



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-72-79>
УДК 621.774

Поступила 04.07.2024
Received 04.07.2024

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

С. В. ПИЛИПЕНКО, Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
г. Новополоцк, Витебская обл., Беларусь, ул. Блохина, 29. Email: 44-08@mail.ru

Актуальность работы обосновывается необходимостью уточнения методики расчета маршрутов холодной прокатки, связанной с расширением факторов, которые следует учитывать при ведении подобных расчетов. Целью работы является разработка алгоритма оптимизации маршрутов холодной прокатки труб с применением станов типа ХПТ и ХПТР, удобного для реализации в программном продукте. В работе проанализированы основные параметры оптимизации маршрутов холодной прокатки труб, факторы, ограничивающие поле оптимальных значений геометрических параметров трубы-заготовки в каждом проходе. Среди последних выделены максимальное возможное обжатие по площади поперечного сечения, необходимое обжатие по площади поперечного сечения в последнем проходе, требование к характеру распределения величины обжатия по площади поперечного сечения, толщине стенки и диаметру трубы из прохода в проход и другие параметры. Замечена важность минимизации количества проходов. Проанализированы и выделены основные зависимости, включающиеся в метод расчета деформационных параметров маршрута холодной прокатки с использованием станов ХПТ и ХПТР. Разработан алгоритм расчета маршрута холодной прокатки труб с несколькими операциями итерации. Предложенный алгоритм позволяет оптимизировать маршрут прокатки труб из любых марок сталей и сплавов, оптимизировать большинство параметров, в том числе, влияющих на экономические параметры производства. В зависимости от марки стали или сплава некоторые операции итерации могут исключаться. Алгоритм проверен в практике расчета маршрутов прокатки труб из углеродистых и нержавеющей сталей и сплавов.

Ключевые слова. Холодная прокатка труб, станы ХПТ и ХПТР, маршрут прокатки, деформационные параметры, параметры заготовки, геометрические параметры, оптимизация, алгоритм расчета.

Для цитирования. Пилипенко, С. В. Алгоритм оптимизации маршрутов холодной прокатки труб / С. В. Пилипенко // Литье и металлургия. 2024. № 3. С. 72–79. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-72-79>.

ALGORITHM FOR OPTIMIZATION OF COLD-ROLLED PIPE ROLLING ROUTES

S. V. PILIPENKO, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk,
Novopolotsk, Vitebsk region, Belarus, 29, Blokhina str. E-mail: 44-08@mail.ru

The relevance of the work is justified by the need to refine the methodology for calculating cold rolling routes, associated with the expansion of factors that need to be taken into account in conducting such calculations. The aim of the work is to develop an algorithm for optimizing the routes of cold rolling of pipes using CRP and CRPR type mills, convenient for implementation in a software product. The paper analyzes the main parameters for optimizing the routes of cold rolling of pipes, factors limiting the field of optimal values of the geometric parameters of the billet-pipe in each pass. Among the latter, the maximum possible reduction in the cross-sectional area, the required reduction in the cross-sectional area in the last pass, the requirement for the nature of the distribution of the reduction value in the cross-sectional area, in the wall thickness and in the pipe diameter from pass to pass and other parameters are highlighted. The importance of minimizing the number of passes is noted. The main dependencies included in the method for calculating the deformation parameters of the cold rolling route using CRP and CRPR mills are analyzed and highlighted. An algorithm for calculating the route of cold rolling of pipes, with several iteration operations, has been developed. The proposed algorithm allows optimizing the rolling route of pipes made of any grades of steels and alloys, and allows optimizing most parameters, including those affecting the economic parameters of production. Depending on the grade of steel or alloy, some iteration operations can be excluded. The algorithm has been tested in the practice of calculating rolling routes for pipes made of carbon and stainless steels and alloys.

Keywords. Cold rolling of pipes, CRP and CRPR mills, rolling route; deformation parameters, billet parameters; geometric parameters; optimization, calculation algorithm.

For citation. Pilipenko S. V. Algorithm for optimization of cold-rolled pipe rolling routes. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 3, pp. 72–79. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-72-79>.

Введение

Продукция цехов холодной прокатки труб используется во всех отраслях промышленности, строительстве, в аэрокосмической отрасли и др. [1, 2]. Холодной прокаткой производятся

особовысококачественные трубы специального назначения из широкого спектра марок сталей и сплавов. Заготовкой для производства труб холодной прокаткой служит горячекатаная или горячепрессованная труба. В калькуляции расходов на производство труб холодной прокаткой расходы на приобретение заготовки могут достигать до 80 % и более [3, 4]. Поэтому любое повышение расхода металла заготовки на 1 т готовой трубы непосредственно, через расходный коэффициент, сказывается на экономических показателях производства [4, 5]. Среди факторов, влияющих на расходный коэффициент, следует выделить общую культуру производства, состояние оборудования, методы калибровки рабочего инструмента, особенности технологии прокатного производства, правильно оптимизированный маршрут прокатки и др. [4, 5].

Поскольку процесс холодной деформации труб сопровождается наклепом металла, то деформация заготовки осуществляется в несколько проходов. Между проходами трубу подвергают ряду промежуточных отделочных операций типа обезжиривания, промежуточной термообработки, разрезки, контроля качества, нанесения подмазочного слоя и др. В итоге после окончательной термообработки должна получиться труба с заданными механическими свойствами металла и определенных геометрических параметров. Естественно, как одни, так и другие параметры должны колебаться строго в определенных границах, требования которых описаны в стандартах на этот вид продукции, а также принятых к исполнению договоренностях с заказчиком.

Таким образом, при расчете маршрута прокатки важно учитывать такие факторы, как максимальное возможное обжатие до разрушения целостности металла или сплава; максимальное возможное обжатие с точки зрения обеспечения точности труб при выбранной величине подачи металла трубы перед рабочим ходом прокатного стана; необходимое обжатие по площади поперечного сечения в последнем проходе маршрута; возможные требования к характеру распределения величины обжатия по площади поперечного сечения по проходам маршрута; минимизация проходов прокатки в маршруте и др. Необходимым является разработка алгоритма, позволяющего оптимизировать параметры маршрута холодной прокатки труб.

Цель исследования – систематизация опыта и разработка алгоритма оптимизации маршрутов холодной прокатки труб в станах типа ХПТ и ХПТР, удобного для реализации в программном продукте. Уточнение коэффициентов эмпирических зависимостей, используемых для расчета параметров маршрутов холодной прокатки труб.

Методы исследования

На первом этапе проведен анализ существующих теоретических исследований, связанных с методом расчета распределения деформационных параметров обжатия трубы-заготовки по проходам маршрута холодной прокатки труб в станах типа ХПТ и ХПТР. В ходе анализа выявлены и определены конкретные геометрические и деформационные параметры, которые необходимо оптимизировать при расчете конкретного маршрута прокатки. Выполнен анализ реализованных маршрутов холодной прокатки труб. Данные исследований маршрутов прокатки интерполированы в эмпирические зависимости, удобные для использования в практике расчетов маршрутов прокатки. На конечных этапах исследований произведен синтез алгоритма оптимизации маршрутов холодной прокатки труб в станах типа ХПТ и ХПТР, осуществлен анализ логики его работы.

Результаты исследования и их обсуждение

При анализе теоретических исследований и разработок, связанных с исследуемым методом расчета, определено, что для станов холодной прокатки исходными данными для распределения режимов деформации по проходам маршрута прокатки являются диаметр и толщина стенки готовой трубы (D_n , S_n). Следует определиться с параметрами обжатия в последнем проходе, т.е. задаться [3–5] обжатием по площади поперечного сечения $\varepsilon_{F,n}$ в последнем проходе; обжатием по толщине стенки $\varepsilon_{S,n}$ и диаметру $\varepsilon_{D,n}$ в последнем проходе. Значения $\varepsilon_{F,n}$, $\varepsilon_{S,n}$ и $\varepsilon_{D,n}$ задаются исходя из условий получения необходимых механических характеристик готовой трубы, требуемой ее точности и пр.

Для каждого промежуточного прохода определяются (исходя из технических характеристик конкретного прокатного стана и механических характеристик материала трубы) максимальное (и минимальное) возможное обжатие по площади поперечного сечения $\varepsilon_{F,\max}$; максимальное (и минимальное) возможное обжатие по толщине стенки $\varepsilon_{S,\max}$; максимальное (и минимальное) возможное обжатие по диаметру $\varepsilon_{D,\max}$.

При ограничениях в геометрических параметрах сортамента исходной заготовки режим деформации рассчитывается исходя из получения необходимой величины обжатия в последнем проходе и выходом на заданную геометрию трубы-заготовки. Расчет деформационных параметров маршрута холодной прокатки труб проводится против хода прокатки в сторону увеличения диаметра и толщины стенки трубы (рис. 1). При расчете всегда проверяется правило:

$$D_{n-1} - 2S_{n-1} > D_n - 2S_n \text{ или } d_{n-1} > d_n. \quad (1)$$

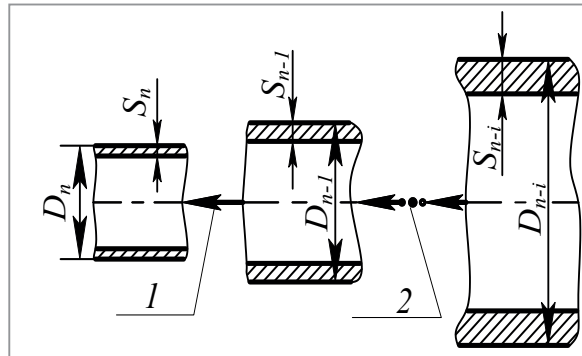


Рис. 1. Формоизменение трубы из прохода в проход при холодной прокатке на станах типа ХПТ и ХПТР:
1 – проход прокатки; 2 – *i*-е количество проходов

Обжатие по внутреннему диаметру трубы в каждом проходе ограничивают максимальной конусностью оправки (для станов типа ХПТ):

$$2\text{tg}\alpha = \frac{(D_0 - 2S_0) - (D_1 - 2S_1) - Z_{\text{диам}}}{l_{\text{зд.о}}}, \quad (2)$$

где D_0 и D_1 – диаметр трубы до и после конкретного прохода; S_0 и S_1 – толщина стенки трубы до и после конкретного прохода; $Z_{\text{диам}}$ – диаметральный зазор между внутренней стороной стенки трубы и цилиндрической частью оправки (рис. 2); $l_{\text{зд.о}}$ – длина зоны деформации оправки конкретного стана.

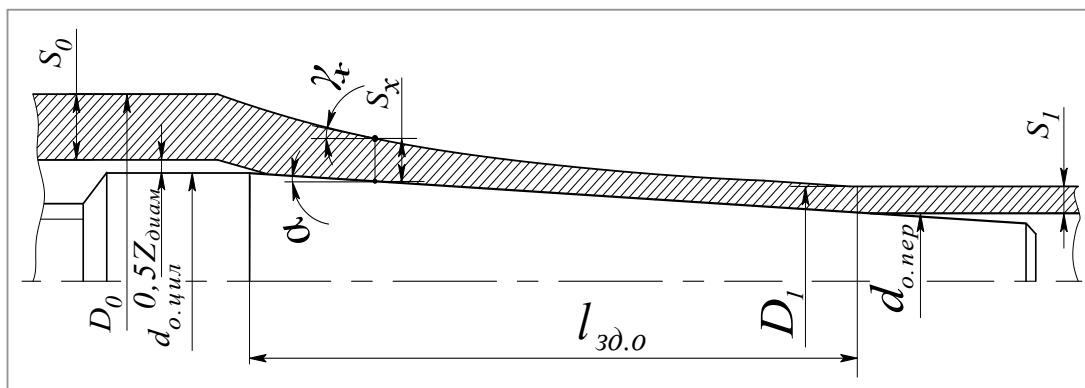


Рис. 2. Параметры конуса деформации стана типа ХПТ: $d_{o.цил}$ и $d_{o.пер}$ – диаметр оправки в цилиндрической части и пережиме; γ_x – угол наклона образующей развертки калибра в сечении x ; α – угол конусности оправки

Для каждой конкретной стали или сплава существуют ограничения по максимальной допустимой конусности оправки. При превышении этого значения применяются оправки с криволинейной образующей. Конусность конусной оправки рекомендовано выбирать в пределах $2\text{tg}\alpha = 0,005-0,03$, величину диаметрального зазора – исходя из условия, выведенного эмпирическим путем:

$$Z_{\text{диам}} \leq 0,25(D_0 - 2S_0). \quad (3)$$

Следует заметить, что при выборе оправки с криволинейной образующей начальная конусность такой оправки ($\alpha_{\text{нач}}$, рис. 3) должна быть меньше, чем значение $2\text{tg}\alpha$ для данного прохода, рассчитанного по формуле (2). С другой стороны, начальная конусность не должна быть очень маленькой. Оправка с криволинейной образующей, своей начальной конусностью, должна обеспечить настройку стана, например, для нивелировки разогрева калибра или наоборот – упругой составляющей клетки. Если начальная конусность будет недостаточна, то это усложнит настройку стана, увеличит расход оправок и др.

Учитывать оптимальную величину начальной конусности особенно важно для последних проходов, где надо получить конкретное значение толщины стенки, попадающее в допуск на готовую трубу.

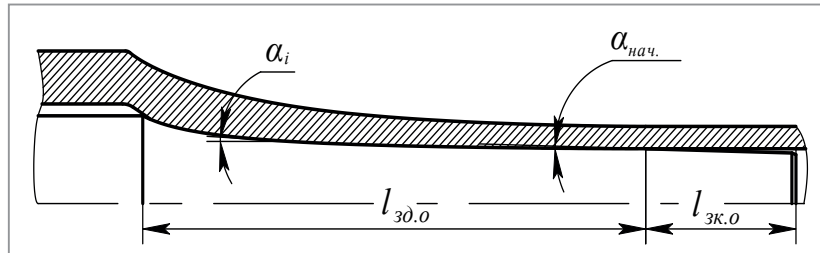


Рис. 3. Параметры конуса деформации стана типа ХПТ в случае применения оправки с криволинейной образующей: α_i – угол конусности оправки в i -м сечении; $\alpha_{нач.}$ – начальный угол конусности оправки

Во всех сечениях зоны калибровки ($l_{зк.о}$ рис. 3), как правило, конусность оправки равна $\alpha_{нач.}$. Этим обеспечивается необходимая настройка стана на внутренний диаметр (или толщину стенки).

При прокатке труб на станах ХПТ следует избегать проходов с недостаточной величиной обжатия по толщине стенки:

$$(S_0 / S_1) / (D_0 / D_1) > 0,8, \tag{4}$$

где D_0 и S_0 – диаметр трубы и толщина стенки до прохода; D_1 и S_1 – диаметр трубы и толщина стенки после прохода

или

$$d_0 < 1,25d(S_0/S_1). \tag{5}$$

На любом предприятии холодной прокатки труб стремятся снизить цикличность производства. В табл. 1 приведены данные по выбору параметров обжатия трубы в станах ХПТ и ХПТР [2–4, 6, 7]:

Таблица 1. Данные о максимально возможных обжатиях труб

Марка стали	Тип стана	$\epsilon_{F,max}$, %	$\epsilon_{S,max}$, %	μ_{max}	ΔD_{max} , мм
Углеродистые	ХПТ	90	70	4,0–5,5	21–35
	ХПТР	83	80	2,5–4,0	2–3
Легированные	ХПТ	75	62	3–4	21–35
	ХПТР	80	65	2,5–3,5	1–3

Исходя из анализа маршрутов ряда предприятий, для станов ХПТ:

$$\left(\frac{S_0}{S_1}\right) \approx 1 + \frac{k}{S_1}, \tag{6}$$

где $k_{min}=0,8$; $k_{max}=3,6$.

Из формулы (6) обжатие по толщине стенки в проходе возможно выбирать в пределах:

$$1 + \frac{0,8}{S_1} \leq \left(\frac{S_0}{S_1}\right) \leq 1 + \frac{3,6}{S_1}. \tag{7}$$

Предельная вытяжка из условий пластичности материала трубы (и с учетом результатов анализа действующих маршрутов холодной прокатки труб) выбирается из следующего условия:

$$\mu_{max} \leq 0,1\psi - 2, \tag{8}$$

где ψ – относительное сужение образца трубной заготовки, %.

Из этого максимальное обжатие по площади поперечного сечения определяется из условий пластичности:

$$\epsilon_{F,max} \leq 1 - \frac{1}{\mu_{max}} = \frac{F_0 - F_1}{F_0}. \tag{9}$$

При деформации труб на станах ХПТ уменьшается их абсолютная поперечная разностенность, а относительная может даже повышаться (особенно у тонкостенных труб) [2–4, 6–8]. Связь разностенности трубы, прокатанной на стане ХПТ, с разностенностью заготовки можно описать эмпирической зависимостью:

$$7 < \delta_0 \leq 0,9\delta \left(\frac{D_0}{D_1} + 0,1 \right) \%, \quad (10)$$

где δ_0, δ – разностенность труб-заготовок и прокатанных труб, %.

Деформация, достаточная для уменьшения исходной разностенности, в свою очередь определяется эмпирической зависимостью [2–4, 6–8]:

$$\frac{D_0}{D_1} > 1,1 \frac{\delta_0}{\delta} - 0,1. \quad (11)$$

При расчетах режимов деформации (особенно при прокатке труб из нержавеющей сталей и сплавов) желательно, чтобы соблюдалось условие:

$$\frac{\mu_S}{\mu_D} > 1, \quad (12)$$

где $\mu_S = S_0 / S_1$; $\mu_D = (D_0 - S_0) / (D_1 - S_1)$ ($\mu_D \mu_S = \mu_F$).

Иногда оно задается в виде:

$$\frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_D} > 1, \quad (13)$$

где $\varepsilon_S = (S_0 - S_1) / S_1$; $\varepsilon_D = ((D_0 - S_0) - (D_1 - S_1)) / (D_1 - S_1)$.

Общее количество проходов прокатки [2–4, 6–8]:

$$n_p = \frac{\lg \mu_\Sigma}{\lg \mu_{\max}}, \quad (14)$$

где $\mu_\Sigma = F_{\text{заг}} / F_n$ – общая вытяжка за все проходы маршрута; $F_{\text{заг}}$ – площадь поперечного сечения трубы-заготовки перед первым проходом; F_n – площадь поперечного сечения трубы после последнего прохода.

Для обеспечения необходимых механических характеристик трубы относительное обжатие по площади поперечного сечения в последнем проходе $\varepsilon_{F,n}$, а значит и вытяжка $\mu_{F,n}$. Тогда распределяют оставшуюся часть вытяжки по проходам прокатки:

$$\mu_{\Sigma i} = \frac{\mu_\Sigma}{\mu_{F,n}}. \quad (15)$$

При известном числе проходов средняя вытяжка в каждом i -м проходе:

$$\mu_{\text{ср},i} = \sqrt[n]{\mu_\Sigma}. \quad (16)$$

Если известно необходимое обжатие по площади поперечного сечения трубы в конкретном проходе и $\varepsilon_F = (F_n - F_{n-1}) / F_{n-1}$, где $F = \pi(D - S)S$, и необходимое обжатие по толщине стенки в нем $\varepsilon_S = (S_n - S_{n-1}) / S_{n-1}$, то диаметр и толщину стенки трубы перед этим проходом возможно рассчитать исходя из зависимостей, выведенных автором:

$$S_{n-1} = \frac{S_n}{1 - \varepsilon_S}, \quad (17)$$

$$D_{n-1} = \frac{\varepsilon_F \pi S_{n-1}^2 - \pi S_{n-1}^2 - F_n}{\pi S_{n-1} (\varepsilon_F - 1)}. \quad (18)$$

В конце цикла проводят поверочный расчет давления металла на валки. Для этого можно использовать формулу [2–4, 6–8]:

$$P_n = K_\sigma \sigma_{\text{в.50\%}} (D_3 + D_{\text{тр}}) \sqrt{m \mu_{\Sigma x} (S_3 - S_{\text{тр}}) R_{\text{гр.ср.}} / (l_{\text{обж}})}, \quad (19)$$

где K_σ – коэффициент, зависящий от характера упрочнения металла и равный 1,42 для черных металлов и сплавов и 1,10–1,17 для сплавов на основе меди; $\sigma_{\text{в.50\%}}$ – предел прочности металла трубы при $\sigma_{\text{в.50\%}}$, кг/мм²; $R_{\text{гр.ср.}}$ – средний радиус валка на обжимном участке:

$$R_{\text{гр.ср.}} = R_{\text{б.к.}} - 0,25(D_{\text{заг}} + D_{\text{тр}}), \quad (20)$$

где $R_{\text{б.к.}}$ – радиус бочки калибра.

На рис. 4 показана схема алгоритма расчета маршрута холодной прокатки. Исходными данными для оптимизации параметров маршрута являются (рис. 4, поз. 1): диаметр исходной трубы-заготовки ($D_{\text{заг}}$, мм); ее толщина стенки ($S_{\text{заг}}$, мм); марка стали или сплава; предел прочности при 50%-ной степени

деформации ($\sigma_{в.50\%}$, кг/мм²); относительное сужение образца трубной заготовки (ψ , %) и μ_{max} (формула 8); начальная разностенность трубы-заготовки (δ , %); максимальная расчетная величина подачи трубы (m , мм); необходимая деформация трубы по площади поперечного сечения в последнем проходе ($\epsilon_{F.n.nom}$); область необходимого отношения ϵ_s/ϵ_D ; необходимая минимальная разностенность готовой трубы.

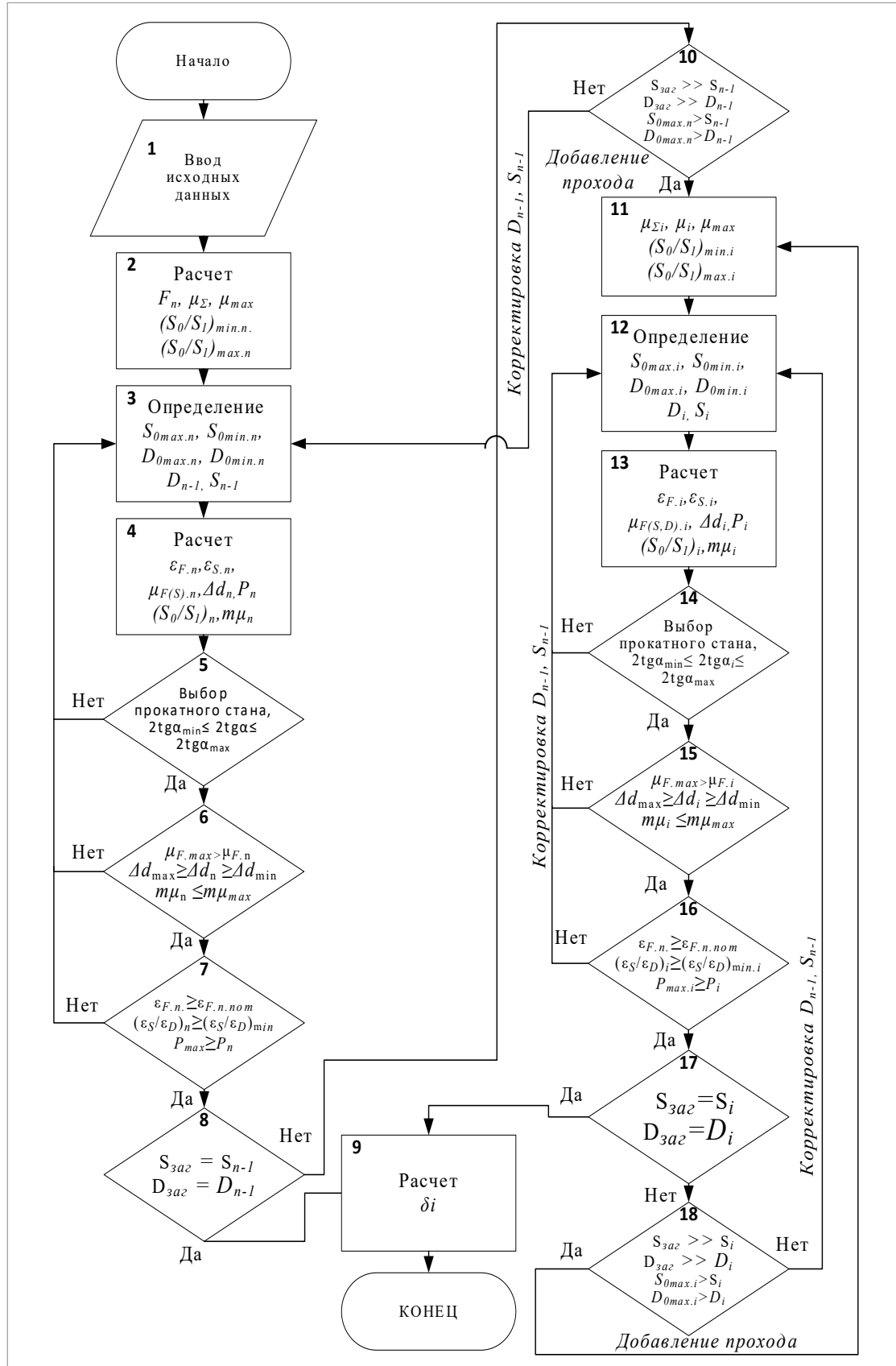


Рис. 4. Алгоритм расчета маршрута холодной прокатки труб

Исходя из алгоритма выбора исходной для каждого прохода толщины стенки и диаметра трубы-заготовки (рис. 4, поз. 2), определяют площадь поперечного сечения трубы после последнего прохода F_n , площадь исходной трубы-заготовки $F_{\text{заг}}$. Рассчитывают общую вытяжку за все проходы маршрута μ_{Σ} . По формуле (6) определяют разбег отношения S_0/S_1 для последнего прохода. Для $(S_0/S_1)_{\text{max.п}}$ и $(S_0/S_1)_{\text{min.п}}$ вычисляют $S_{0\text{max.п}}$ и $S_{0\text{min.п}}$, т.е. разбег толщины стенки трубы-заготовки перед последним проходом. По формуле (5) определяют разбег диаметра трубы-заготовки перед последним проходом: $D_{0\text{max.п}}$, $D_{0\text{min.п}}$.

В границах $S_{0\text{max.п}}$ и $S_{0\text{min.п}}$ выбирают необходимое значение $S_{0п}$ (т.е. толщину стенки трубы перед последним проходом), в границах $D_{0\text{max.п}}$ и $D_{0\text{min.п}}$ – значение $D_{0п}$ (т.е. диаметр трубы перед последним проходом). Определяем параметры деформации для последнего прохода:

- площадь поперечного сечения трубы перед последним проходом (F_{n-1});
- вытяжку по площади поперечного сечения в последнем проходе $\mu_{F,n} = F_{n-1} / F_n$;
- относительное обжатие по площади поперечного сечения $\varepsilon_{F,n} = 1 - 1/\mu_{F,n}$;
- относительное обжатие по толщине стенки $\varepsilon_{S,n}$ (формула (13));
- относительное обжатие по среднему диаметру $\varepsilon_{D,n}$ (формула (13));
- обжатие по внутреннему диаметру $\Delta d_n = (D_{0n} - 2S_{0n}) - (D_n - 2S_n)$;
- давление металла на валки P_n (формула (19));
- отношение $(\varepsilon_S/\varepsilon_D)_n$;
- линейное смещение $m\mu_{F,n}$.

Далее следует ряд проверочно-корректирующих операций. Сначала выбирают тип прокатного стана (рис. 4, поз. 5) и проверяют конусность внутренней поверхности (формула (2)):

$$2\text{tg}\alpha_{\text{min}} \leq 2\text{tg}\alpha \leq 2\text{tg}\alpha_{\text{max}} \quad (21)$$

Значения $2\text{tg}\alpha_{\text{min}}$ и $2\text{tg}\alpha_{\text{max}}$ выбирают из технической характеристики стана и технологической инструкции цеха. При необходимости проводят корректировку значений D_{0n} и S_{0n} (рис. 4, поз. 3).

Далее проверяют ограничения по величине обжатия по внутреннему диаметру (часто ограничиваются проверкой конусности):

$$\Delta d_{\text{max}} \geq \Delta d_n \geq \Delta d_{\text{min}} \quad (22)$$

Проверяют ограничения по вытяжке и линейному смещению (рис. 4, поз. 6), относительному обжатию, отношению $(\varepsilon_S/\varepsilon_D)$ и максимально возможному для выбранного прокатного стана давлению металла на валки (рис. 4, поз. 6, 7).

После проверок и корректировок значений D_{0n} и S_{0n} проверяют наличие на складе (или у поставщиков, если необходимо) заготовки с такой толщиной стенки и такого наружного диаметра (рис. 4, поз. 8). Если (с учетом принятых допусков) такая заготовка есть, то рассчитывают прогнозируемую разностенность трубы и расчет завершают. В противном случае проверяют степень отклонения геометрических параметров имеющейся заготовки от значений D_{0n} и S_{0n} . Если имеющиеся $D_{\text{заг}}$ и $S_{\text{заг}}$ незначительно больше, чем D_{0n} и S_{0n} , то проверяют возможность корректировки геометрических параметров заготовки. Если, например, возникают ограничения по P_n или $m\mu_{F,n}$, то возможно уменьшить максимальную допустимую величину подачи в проходе. При ограничениях по величине конусности оправки возможно выбрать другой прокатный стан (ХПТ-55 вместо ХПТ-32, например, если это возможно). Более длинный очаг деформации позволит уменьшить конусность оправки.

Если же $D_{\text{заг}}$ и $S_{\text{заг}}$ значительно больше, чем D_{0n} и S_{0n} , то добавляем очередной i -й проход и алгоритм расчета повторяется до достижения равенства $D_{0i} = D_{\text{заг}}$, $S_{0i} = S_{\text{заг}}$. Для этого необходимо определить оставшуюся часть вытяжки до достижения $D_{0i} = D_{\text{заг}}$, $S_{0i} = S_{\text{заг}}$ (рис. 4, поз. 11). Далее определяем оставшееся количество проходов (формула (14)) и среднюю вытяжку в каждом из них (формула (16)). Описанный цикл расчета параметров заготовки для каждого i -го прохода неизменно повторяется (рис. 4, поз. 12–18).

Выводы

При холодной прокатке труб особенно с экономической точки зрения необходимо оптимизировать количество проходов прокатки в маршруте. Поэтому проблема оптимизации деформационных параметров маршрута холодной прокатки труб является важной научно-технической задачей. Разработанный алгоритм расчета маршрута холодной прокатки труб включает в себя ряд итерационных циклов, позволяющих получить наиболее оптимальный маршрут прокатки с учетом большинства выдвигаемых в настоящее время ограничений. Ограничения по поврежденности трубы учитываются эмпирическими коэффициентами, выведенными из анализа множества удачных маршрутов прокатки. При прокатке

отдельных типов марок сталей и сплавов определенные итерационные циклы могут исключаться. Таким образом, упрощается механизм оптимизации. Алгоритм проверен расчетом ряда маршрутов прокатки труб из нержавеющей марок сталей с использованием станов ХПТ-90, ХПТ-55, ХПТ-32, КРВ-25, ХПТР 15–30.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Semin, A.N.** On steel pipes production / A.N. Semin, L.A. Kondratov // *Steel Transl.*– 2022.– № 52.– P. 1171–1180.
2. **Gugis, N.N.** Development of rolling-mill practices in Russia in 2019–2022 / N.N. Gugis // *Steel Transl.*– 2023.– № 53.– P. 154–167.
3. **Томило, В. А.** Обеспечение необходимого типа микроструктуры металла титановых и циркониевых труб / В. А. Томило, С. В. Пилипенко // *Литье и металлургия.*– 2022.– № 1.– С. 106–112.
4. **Пилипенко, С. В.** Теоретические основы холодной пильгерной прокатки труб / С. В. Пилипенко. – Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2022.– 288 с.
5. **Mishchenko, O.** Possibilities for reducing lateral difference cold rolled titanium alloy pipe / O. Mishchenko // *Metallurgical and ore mining industry.*– 2019.– № 5–6.– P. 57–66.
6. **Чечулин, Ю. Б.** Холодная прокатка труб / Ю. Б. Чечулин, А. А. Кондратов, Г. А. Орлов.– М.: Металлургиздат, 2017.– 332 с.
7. **Яковлева, К. Ю.** Современный уровень разработки и совершенствования процесса проектирования калибровок инструмента станов ХПТ / К. Ю. Яковлева, Б. В. Баричко // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.*– 2023.– № 79.– С. 496–507.
8. **Столетний, М. Ф.** Точность труб / М. Ф. Столетний, Е. Д. Клемперт.– М.: Металлургия, 1975.– 239 с.

REFERENCES

1. **Semin A.N., Kondratov L.A.** On Steel Pipes Production. *Steel Transl.*, 2022, no. 52, p. 1171–1180.
2. **Gugis N.N.** Development of rolling-mill practices in Russia in 2019–2022. *Steel Transl.*, 2023, no. 53, p. 154–167.
3. **Tomilo V.A., Pilipenko S.V.** Obespechenie neobhodimogo tipa mikrostruktury metalla titanovyh i cirkonievyyh trub [Providing the necessary type of metal microstructure of titanium and zirconium pipes]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2022, no. 1, pp. 106–112.
4. **Pilipenko S.V.** *Teoreticheskie osnovy holodnoj pil'gernoj prokatki trub* [Theoretical foundations of cold pilger rolling of pipes]. Novopolotsk, Polotsk. State University named after Euphrosyne of Polotsk Publ., 2022, 288 p.
5. **Mishchenko O.** Possibilities for reducing lateral difference cold rolled titanium alloy pipe. *Metallurgical and ore mining industry*, 2019, no. 5–6, pp. 57–66.
6. **Chechulin Yu. B., Kondratov A.A., Orlov G.A.** *Holodnaya prokatka trub* [Cold rolling of pipes]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2017, 332 p.
7. **Yakovleva K. Yu., Barichko B.V.** Sovremennyj uroven' razrabotki i sovershenstvovaniya processa proektirovaniya kalibrovok instrumenta stanov HPT [Current level of development and improvement of the process of designing tool calibrations for HPT mills]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoj i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2023, no. 79, pp. 496–507.
8. **Stoletny M.F., Klempert E.D.** *Tochnost' trub* [Pipe accuracy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975, 239 p.