 9                         | $45^{\circ}$                       | 122                             | 175,2                   | 160,5                    | 86,3                       | 187,6               | 360,2    | 159,8    |

$$M_{KP.H.B} = 2 \cdot 0,1 \left\{ \frac{240 \cdot 6_2}{42 \cdot 9,14} \cdot \left[ \frac{200}{\ln \frac{120}{9,14}} + (120 - 9,14) \cdot \sin 6030' + \right. \right. \\ \left. \left. + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot (6,5)^{1,4} \cdot 120^{2,6} \cdot \left[ \frac{6^{2,6}}{2} \cdot \frac{201}{2} \cdot \frac{120^2 - 9,14^2}{2} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{120_3}{3} = \frac{9,14_3}{3} \cdot \sin 6030' \right] \right] \right\} = 182250 \text{ Нмм} = \\ 182,25 \text{ Нм. } 3$$

$$M_{KP.B.B} = 0,001 \cdot 17040 = 17,04 \text{ Нм.}$$

Определим мощность привода профилегибочного стана. Принимаем скорость профилегибки – 75 м/мин; частоту вращения валков рассчитываем по номинальному диаметру нижних валков:

$$n_{\text{в}} = \frac{V}{\pi \cdot D_{O.B}} = \frac{75}{\pi \cdot 0,2} = 119,4 \text{ об/мин;}$$

$$\sum_{i=1}^8 M_{KP.H.B} = 1751,62 \text{ Нм; } \sum_{i=1}^8 M_{KP.B.B} = 117,28 \text{ Нм.}$$

Средние диаметры подшипников опор:  $d_{\text{ср.п.к}} = 130 \text{ мм.}$

Суммарный момент трения подшипниковых опор верхних и нижних валков:

$$\sum M_{\text{тр.п.к}} = \sum_{i=1}^8 P_{\text{в}} \cdot \mu \cdot d_{\text{ср.п.к}} = 117,28 \cdot 0,005 \cdot 0,13 = 0,076 \text{ кНм.}$$

Сумма моментов привода верхних и нижних валков:

$$\dot{a} M_{KP} = 1,945 \text{ кНм.}$$

Мощность привода валков стана:

$$N_{\text{пр}} = \sum \frac{M_{KP}}{9,75} \cdot n_{\text{в}} = \frac{1,945 \cdot 119,4}{9,75} = 23,8 \text{ кВт.}$$

Суммарный к.п.д. привода:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{м}}^2 \cdot \eta_{\text{ц.ред}} \cdot \eta_{\text{шп}}^9 \cdot \eta_{\text{кп}}^9 = 0,99^2 \cdot 0,92 \cdot 0,99^9 \cdot 0,97^9 = 0,626,$$

где  $\eta_{\text{м}}$ ,  $\eta_{\text{ц.ред}}$ ,  $\eta_{\text{шп}}$ ,  $\eta_{\text{кп}}$  – соответственно к.п.д. зубчатых муфт,

цилиндрического редуктора, универсальных шпинделей, конических зубчатых передач.

Таблица 2.7

Расчетные значения усилий и крутящих моментов на валки стана профилировки уголков 120x120x6 мм из стали Ст3кп

| Наименование параметра                              | Порядковый номер клетки (калибра) |        |       |        |       |       |       |       |
|---|-----------------------------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
|   | 2                                 | 3      | 4     | 5      | 6     | 7     | 8     | 9     |
| Вертикальное усилие на валки, $P_v$ , кН            | 17,04                             | 16,61  | 16,17 | 15,41  | 14,46 | 13,33 | 12,13 | 12,13 |
| Момент крутящий на нижнем валке, $M_{кр.н.в}$ , Нм  | 182,25                            | 194,05 | 205,4 | 216,32 | 226,7 | 236,4 | 244,8 | 245,7 |
| Момент крутящий на верхнем валке, $M_{кр.в.в}$ , Нм | 17,04                             | 16,61  | 16,17 | 15,41  | 14,46 | 13,33 | 12,13 | 12,13 |

Мощность электродвигателя привода:

$$N_{ДВ} = \frac{N_{пр}}{\eta_{\Sigma}} = \frac{23,8}{0,626} = 38 \text{ кВт.}$$

$$\eta_{\Sigma} = 0,626$$

Выбираем электродвигатель постоянного тока 4ПФ180S (N = 37 кВт, n = 1150 об/мин) [12].

## 2.6. Задание 6

Произвести расчет калибровки валков, силовых параметров при профилировании швеллера 180x80x6 из стали Ст3пс. Валки составные, диаметр вала – 100 мм.

**Исходные данные:**

**Высота стенки швеллера,  $h$ :** 180 мм

**Ширина полки швеллера,  $b$ :** 80 мм

**Толщина стенки полки,  $S$ :** 6 мм

**Внутренний радиус профиля,  $r_в$ :** 9 мм

**Механические характеристики материала полосы:**

$\sigma_{вр} = 490$  МПа;  $\sigma_T = 250$  МПа Определяем  
ширину полосы (ф. 1.78):

$$\begin{aligned} B_3 &= 2 \cdot b_u + 2b_n + h_{см} = 2 \cdot \frac{\pi}{2}(r_в + KS) + 2[b - (r_в + S)] + \\ &+ h - 2(r_в + S) = \\ &= \pi(9 + 0,44 \cdot 6) + 2[80 - (9 + 6)] + 180 - 2(9 + 6) = \\ &= 36,56 + 280 = 317 \text{ мм.} \end{aligned}$$

**Длина криволинейного участка профиля:  $2C = 18,28$  мм.**

**Выбираем общее количество горизонтальных калибров  $N = 12$**

(табл. 1.6). Угол подгибки в калибре (ф.1.84):  $\alpha_i = \frac{90}{12} - 2 = 9^\circ$ . Расчетное значение угла  $\alpha_i$  согласуется с данными рис. 1.23 б.

**Расчет размеров валков стана производим в соответствии со схемой рис. 2.5 с переменными радиусами закруглений.**

**Внутренние радиусы кривизны в местах изгиба по калибрам определяем по формуле:**

$$R_i = \frac{180 \cdot 2C}{\pi \cdot \alpha_{iC}} - KS,$$

где  $2C$  – длина криволинейного участка по нейтральной линии;  $\alpha_{iC}$  – суммарный угол подгибки профиля в калибре.

**За основные диаметры принимаем (по дну калибра): для верхних валков – максимальный диаметр бочки, для нижних – минимальный.**

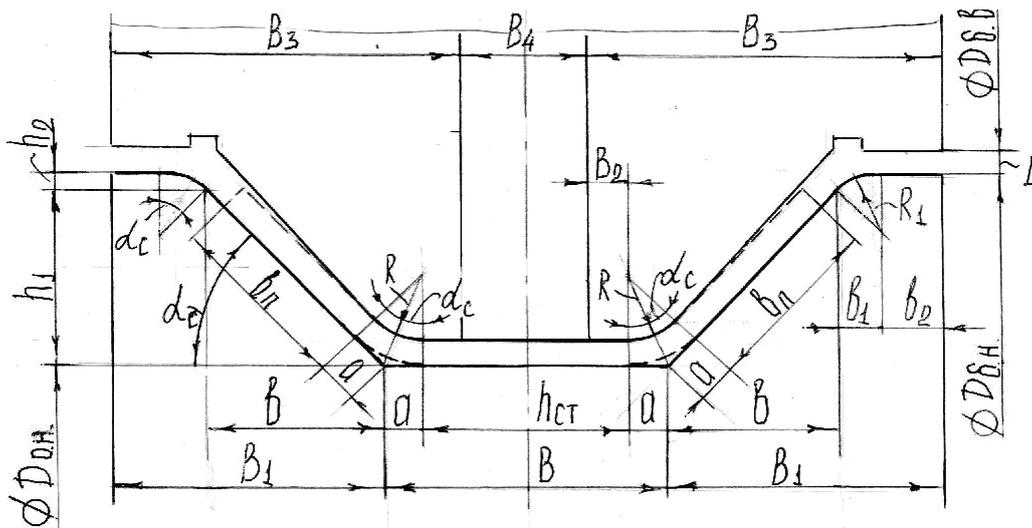


Рис. 2.5. Схема для определения размеров валков при профилировании швеллеров.

Рассчитаем  $D_{O.B}$  для 12-го калибра из условия размещения полки швеллера:

$$D_{12O.B} = d_v + 49 + 2b = 100 + 49 + 2 \cdot 80 = 309 \text{ мм.}$$

Принимаем передаточное отношение шестеренной клетки  $u = 1,5$ .

Тогда основной диаметр нижнего валка этого калибра:

$$D_{12O.H} = \frac{309}{1,5} = 206 \text{ мм.}$$

Для создания натяжения полосы основные диаметры нижних калибров увеличиваем на 0,5 мм, т.е.  $D_{n.O.H} = D_{(n-1)O.H} + 0,5$  мм. Тогда основной диаметр нижнего валка первой клетки:  $D_{1.O.H} = 206 - 12 \cdot 0,5 = 200$  мм.

Основные диаметры верхних валков не изменяем (приводятся только нижние валки и верхний валок последнего калибра).

Произведем расчет размеров валков для 2-го калибра в соответствии со схемой рис. 2.5, для остальных калибров данные расчетов приведены в табл. 2.8.

Радиус кривизны:

$$R_2 = \frac{180 \cdot 18,28}{\pi \cdot 9} - 0,44 \cdot 6 = 113,74 \text{ мм.}$$

**Ширина цилиндрического элемента нижнего валка:**

$$B = h_{cm} + 2a = h_{cm} + 2(R_2 + S) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = 150 + 2 \cdot 9,42 = 168,84$$

$$\text{мм}; a = (R_2 + S) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = (113,74 + 6) \cdot \operatorname{tg} 4^{\circ}30' = 9,42 \text{ мм},$$

где  $h_{cm}$  – высота прямолинейной части стенки швеллера.

**Ширина конусного элемента нижнего валка:**

$$B_1 = b + b_1 + b_2;$$

$$b = [a + b_n + (5 \div 10)] \cos \alpha_{2C} = (9,42 + 65 + 5) \cos 9^{\circ} = 78,44$$

$$\text{мм}; b_2 = 15 \text{ мм}; b_1 = R_1 \cdot \sin \alpha_{2C} = 20 \cdot \sin 9^{\circ} = 3,13 \text{ мм};$$

$$B_1 = 78,44 + 15 + 3,13 = 96,6 \text{ мм},$$

где  $b_n$  – прямолинейная ширина полки швеллера ( $b_n = 65$  мм).

**Основной диаметр нижнего валка:**

$$D_{2.0.H} = D_{1.0.H} \cdot 1,025 = 200,5 \text{ мм}.$$

**Диаметр буртов нижнего валка:**

$$D_{2.Б.Н} = D_{2.0.Н} + 2(h_1 + h_2);$$

$$h_2 = R_1(1 - \cos \alpha_{2C}) = 20(1 - \cos 9^{\circ}) = 0,246$$

$$\text{мм}; h_1 = b \cdot \operatorname{tg} \alpha_{2C} = 78,44 \cdot \operatorname{tg} 9^{\circ} = 12,42 \text{ мм};$$

$$D_{2.Б.Н} = 200,5 + 2(12,42 + 0,246) = 225,8 \text{ мм}.$$

**Диаметр буртов верхнего валка:**

$$D_{2.Б.В} = D_{0.В} - (D_{2.Б.Н} - D_{2.0.Н}) + 2(S - \Delta); S \approx \dots$$

$$D_{2.Б.В} = 309 - (225,8 - 200,5) = 283,7 \text{ мм}.$$

**Ширина конусного элемента верхнего валка:**

$$B_3 = B_1 + a + B_2.$$

$B_2$  выбираем из условий термической обработки ( $B_2 = 25 \div 30$  мм).

$$B_3 = 96,6 + 9,42 + 25 = 131 \text{ мм}$$

**Ширина цилиндрического элемента верхнего валка**

$$B_4 = B + B_1 - 2B_3 = 168,84 + 2 \cdot 96,6 - 2 \cdot 131 = 100,04 \approx 100 \text{ мм.}$$

Таблица 2.8

**Размеры валков профилегибочного стана  
формовки швеллеров 180x80x6**

| № горизонтального калибра | Суммарный угол подгибки, $\alpha_C$ , град | Радиус кривизны, $R$ , мм | Параметр $a$ | Ширина элементов валков, мм |       |        | Диаметры буртов валков, мм |           |
|---------------------------|--|---------------------------|--------------|-----------------------------|-------|--------|----------------------------|-----------|
|                           |  |                           |              | $B$                         | $B_1$ | $B_3$  | $D_{Б.Н}$                  | $D_{Б.В}$ |
| 2                         | 9  | 113,84                    | 9,42         | 168,8                       | 96,57 | 130,9  | 225,8                      | 283,7     |
| 3                         | 18   | 55,55                     | 9,75         | 169,5                       | 95,49 | 130,25 | 251,7                      | 258,3     |
| 4                         | 27   | 36,16                     | 10,12        | 170,4                       | 91,84 | 127    | 276,8                      | 233,7     |
| 5                         | 36   | 26,46                     | 10,55        | 171,1                       | 87,22 | 122,8  | 301,3                      | 209,7     |
| 6                         | 45   | 20,64                     | 11,03        | 172,1                       | 79,35 | 115,5  | 323                        | 188,5     |
| 7                         | 54   | 16,76                     | 11,6         | 173,2                       | 69,43 | 106    | 341,6                      | 170,4     |
| 8                         | 63   | 13,99                     | 12,25        | 174,5                       | 59,47 | 96,7   | 358,9                      | 153,6     |
| 9                         | 72   | 11,91                     | 13,0         | 176                         | 48,25 | 86,25  | 373,4                      | 139,6     |
| 10                        | 81   | 10,29                     | 13,91        | 177,9                       | 33,07 | 72     | 378,6                      | 134,9     |
| 11                        | 90   | 9,0                       | 15           | 180                         | 20    | 60     | 385                        | 129       |
| 12                        | 90   | 9,0                       | 15           | 180                         | 20    | 60     | 385,5                      | 129       |

Вертикальные усилия на рабочие валки определяем по формуле (1.89), крутящие моменты по формулам (1.90) и (1.92). Ниже приведен расчет  $P_{верт}$ ,  $M_{Кр.В.В}$  и  $M_{Кр.Н.В}$  для второго горизонтального калибра, для остальных калибров расчетные значения даны в табл. 2.9.

$$P_{2B} = \frac{250 \cdot 6^2}{2} \cdot \ln \left[ \frac{180 - 9,14}{9,14} \cdot \left( \frac{80}{9,14} \right)^{\cos 9^0} \right] + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 9^{1,4} \times$$

$$\sqrt{62,6 \cdot (80^2 - 29,6 \cdot 14^2 \cos 9^0 + 180 - 21 \cdot 69,14)} =$$

$$\frac{80180}{80180}$$

$$= 4500 \cdot \ln 159,3 + 169003(0,0703 + 0,0398) = 41426,1 \text{ Н} = 41,43 \text{ кН}$$

$$M_{2Kp.B.B} = 41,43 \cdot 0,001 = 41,43 \text{ Нм}$$

$$M_{2Kp.H.B} = \frac{250 \cdot 6^2}{2} \left\{ 1 \cdot \ln \frac{180 - 9,14}{9,14} + 0,1 \left[ \frac{200,5}{2} \ln \frac{80}{9,14} + \right. \right.$$

$$\left. \left. \frac{180 - 18,28}{(80 - 9,14) \cdot \sin 9^0} \right] \right\} + 3,52 \cdot 10^{-4} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 9^{1,4} \cdot 6 \left\{ 1 \cdot \frac{180^{1,6}}{180^{1,6}} + \right.$$

$$\left. \frac{0,1}{80^{2,6}} \left[ \frac{200,5}{2} \left( \frac{80^2 - 9,14^2}{2} \right) + \frac{3}{2} (80^3 - 9,14^3) \cdot \sin 9^0 \right] \right\} =$$

$$= 4500(2,928 + 22,856) + 169003(0,04 + 0,491) =$$

$$= 116028 + 89741 = 205769 \text{ Нмм} = 205,8 \text{ Нм}$$

Таблица 2.9

**Расчетные значения усилий и крутящих моментов на валки стана профилировки швеллера**

| Наименование параметра                              | Порядковый номер клетки (калибра) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|-----------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|   | 2                                 | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
| Вертикальное усилие на валки, $P_v$ , кН            | 41,4                              | 40,6  | 39,3 | 37,5 | 35,3 | 32,7 | 29,8 | 26,6 | 21,9 | 19,9 | 19,9 |
| Момент крутящий на нижнем валке, $M_{Kp.H.B}$ , Нм  | 205,8                             | 220,4 | 260  | 285  | 306  | 324  | 339  | 350  | 357  | 359  | 360  |
| Момент крутящий на верхнем валке, $M_{Kp.B.B}$ , Нм | 41,4                              | 40,6  | 39,3 | 37,5 | 35,3 | 32,7 | 29,8 | 26,6 | 21,9 | 19,9 | 19,9 |

Определим мощность привода профилирующего стана. Принимаем скорость профилировки 60 м/мин. Частоту вращения валков рассчитываем по последней клетке:

$$n_v = \frac{V_{\text{проф}}}{\pi \cdot D_{\text{о.н}}} = \frac{60}{\pi \cdot 0,206} = 92,76 \text{ об/мин}$$

**Сумма крутящих моментов нижних валков:**

$$\sum_1^{12} M_{\text{кр.н.в}} = 3366,2 \text{ Нм.}$$

**Сумма крутящих моментов верхних валков:**

$$\sum_1^{12} M_{\text{кр.в.в}} = 344,9 \text{ Нм.}$$

Суммарный момент трения подшипниковых опор нижних и верхних валков:

$$\sum M_{\text{тр.п.о}} = \sum_1^{12} P_v \cdot \mu \cdot d_{\text{н.ср}} = 344,9 \cdot 0,005 \cdot 0,13 \cdot 10^3 = 224 \text{ Нм.}$$

**Суммарный крутящий момент привода валков:**

$$\dot{a} M_{\text{привода}} = 3366,2 + 344,9 + 224 = 3935,1 \text{ Нм.}$$

**Мощность привода валков стана:**

$$N_{\text{пр}} = \sum \frac{M_{\text{прив}} \cdot n}{9750} = \frac{3935,1 \cdot 92,75}{9750} = 37,43 \text{ кВт.}$$

**Принимаем суммарный к.п.д. привода:**

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{м}}^2 \cdot \eta_{\text{ц.ред}} \cdot \eta_{\text{шп}}^{13} \cdot \eta_{\text{шест.кл}}^{12} = 0,99^2 \cdot 0,92 \cdot 0,99^{13} \cdot 0,98^{12} = 0,62.$$

**Мощность электродвигателя привода:**

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{пр}}}{\eta_{\Sigma}} = \frac{37,43}{0,62} = 60,37 \text{ кВт.}$$

$$\text{дв } \eta_{\Sigma} \quad 0,62$$

**Выбираем электродвигатель постоянного тока**

4ПФ200L ( $N = 75 \text{ кВт}$ ,  $n = 1060 \text{ об/мин}$ ) [12].

## 2.7. Задание 7

Произвести расчет калибровки валков, силовых параметров при профилировании дорожных ограждений из стали 20. Эскиз поперечного сечения профиля дан на рис. 2.6. Калибровка валков одновременная.

**Исходные данные:**

Высота профиля,  $H$ : 77 мм.

Толщина стенки  $S$ : 4 мм

Количество волн: 2

Механические характеристики материала полосы:

$\sigma_{вр} = 420$  МПа;  $\sigma_T = 270$  МПа.

Разбиваем сечение на элементы (рис. 2.6) и рассчитываем ширину заготовки по формуле 1.78:

$$B_3 = b_1 + 6b_2 + 2b_3 + 2b_4 + 2b_5 + 2b_6 = 460 \text{ мм}$$

$$b_1 = 28 \text{ мм};$$

$$b_2 = (r + KS) \cdot \alpha_{\text{изд}} \cdot \frac{\pi}{180} = (23,5 + 0,485 \cdot 4) \cdot 53,5 \cdot \frac{\pi}{180} = 23,75 \text{ мм};$$

$$b_3 = 70,2 \text{ мм}; \quad b_4 = 47,6 \text{ мм};$$

$$b_5 = (14 + 0,485 \cdot 4) \cdot 21,5 \cdot \frac{\pi}{180} = 6 \text{ мм}; \quad b_6 = 20,8 \text{ мм}.$$

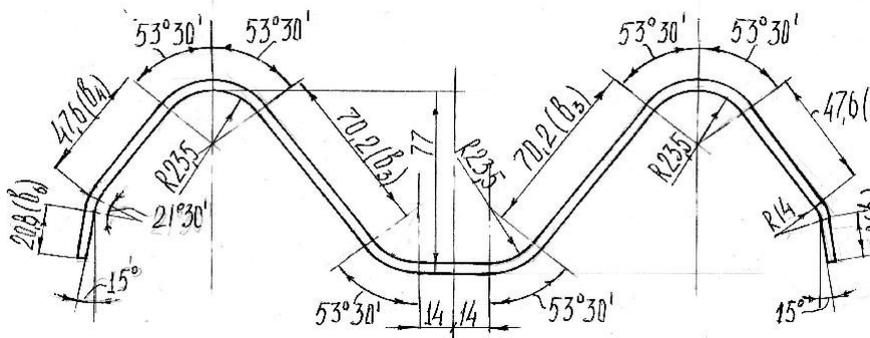


Рис. 2.6. Эскиз поперечного сечения дорожного ограждения.

Ширину криволинейных участков  $b_2$  сохраняем неизменной для всех проходов. Принимаем углы подгибки  $\alpha_i$  за проход в пределах  $8 \div 10^\circ$  (рис. 1.23 б). Рассчитываем суммарные углы подгибки профиля в калибрах ( $\alpha_{Ci}$ ).

Определяем переменные радиусы формовки криволинейных

участков по нейтральной линии (рис. 2.7):  $\rho_i = \frac{b^2}{\alpha_{Ci}}$  и далее внутренний  $r_{vi} = \rho_i - KS$  и наружный  $R_{Hi} = r_{vi} + S$  радиусы профиля в проходах. Рассчитываем высоту профиля:  $H_i = (R_{Hi} + r_{vi}) \cdot (1 - \cos \alpha_{Ci}) + b_3 \cdot \sin \alpha_{Ci}$  и ширину шайб калибров валков (рис. 2.7):  $a_1 = \rho_i \cdot \sin \varphi_i$ ;  $a_2 = b_3 \cdot \cos \varphi_i$ ;  $a_3 = (b_4 + b_5 + b_6) \cdot \cos \alpha_C$ . Расчетные значения параметров калибровки валков приведены в табл. 2.10.

Межцентровое расстояние между осями верхнего и нижнего валков  $A = 290$  мм (конструкция клетки), из условия прочности валкового узла диаметр по дну калибра принимаем  $\varnothing 209$  мм. Чтобы сохранить низ профиля без перегибов, диаметры по дну калибра всех переходов принимаем постоянными, т.е. 209 мм.

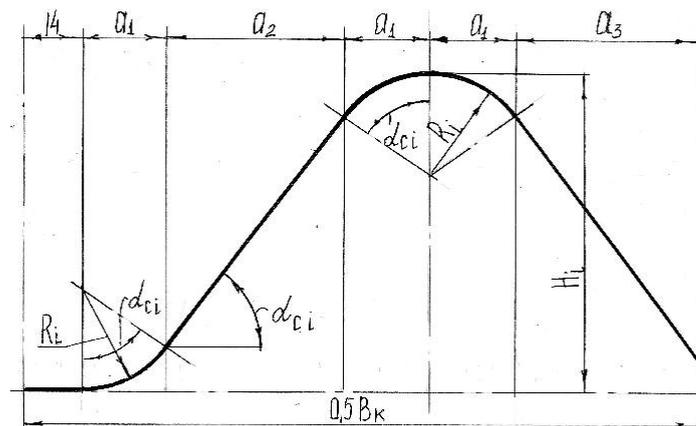


Рис. 2.7. Схема к расчету размеров валков при профилировании дорожных ограждений.

Определяем максимальный диаметр валков в 8 калибре:

$$D_{0 \max} = D_{0 \min} + 2H_i = 209 + 2 \cdot 77 = 363 \text{ мм}$$

Расстояние между осями валков:

$$0,5(D_{0 \max} + D_{0 \min}) + S = 0,5(209 + 363) + 4 = 290 \text{ мм}$$

Размеры валков первой клетки:

Нижнего:  $D^H = 209$  мм;  $D^H = 209 + 13,1 \cdot 2 = 235,2$  мм. 1 min

1 max

Таблица 2.10

| Параметры калибровки валков изготовления дорожных ограждений |  |                      |                     |          |                           |                                 |       |       |                           |
|--|--|----------------------|---------------------|----------|---------------------------|---------------------------------|-------|-------|---------------------------|
| № калибра  | Суммарный угол подгибки $\alpha_{Ci}$ , град | Радиус $\rho_i$ , мм | Радиусы профиля, мм |          | Высота профиля $H_i$ , мм | Ширина шайб калибров валков, мм |       |       | Ширина калибра $B_k$ , мм |
|  |  |                      | $r_{\phi i}$        | $R_{Hi}$ |                           | $a_1$                           | $a_2$ | $a_3$ |                           |
| 1  | 8  | 170,1                | 168,1               | 172,1    | 13,1                      | 23,7                            | 69,5  | 73,7  | 456,6                     |
| 2  | 18   | 75,6                 | 73,6                | 77,6     | 29,1                      | 23,4                            | 66,8  | 70,7  | 443,4                     |
| 3  | 27   | 50,4                 | 48,4                | 52,4     | 42,85                     | 22,9                            | 62,5  | 66,3  | 423                       |
| 4  | 35   | 38,9                 | 36,9                | 40,9     | 54,3                      | 22,3                            | 57,5  | 60,9  | 398,6                     |
| 5  | 42   | 32,4                 | 30,4                | 34,4     | 63,6                      | 21,7                            | 52,2  | 55,3  | 373,2                     |
| 6  | 48   | 28,4                 | 26,4                | 30,4     | 70,9                      | 21,1                            | 47    | 49,8  | 348,2                     |
| 7  | 53,5   | 25,4                 | 23,5                | 27,5     | 77,0                      | 20,5                            | 41,8  | 44,3  | 323,2                     |
| 8  | 53,5   | 25,4                 | 23,5                | 27,5     | 77,0                      | 20,5                            | 41,8  | 32,6  | 299,8                     |

**Определяем максимальный диаметр валков в 8 калибре:**

$$D_{0 \max} = D_{0 \min} + 2H_i = 209 + 2 \cdot 77 = 363 \text{ мм}$$

**Расстояние между осями валков:**

$$0,5(D_{0 \max} + D_{0 \min}) + S = 0,5(209 + 363) + 4 = 290 \text{ мм}$$

**Размеры валков первой клетки:**

$$\text{Нижнего} - D_{1 \min}^H = 209 \text{ мм}; D_{1 \max}^H = 209 + 13,1 \cdot 2 = 235,2 \text{ мм.}$$

$$\text{Верхнего} - D_{1 \min}^B = [209 - (\frac{235,2}{2} + 4)] \cdot 2 = 336,8 \text{ мм};$$

$$D_{1 \max}^B = [209 - (\frac{209}{2} + 4)] \cdot 2 = 363 \text{ мм}$$

**Средние значения диаметров валков:**  $D_{1 \text{cp}}^B = 349,9 \text{ мм};$

$$D_{1 \text{cp}}^H = 222,1 \text{ мм.}$$

**Передаточное отношение зубчатого зацепления шестеренной клетки:**

$$u = \frac{D_{1 \text{cp}}^B}{D_{1 \text{cp}}^H} = \frac{349,9}{222,1} = 1,575.$$

**Валки первой клетки приводные, в остальных клетях формовочного стана приводными выполнены только нижние**

валки. Натяжение полосы создается за счет увеличения катающих диаметров валков при увеличении высоты профиля.

Усилия при профилировании определим по методике [10].

Расчет выполнен для первого калибра по схеме рис. 2.8.

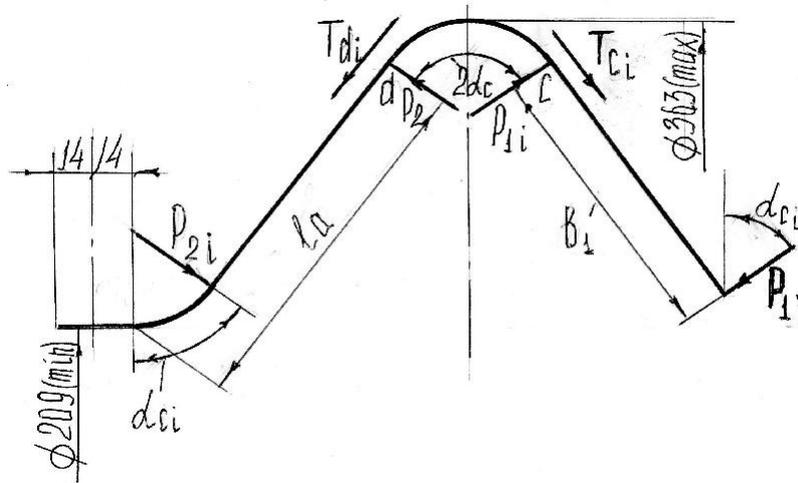


Рис. 2.8. Схема к расчету усилий при профилировке дорожных ограждений.

Усилие  $P_1$  определяем по формуле (1.96):

$$b = 23,75 + 47,6 + 6 + 20,8 = 98 \text{ мм}; \quad C = 23,75 \text{ мм}; \quad \alpha = 8^0.$$

$$P = \frac{270 \cdot 4^2}{4} \cdot \ln \frac{98}{23,75} + 1,76 \cdot 10^{-4} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot \frac{1,4}{8} \cdot \frac{2,6}{4} \cdot \frac{-2,6}{98} \times$$

$$\times (98^2 - 23,75^2) = 3032 \text{ Н} = 3,03 \text{ кН}.$$

Усилие  $P_2$  рассчитываем по формуле (1.94):

$$l_a = 70,2 + 23,75 = 94 \text{ мм}$$

Длину плавного перехода определяем по рис. 1.27, режим 0-II:

$$K_1 = K_2 = \frac{0,134 \cdot 8^{0,4}}{40,4} = 0,177$$

$$L = 0,177 \cdot 216^{1,4} + 216 - (0,177 \cdot 98^{1,4} + 98) = 344 \text{ мм}$$

$$\varepsilon_T = \frac{\sigma_T}{E} = \frac{270}{2,1 \cdot 10^5} = 1,35 \cdot 10^{-3}; \quad \varepsilon = \frac{\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1}}{S + \rho_1} = \frac{4}{2 \cdot 170,1} = 1,17 \cdot 10^{-2}$$

$$Z^s = 344 \left( 1 - \frac{1,35 \cdot 10^{-3}}{11,7 \cdot 10^{-3}} \right) = 304 \text{ мм.}$$

Момент пластического изгиба в точке  $c$  (формула 1.93):

$$M_{п.из.с} = \frac{270 \cdot 4^2}{4} \cdot 304 - \frac{344 \cdot 270^2 \cdot 170,1}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^5} \times$$

$$\times \left\{ \frac{2,1 \cdot 10^5}{270} \cdot \frac{1}{170,1} \left( \frac{344 - 304}{344} \right) - \frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 1}{270 \cdot 170,1} \right\} +$$

$$+ 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1,17 \cdot 10^{-2} \cdot 4_2 \left( \frac{344 - 304}{12 \cdot 344} \right)_2 = 332146 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

$$P_2 = \frac{2 \cdot 332146}{94} = 7070,5 \text{ Н} = 7,07 \text{ кН.}$$

Усилие натяжения полосы в точке  $d$ :

$$T_d = P_1 \cdot f = 3,03 \cdot 0,1 = 0,3 \text{ кН.}$$

Усилие натяжения полосы в точке  $c$ :

$$T_c = T_d \cdot e^{2f\varphi_{1c}} + P_2 \cdot f = 0,3 \cdot e^{0,2 \cdot 8 / 57,3} + 7,07 \cdot 0,1 = 1,015 \text{ кН.}$$

Вертикальное усилие на валок (ф.1.95):

$$P_{в\Sigma} = 2(P_1 + P_2) \cos 8^\circ + 2(T_d + T_c) \sin 8^\circ = 2(3,03 + 7,07) \cos 8^\circ +$$

$$+ 2(0,3 + 1,015) \sin 8^\circ = 20,37 \text{ кН.}$$

Для остальных калибров (клетей) материалы расчетов даны в табл. 2.11.

Крутящий момент на нижнем валке определяем по формуле:

$$M_{кр.н.в} = P_{в\Sigma i} \cdot f \cdot (D_{i \min} + H_i) + P_{в\Sigma n} \cdot \mu_n \cdot D_{ср.н},$$

где  $\mu_n$ ,  $D_{ср.н}$  – коэффициент трения и средний диаметр подшипников качения опор ( $\mu_n = 0,005$ ,  $D_{ср.н} = 120 \text{ мм}$ ).

Для первой клетки крутящий момент:

$$M_{кр.1} = 20,37 \cdot 0,1 \cdot (209 + 13,1) + 20,37 \cdot 0,005 \cdot 120 = 464,6 \text{ Нм.}$$

Для остальных клеток значения  $M_{кр.i}$  даны в табл. 2.11.

Определим мощность привода стана.

Принимаем скорость профилировки  $V_{пр} = 20 \text{ м/мин.}$

Таблица 2.11

**Расчетные значения усилий на валки при профилировании  
дорожных ограждений**

| Наименование параметра                  | Порядковый номер калибра (клетки) |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 1                                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| Коэффициент $K$                         | 0,177                             | 0,193 | 0,185 | 0,177 | 0,168 | 0,158 | 0,152 | 0     |
| Длина $L$ , мм                          | 344                               | 357   | 348   | 344   | 327   | 314   | 307   | 118   |
| Длина $Z_S$ , мм                        | 304                               | 323   | 312   | 302   | 280   | 269   | 248   | 0     |
| Величина $\varepsilon \cdot 10^{-2}$    | 1,17                              | 1,4   | 1,29  | 1,1   | 0,95  | 0,94  | 0,71  | 0     |
| Момент пластического изгиба, $M_c$ , Нм | 332,1                             | 351,8 | 339,9 | 330,8 | 308,5 | 291,5 | 278,5 | 268,5 |
| Усилие $P_1$ , кН                       | 3,03                              | 3,58  | 3,3   | 3,03  | 2,78  | 2,53  | 2,42  | 1,53  |
| Усилие $P_2$ , кН                       | 7,07                              | 7,484 | 7,231 | 7,04  | 6,564 | 6,203 | 5,926 | 5,713 |
| Усилие $T_d$ , кН                       | 0,3                               | 0,358 | 0,33  | 0,3   | 0,278 | 0,253 | 0,242 | 0,153 |
| Усилие $T_c$ , кН                       | 1,015                             | 1,131 | 1,086 | 1,043 | 0,98  | 0,916 | 0,882 | 0,755 |
| Усилие $P_{\Sigma}$ , кН                | 20,37                             | 22,32 | 20,05 | 18,04 | 15,57 | 13,41 | 11,73 | 10,1  |
| Момент $M_{кр.н.в.}$ , Нм               | 464,6                             | 544,8 | 517,3 | 485,8 | 433,8 | 383,5 | 342,5 | 295   |

Частота вращения валков:

$$n_v = \frac{n_p}{\pi \cdot D_{cp8}} = \frac{20}{\pi(0,209 + 0,209 + 2 \cdot 0,077) \cdot 0,5} = 20,3 \text{ об/мин},$$

где  $D_{cp8}$  – средний диаметр нижнего валка 8 клетки.

**Суммарный крутящий момент привода:**

$$M_{кр\Sigma} = \sum_{i=1}^8 M_{крi} = 3467,3 \text{ Нм}$$

**Мощность привода стана:**

$$N = \frac{M_{кр\Sigma} \cdot n_v}{9750} = 7,219 \text{ кВт}$$

**К.п.д. привода:**  $\eta_{\Sigma} = 0,99^2 \cdot 0,92 \cdot 0,97^8 = 0,7$ .

**Мощность электродвигателя привода:**

$$N = \frac{N_{np}}{\eta_{\Sigma}} = \frac{7,219}{0,7} = 10,3 \text{ кВт}.$$

$d_v \quad \eta_{\Sigma} \quad 0,7$

Выбираем электродвигатель переменного тока 4A160S6У3 ( $N = 11$  кВт,  $n = 975$  об/мин). Редуктор Ц2У-315Н ( $u = 50$ ,

$M_{max.np} = 7,6$  кН·м).

## Приложение

### Расчет в системе Mathcad калибровки валков формовочного стана ТЭСА 203-530 [13] для трубы $\varnothing 219 \times 8$

Сварка ТВЧ. Калибровка комбинированная: в открытых калибрах - однорядная, в закрытых - двухрядная. После открытых калибров производится подгибка кромок в кромкогибочной клетке радиусом  $R_{св}$ . После сварки производится калибровка трубы в универсальных клетках. Закрытые калибры формовки полосы выполнены по универсальной схеме: горизонтальные валки - приводные, вертикальные - холостые профильные ролики.

#### Исходные данные

Применяемые размерности: мм := 0.001m град := deg

Количество горизонтальных клеток:  $N := 8$

Количество закрытых калибров:  $N_3 := 3$

Количество вертикальных калибров:  $N_B := 3$

Ширина шайбы закрытых калибров 6-8 клеток:

$B_{ш6} := 265\text{мм}$   $B_{ш7} := 195\text{мм}$   $B_{ш8} := 125\text{мм}$

Диаметр трубы:  $D_{тр} := 219\text{мм}$

Толщина стенки трубы:  $S_{тр} := 8\text{мм}$

Обжатие по диаметру в калибровочном стане  $\Delta D_{кал} := 4\text{мм}$

Диаметр трубы после сварочной клетки:  $D_{св} := 223\text{мм}$

Диаметры валков по дну калибра горизонтальных клеток:  $D_H := 600\text{мм}$

Диаметр валков вертикальных клеток:  $D_B := 250\text{мм}$

Коэффициент, учитывающий припуск на формовку и сварку:  $k := 0.015$

#### Ширина ленты

$$B_{л} := \frac{\pi \cdot (D_{тр} + \Delta D_{кал} - S_{тр})}{1 - k} \quad B_{л} = 685.7 \text{ мм}$$

## Расчет размеров открытых калибров

Порядковый номер первого закрытого калибра:  $n := 6$

Радиус сварочного калибра:

$$r_{\text{св}} := \frac{D_{\text{св}}}{2} \quad r_{\text{св}} = 111.5 \text{ мм}$$

Радиусы открытых калибров нижних валков:

$$R_{1\text{н}} := \frac{n}{1} \cdot r_{\text{св}} \quad R_{1\text{н}} = 669 \text{ мм}$$

$$R_{2\text{н}} := \frac{n}{2} \cdot r_{\text{св}} \quad R_{2\text{н}} = 334.5 \text{ мм}$$

$$R_{3\text{н}} := \frac{n}{3} \cdot r_{\text{св}} \quad R_{3\text{н}} = 223 \text{ мм}$$

$$R_{4\text{н}} := \frac{n}{4} \cdot r_{\text{св}} \quad R_{4\text{н}} = 167.3 \text{ мм}$$

Углы формовки открытых калибров:

$$\phi_1 := \frac{B_{\text{л}}}{R_{1\text{н}}} \quad \phi_1 = 58.7 \text{ deg}$$

$$\phi_2 := \frac{B_{\text{л}}}{R_{2\text{н}}} \quad \phi_2 = 117.5 \text{ deg}$$

$$\phi_3 := \frac{B_{\text{л}}}{R_{3\text{н}}} \quad \phi_3 = 176.2 \text{ deg}$$

$$\phi_4 := \frac{B_{\text{л}}}{R_{4\text{н}}} \quad \phi_4 = 234.9 \text{ deg}$$

Ширина открытых калибров:

$$B_1 := 2 \cdot R_{1\text{н}} \cdot \sin(0.5 \cdot \phi_1) \quad B_1 = 656.1 \text{ мм}$$

$$B_2 := 2 \cdot R_{2\text{н}} \cdot \sin(0.5 \cdot \phi_2) \quad B_2 = 571.8 \text{ мм}$$

$$B_3 := 2 \cdot R_{3\text{н}} \cdot \sin(0.5 \cdot \phi_3) \quad B_3 = 445.8 \text{ мм}$$

$$B_4 := 2 \cdot R_{4\text{н}} \quad B_4 = 334.5 \text{ мм}$$

Диаметры нижних валков по реборде:

$$D_{\text{нр1}} := D_{\text{н}} + 2 \cdot R_{1\text{н}} \cdot (1 - \cos(0.5 \cdot \phi_1)) \quad D_{\text{нр1}} = 771.9 \text{ мм}$$

$$D_{\text{нр2}} := D_{\text{н}} + 2 \cdot R_{2\text{н}} \cdot \left(1 - \cos\left(0.5 \cdot \phi_2\right)\right) \quad D_{\text{нр2}} = 921.7 \text{ мм}$$

$$D_{\text{нр3}} := D_{\text{н}} + 2 \cdot R_{3\text{н}} \cdot \left(1 - \cos\left(0.5 \cdot \phi_3\right)\right) \quad D_{\text{нр3}} = 1031.2 \text{ мм}$$

$$D_{\text{нр4}} := D_{\text{н}} + 2 \cdot R_{4\text{н}} \quad D_{\text{нр4}} = 934.5 \text{ мм}$$

Диаметры верхних валков.

Диаметр вала валков:  $D_{\text{вал}} := 400 \text{ мм}$

$$D_{\text{в1}} := D_{\text{вал}} + 2 \cdot (R_{1\text{н}} - S_{\text{тр}}) \cdot \left(1 - \cos\left(0.5 \cdot \phi_1\right)\right) + 50 \cdot \text{мм} \quad D_{\text{в1}} = 619.9 \text{ мм}$$

$$D_{\text{в2}} := D_{\text{вал}} + 2 \cdot (R_{2\text{н}} - S_{\text{тр}}) \cdot \left(1 - \cos\left(0.5 \cdot \phi_2\right)\right) + 50 \cdot \text{мм} \quad D_{\text{в2}} = 764 \text{ мм}$$

$$D_{\text{в3}} := D_{\text{вал}} + 2 \cdot (R_{3\text{н}} - S_{\text{тр}}) \cdot \left(1 - \cos\left(0.5 \cdot \phi_3\right)\right) + 50 \cdot \text{мм} \quad D_{\text{в3}} = 865.7 \text{ мм}$$

$$D_{\text{в4}} := D_{\text{вал}} + 2 \cdot (R_{4\text{н}} - S_{\text{тр}}) \cdot \left(1 - \cos\left(0.5 \cdot \phi_4\right)\right) + 50 \cdot \text{мм} \quad D_{\text{в4}} = 915.4 \text{ мм}$$

Подгибка кромок в кромкогибочной клети:

Угол подгибки кромок:  $\phi_5 := 35 \text{ град}$

Радиус подгибки кромок:  $r_5 := r_{\text{св}} \quad r_5 = 111.5 \text{ мм}$

Радиус центрального участка:  $R_{5\text{н}} := R_{4\text{н}} \quad R_{5\text{н}} = 167.3 \text{ мм}$

Угол формовки центрального участка:

$$\alpha_5 := \frac{B_{\text{л}} - 2 \cdot r_5 \cdot \phi_5}{R_{5\text{н}}} \quad \alpha_5 = 188.2 \text{ град}$$

Суммарный угол подгибки кромок:

$$\psi_5 := \alpha_5 + 2 \cdot \phi_5 \quad \psi_5 = 258.2 \text{ град}$$

### Расчет размеров закрытых калибров

Суммарный угол формовки:

$$\psi_6 := \frac{2\pi}{1 + \frac{B_{\text{ш6}}}{0.99 \cdot B_{\text{л}}}} \quad \psi_6 = 258.9 \text{ град}$$

$$\psi_7 := \frac{2\pi}{1 + \frac{B_{\text{ш7}}}{0.99 \cdot B_{\text{л}}}} \quad \psi_7 = 279.7 \text{ град}$$

## Вертикальные калибры

Углы формовки вертикальных калибров:

$$\begin{aligned}\phi_{12} &:= 0.5(\phi_1 + \phi_2) & \phi_{12} &= 88.1 \text{ град} \\ \phi_{23} &:= 0.5(\phi_2 + \phi_3) & \phi_{23} &= 146.8 \text{ град} \\ \phi_{34} &:= 0.5(\phi_3 + \phi_4) & \phi_{34} &= 205.5 \text{ град}\end{aligned}$$

Радиусы формовки:

$$\begin{aligned}R_{B12} &:= \frac{B_{\text{Л}}}{\phi_{12}} & R_{B12} &= 446 \text{ мм} \\ R_{B23} &:= \frac{B_{\text{Л}}}{\phi_{23}} & R_{B23} &= 267.6 \text{ мм} \\ R_{B34} &:= \frac{B_{\text{Л}}}{\phi_{34}} & R_{B34} &= 191.1 \text{ мм}\end{aligned}$$

Ширина калибров:

$$\begin{aligned}B_{B12} &:= 2 \cdot R_{B12} \cdot \sin(0.5 \cdot \phi_{12}) & B_{B12} &= 620.2 \text{ мм} \\ B_{B23} &:= 2 \cdot R_{B23} \cdot \sin(0.5 \cdot \phi_{23}) & B_{B23} &= 512.9 \text{ мм} \\ B_{B34} &:= 2 \cdot R_{B34} & B_{B34} &= 382.3 \text{ мм}\end{aligned}$$

Высота калибров:

$$\begin{aligned}a_{B12} &:= R_{B12} \cdot \left(1 - \cos(0.5 \cdot \phi_{12})\right) & a_{B12} &= 125.4 \text{ мм} \\ a_{B23} &:= R_{B23} \cdot \left(1 - \cos(0.5 \cdot \phi_{23})\right) & a_{B23} &= 191.2 \text{ мм} \\ a_{B34} &:= R_{B34} \cdot \left(1 + \sin\left(0.5 \cdot \phi_{34} - \frac{\pi}{2}\right)\right) & a_{B34} &= 233.4 \text{ мм}\end{aligned}$$

Валки вертикальных калибров выполнены в виде цилиндрических роликов с буртами, минимальный диаметр роликов 250 мм. Ролики снабжены устройствами как радиальной регулировки, так и регулировки углов наклона. Калибр сварочной клетки - круглый, образован четырьмя холостыми роликами, расположенными под углом 90 град. друг к другу и 45 град. к горизонту.

Диаметр калибра:

$$D_{\text{св}} := \frac{B_{\text{Л}} \cdot (1 - k)}{\pi} + S_{\text{тр}} \quad D_{\text{св}} = 223 \text{ мм}$$

Калибровочный стан имеет четыре универсальные клетки с приводными горизонтальными и холостыми вертикальными валками.

Обжатие по диаметру в калибре:

$$\varepsilon_{\text{к}} := 0.45\%$$

Калибры круглые, диаметр калибров равен:

$$D_{\text{к1}} := D_{\text{св}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{к}}) \quad D_{\text{к1}} = 222 \text{ мм}$$

$$D_{\text{к2}} := D_{\text{к1}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{к}}) \quad D_{\text{к2}} = 221 \text{ мм}$$

$$D_{\text{к3}} := D_{\text{к2}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{к}}) \quad D_{\text{к3}} = 220 \text{ мм}$$

$$D_{\text{к4}} := D_{\text{к3}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{к}}) \quad D_{\text{к4}} = 219 \text{ мм}$$

Калибровка рабочего инструмента для трубы  $\varnothing 219 \times 8$  на ТЭСА 203-530 дана на рис. П1.

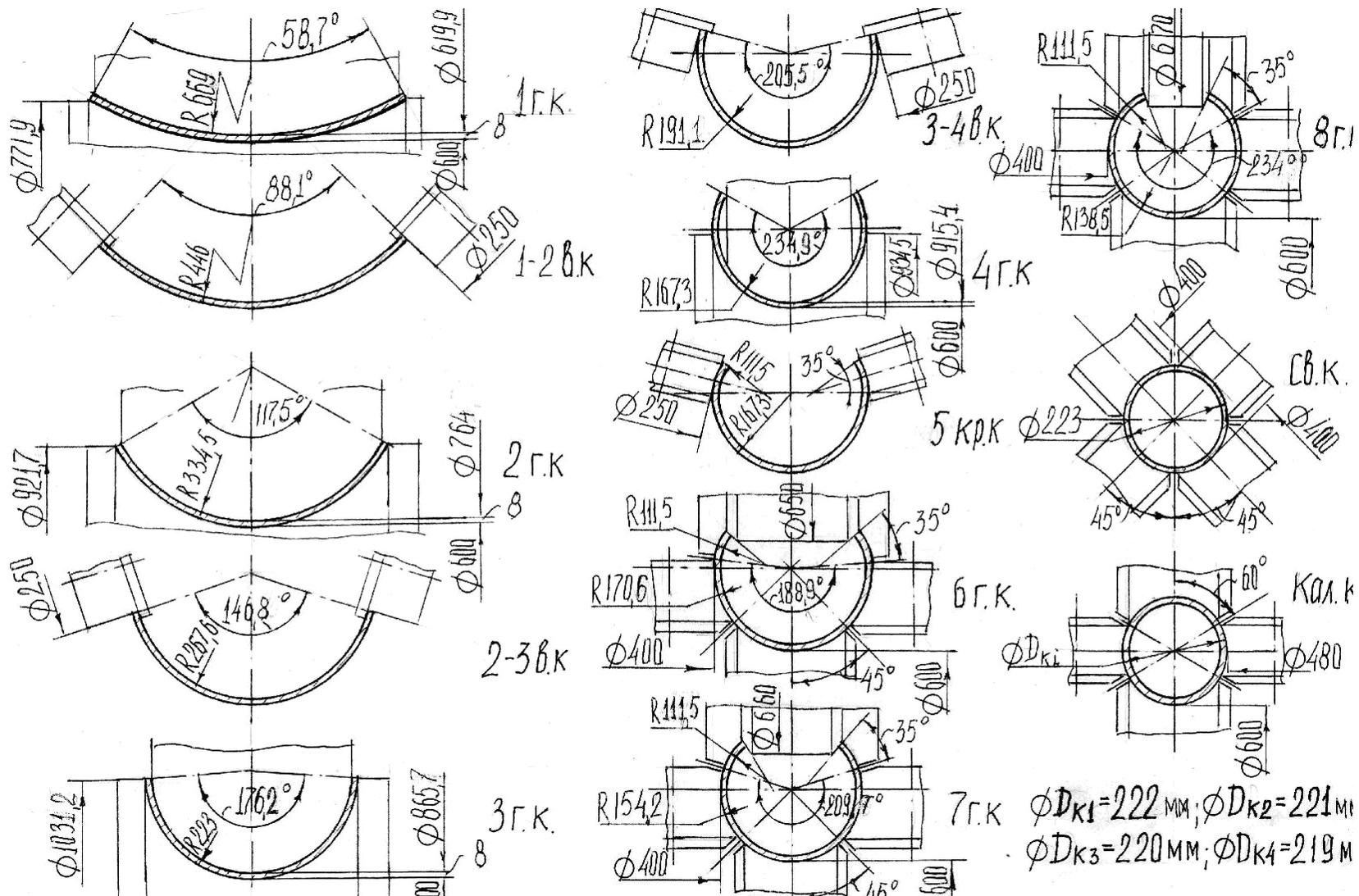


Рис. П.1. Калибровка рабочего инструмента для трубы  $\phi 219 \times 8$  на ТЭСА 203-530.

## Библиографический список

1. Кочергин К. А. Сварка давлением. – Л.: Машиностроение, 1972, 216 с.
2. Чекмарев А. П., Друян В. М. Теория трубного производства. – М.: Металлургия, 1976, 304 с.
3. Данченко В. Н. и др. Технология трубного производства. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002, 638 с.
4. Матвеев Ю. М. Теоретические основы производства сварных труб. – М.: Металлургия, 1967, 168 с.
5. Матвеев Ю. М., Ваткин Я. Л. Калибровка инструмента трубных станов. – М.: Металлургия, 1970, 480 с.
6. Попов Е. А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977, 278 с.
7. Матвеев Ю. М. и др. Производство электросварных труб большого диаметра. – М.: Металлургия, 1968, 190 с.
8. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х т. / Под ред. Дальского А. М., Косиловой Н. Г. – М.: Машиностроение, 2003, 912 с.
9. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов. – М.: Металлургия, 1969, 462 с.
10. Тришевский И. С. и др. Производство гнутых профилей. Оборудование и технология. – М.: Металлургия, 1982, 380 с.
11. Производство и применение гнутых профилей проката. Справочник. / Под ред. Тришевского И. С. – М.: Металлургия, 1975, 535 с.
12. Справочник по электрическим машинам. Т. 1. / Под ред. Копылова И. П. – М.: Энергоатомиздат, 1988, 454 с.
13. Коликов А. П. и др. Машины и агрегаты трубного производства. – М.: МИСиС, 1998, 536 с.

