



Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и Ордена  
Трудового Красного Знамени государственный технический университет  
им. Н. Э. Баумана

Факультет «Машиностроительные технологии»  
Кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Домашнее задание по курсу:  
**«Технология производства листового и сортового проката»**

Вариант 12

Выполнил

Студент

Солодянкин А. Д.

Группа

МТ10-72

Преподаватель

Жихарев П. Ю.

Дата предъявления

Дата зачёта

Подпись преподавателя

Москва, 23 декабря 2019 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Исходные данные .....	3
2	Расчёт формоизменения полосы.....	5
2.1	Расчёт параметров конечного сечения калибра .....	5
2.2	Расчёт формоизменения полосы в проходах 1 и 2.....	6
2.3	Расчёт формоизменения полосы в калибрах 3 и 4.....	9
2.4	Конечные размеры калибров .....	12
3	Расчёт энергосиловых параметров.....	15
3.1	Формулы для расчёта энергосиловых параметров .....	15
3.2	Исходные данные для расчёта в программе.....	19
3.3	Результаты расчёта энергосиловых параметров .....	20
	Список использованных источников .....	20
	Приложение А .....	25
	Приложение Б.....	28

## **1 Исходные данные**

Рассматривается участок прокатного стана, на котором осуществляется прокатка полосы в 4 прохода по заданной системе калибровки. Известен материал, температура переднего конца полосы, форма и размеры сечения на входе в первый калибр рассматриваемого участка и размеры сечения после последнего калибра, а также размеры исходной заготовки перед задачей в стан. Задан тип клетей, скорость вращения и диаметр валков, а также длина обводного аппарата линейного стана.

При проведении расчётов принять следующие допущения:

- 1 Расчет температурного режима вести по переднему концу полосы;
- 2 Потерями тепла от контакта с валками пренебречь;
- 3 Прокатка в непрерывной группе ведётся без натяжения;
- 4 В конструкции линейного стана применяются обводные аппараты;
- 5 Длина раскатных полей у реверсивной клети не более 30 м с каждой стороны;
- 6 Расстояние между клетями в непрерывной группе принять равным 3 м.
- 7 Длину пути полосы по обводному аппарату принять равной 4 м.

Требуется:

- 1 рассчитать формоизменение металла при прокатке за 4 прохода: определить коэффициенты вытяжки и обжатия, абсолютные обжатия и степень деформации (результат представить в виде диаграмм);
- 2 рассчитать основные размеры калибров и их элементов, достаточные для их построения (результат представить в виде таблицы);
- 3 рассчитать скоростной режим прокатки: определить скорости входа и выхода полосы из валков, скорость деформации, длину полосы на всех рассматриваемых участках, машинное время (результат представить в виде таблиц);
- 4 рассчитать температурный режим прокатки: определить сопротивление деформации по проходам, а также изменение температуры полосы на

всех рассматриваемых участках (результаты представить в виде таблиц или диаграмм);

5 рассчитать среднее контактное давление, силу и момента прокатки (результаты расчета представить в виде диаграмм). Также в виде таблицы представить результаты расчета коэффициентов, используемых для расчета среднего контактного давления.

Исходная заготовка имеет квадратное сечение. Сторона  $c = 90$  мм. Длина  $l = 1.5$  м. Начальное сечение: круг с диаметром 38 мм. Конечное сечение: квадрат со стороной  $C_0 = 20$  мм. Схема деформации: овал—круг—oval—диагональный квадрат. Тип стана — линейная группа. Материал — 12Х18Н9Т. Диаметр валков — 300 мм. Скорость вращения валков — 230 об/мин. Температура переднего края полосы —  $1020^\circ\text{C}$ .

## 2 Расчёт формоизменения полосы

Схема деформации представлена на рис. 2.1. Так как расчёт будет вестись с конца, то принята обратная нумерация калибров.

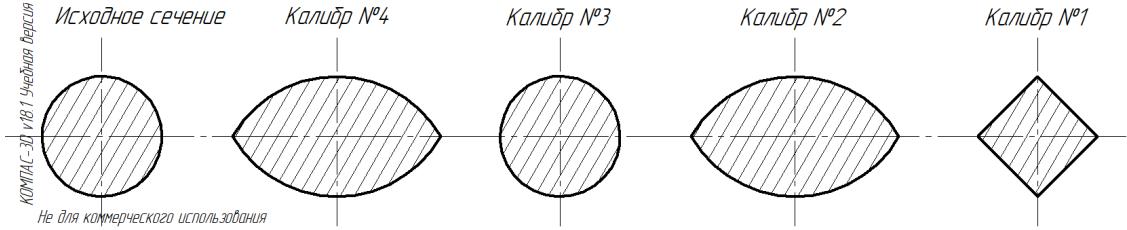


Рисунок 2.1 — Схема деформации полосы

### 2.1 Расчёт параметров конечного сечения калибра

Так как полоса катается при значительной температуре, то необходимо учитывать тепловое расширение металла. Тогда размер конечного профиля с учётом нагрева:

$$C \approx 1.014C_0 = 1.014 \cdot 20 = 20.28 \text{ мм}$$

Тогда площадь чистовой заготовки:

$$F_{\text{k}} = C^2 = 411.278 \text{ мм}^2$$

Размеры калибра рассчитываются по формулам, представленным в [1]

$$H'_1 = B_{\text{k}} = \sqrt{2}C_1 = \sqrt{2} \cdot 20.28 = 28.68 \text{ мм}$$

$$r \cong (0.1 \dots 0.2) \cdot C_1 = (0.1 \dots 0.2) \cdot 20.28 = 2.028 \dots 4.056 \approx 3 \text{ мм}$$

$$H_1 = \sqrt{2}C_1 - 0.83 \cdot r = \sqrt{2} \cdot 20.28 - 0.83 \cdot 3 = 26.190 \text{ мм}$$

$$B_{\text{пп}} = B_{\text{k}} - S \tag{2.1}$$

Где  $S$  — величина межвалкового зазора, определяется согласно рекомендациям [1]. Учитывая размеры и заданный тип стана:

$$S = (0.005 \dots 0.008)D = (0.005 \dots 0.008) \cdot 300 = (1.5 \dots 2.4) \approx 2 \text{ мм}$$

Тогда из уравнения 2.1:

$$B_{\text{вр}} = 28.68 - 2 = 26.68 \text{ мм}$$

$$r_1 \cong (0.10 \dots 0.15)H'_1 = (0.10 \dots 0.15) \cdot 28.68 = (2.868 \dots 4.302) = 3 \text{ мм}$$

$$\Pi \approx 2H_1\sqrt{2} = 2 \cdot 26.190 \cdot \sqrt{2} = 74.077 \text{ мм}$$

Глубина вреза в валки:

$$H_{\text{вр}} = \frac{H'_1 - s}{2} = \frac{28.68 - 2}{2} = 13.34 \text{ мм}$$

## 2.2 Расчёт формоизменения полосы в проходах 1 и 2

Площадь исходного сечения:

$$F_{\text{исх}} = \frac{\pi d_{\text{k}}^2}{4} = \frac{3.1415 \cdot 38^2}{4} = 1134.082 \text{ мм}^2$$

Периметр исходного сечения:

$$\Pi_{\text{исх}} = \pi d = 3.1415 \cdot 38 = 119.377$$

Тогда суммарный коэффициент вытяжки:

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{F_{\text{исх}}}{F_{\text{k}}} = \frac{1134.082}{411.278} = 2.757$$

Средний коэффициент вытяжки за один проход:

$$\lambda_{\text{cp}} = \sqrt[4]{\lambda_{\Sigma}} = \sqrt[4]{2.757} = 1.289$$

Рассмотрим последние 2 прохода. Прокатка в них осуществляется по схеме круг–овал–диагональный квадрат. Принимая коэффициент вытяжки примерно одинаковым в каждом проходе, определим суммарный коэффициент вытяжки за 2 прохода:

$$\lambda_{1-2} = \lambda_{\text{cp}}^2 = 1.289^2 = 1.662$$

Приведённый диаметр валков  $A_1$ :

$$A_1 = \frac{D - H_1}{H_1} = \frac{300 - 26.19}{26.19} = 10.455$$

Воспользуемся номограммой П15(рис. 2.2) в [1] и определим отношение сторон  $a_2$  овального калибра, которое будет равно  $a_2 = 1.7$ . Далее, воспользовавшись номограммой П13(рис. 2.3) определим коэффициент обжатия и фактический коэффициент вытяжки в квадратном калибре. Получим:

$$\frac{1}{\eta_1} = 1.25; \lambda_1 = 1.23$$

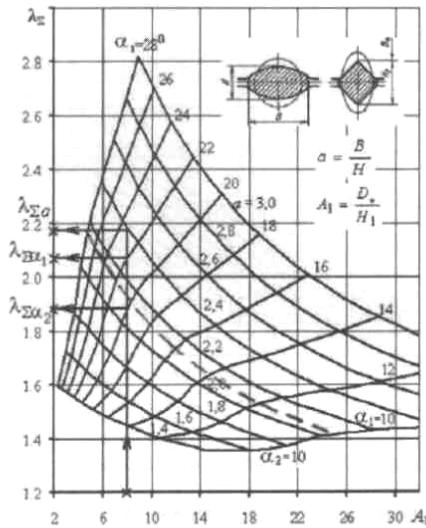


Рисунок 2.2 — Номограмма П15 для определения суммарного коэффициента вытяжки  $\lambda_\Sigma$  при прокатке по схеме круг–овал–квадрат

Тогда коэффициент вытяжки в овальном калибре будет равен:

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_{1-2}}{\lambda_1} = \frac{1.662}{1.23} = 1.351$$

Отсюда площадь полосы на входе в чистовой калибр:

$$F_2 = F_1 \cdot \lambda_1 = 411.278 \cdot 1.23 = 505.872 \text{ мм}^2$$

$$B_2 = \frac{1}{\eta_1} \cdot H_1 = 1.25 \cdot 26.190 = 32.738 \text{ мм}$$

Степень заполнения овального калибра примем  $\delta_2 = 0.85$ , отношение осей  $a_{k2}$  примем равным отношению осей полосы  $a_{k2} = 1.7$

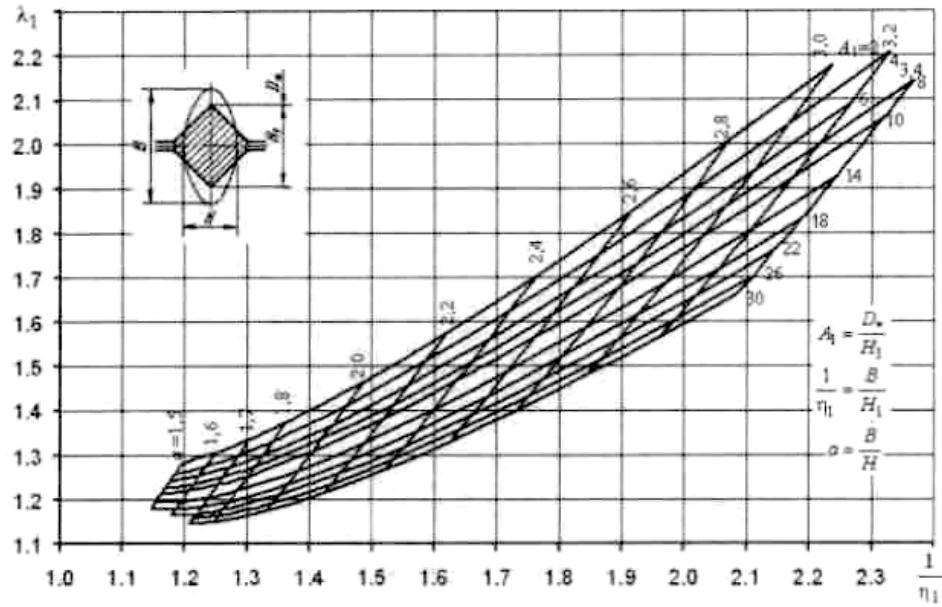


Рисунок 2.3 — Номограмма П13

Тогда, согласно [1] высота овальной полосы составит:

$$H_2 = \sqrt{\frac{F_2}{0.6(2.07 - \delta_2)(a_k\delta_2 + 0.66\delta_2 - 0.43)}}$$

$$H_2 = \sqrt{\frac{505.872}{0.6(2.07 - 0.85)(1.7 \cdot 0.85 + 0.66 \cdot 0.85 - 0.43)}} = 20.94 \text{ мм}$$

Характеристики калибра расчитываются по формулам:

$$R = H_2 \frac{(1 + a_k)^2}{4}; \quad (2.2)$$

$$B_k = H_2 \sqrt{\frac{4R}{H_2} - 1}; \quad (2.3)$$

$$B_{bp} = (H_2 - S) \sqrt{\frac{4R}{H_2 - S} - 1}; \quad (2.4)$$

$$r_1 = (0.10 \dots 0.40) \cdot H_2; \quad (2.5)$$

$$\Pi \cong 2 \sqrt{B_1^2 + \frac{4}{3}H_2^2}; \quad (2.6)$$

$$R = 20.94 \cdot \frac{(1 + 1.7)^2}{4} = 38.163 \text{ мм}$$

$$B_{\text{к}} = 20.94 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 38.163}{20.94} - 1} = 52.517 \text{ мм}$$

$$B_{\text{вр}} = (20.94 - 2) \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 38.163}{20.94 - 2} - 1} = 50.324 \text{ мм}$$

$$r_1 = (0.10 \dots 0.40) \cdot 20.94 = (2.094 \dots 8.376) \approx 5 \text{ мм}$$

$$\Pi \cong 2 \cdot \sqrt{52.517^2 + \frac{4}{3} \cdot 20.94^2} = 115.632 \text{ мм}$$

### 2.3 Расчёт формоизменения полосы в калибрах 3 и 4

Площадь круглой полосы, выходящей из калибра №3, будет равна:

$$F_3 = F_1 \cdot \lambda_{1-2} = 411.278 \cdot 1.662 = 683.544 \text{ мм}^2$$

Примем  $\delta_3 = 0.85$ . Тогда:

$$\begin{aligned} H_3 &= \sqrt{\frac{F_3}{0.785 - 0.667(1 - \delta_3)\sqrt{1 - \delta_3^2}}} = \\ &= \sqrt{\frac{683.544}{0.785 - 0.667 \cdot (1 - 0.85)\sqrt{1 - 0.85^2}}} = 30.552 \text{ мм} \end{aligned}$$

Характеристики калибра расчитываются по формулам:

$$B_{\text{к}} = \frac{D}{\cos(\gamma)}; \quad (2.7)$$

$$B_{\text{вр}} = B_{\text{к}} - S \tan(\gamma); \quad (2.8)$$

$$r_1(0.08 \dots 0.10)D; \quad (2.9)$$

$$\Pi = \pi D; \quad (2.10)$$

$$H_{\text{вр}} = \frac{H_1 - S}{2} \quad (2.11)$$

Где  $\gamma$  — угол развала калибра. Так как диаметр круга  $d = 30.552$ , то:

$$\gamma = 21^\circ 50'$$

Тогда из уравнений 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11:

$$B_{\text{к}} = \frac{30.552}{\cos(21^\circ 50')} = 32.913 \text{ мм}$$

$$B_{\text{вр}} = 32.913 - 2 \cdot \tan(21^\circ 50') = 32.112 \text{ мм}$$

$$r_1 = (0.08 \dots 0.10) = 2.444 \dots 3.055 \approx 3 \text{ мм}$$

$$\Pi = 3.1415 \cdot 30.552 = 95.979 \text{ мм}$$

$$H_{\text{вр}} = \frac{30.552 - 2}{2} = 14.276 \text{ мм}$$

Коэффициент обжатия в проходе №2 равен:

$$\frac{1}{\eta_2} = \frac{30.552}{20.94} = 1.459$$

Рассмотрим оставшиеся 2 прохода. Прокатка в них ведётся по схеме круг —oval —круг. Суммарный коэффициент вытяжки в проходах № 3 и 4 равен коэффициенту вытяжки в проходах 1 и 2:

$$\lambda_{3-4} = \lambda_{1-2} = 1.662$$

Приведённый диаметр валков  $A_3$ :

$$A_3 = \frac{D - H_3}{H_3} = \frac{300 - 30.552}{30.552} = 8.819$$

Воспользуемся номограммой П24(рис. 2.4) и определим отношение сторон овального калибра  $a_4 = 1.7$ . Далее, воспользовавшись номограммой П25 (рис. 2.5) и определим коэффициент обжатия и коэффициент вытяжки в овальном калибре. Получим:

$$\lambda_3 = 1.35; \frac{1}{\eta_3} = 1.48$$

Отсюда коэффициент обжатия в круглом калибре:

$$\lambda_4 = \frac{\lambda_{3-4}}{\lambda_3} = \frac{1.662}{1.35} = 1.231$$

Площадь полосы на выходе из калибра №4:

$$F_4 = F_3 \cdot \lambda_3 = 683.544 \cdot 1.35 = 922.784$$

$$B_4 = H_3 \cdot \frac{1}{\eta_3} = 30.552 \cdot 1.48 = 45.217 \text{ мм}$$

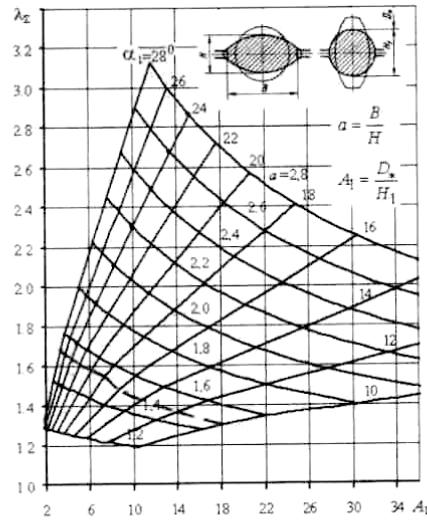


Рисунок 2.4 — Номограмма П24 для определения суммарного коэффициента вытяжки  $\lambda_{\Sigma}$  при прокатке по схеме круг–овал–круг

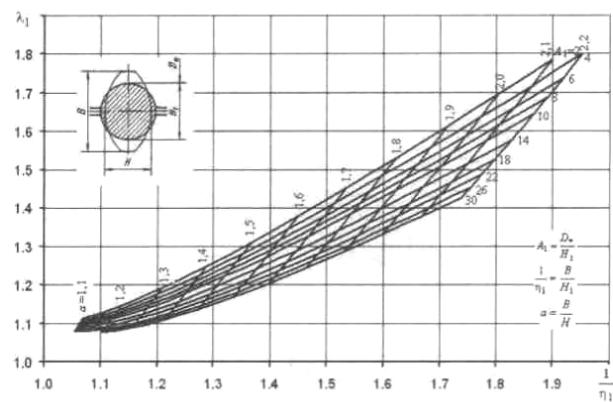


Рисунок 2.5 — Номограмма П25 для определения коэффициента обжатия  $\frac{1}{\eta_1}$  и коэффициента вытяжки  $\lambda_1$  при прокатке овального раската — в круглом калибре

Примем степень заполнения калибра  $\delta_4 = 0.85$ , отношение сторон  $a_{k4} = 1.7$ . Тогда:

Высота полосы на выходе из калибра №4:

$$H_4 = \sqrt{\frac{F_4}{0.6(2.07 - \delta_4)(a_k\delta_4 + 0.66\delta_4 - 0.43)}}$$

$$H_4 = \sqrt{\frac{922.784}{0.6(2.07 - 0.85)(1.7 \cdot 0.85 + 0.66 \cdot 0.85 - 0.43)}} = 28.282 \text{ мм}$$

Коэффициент обжатия в калибре №4:

$$\frac{1}{\eta_4} = \frac{d_0}{H_4} = \frac{38}{28.282} = 1.343$$

Параметры калибра рассчитываются по формулам 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6:

$$R = 28.282 \cdot \frac{(1 + 1.7)^2}{4} = 51.544 \text{ мм}$$

$$B_k = 28.282 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 51.544}{28.282} - 1} = 70.939 \text{ мм}$$

$$B_{vp} = (28.282 - 2) \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 51.544}{28.282 - 2} - 1} = 68.760 \text{ мм}$$

$$r_1 = (0.10 \dots 0.40) \cdot 28.282 = 2.828 \dots 11.313 = 8 \text{ мм}$$

$$\Pi \cong 2 \sqrt{70.939^2 + \frac{4}{3} \cdot 28.282^2} = 156.190 \text{ мм}$$

## 2.4 Конечные размеры калибров

Результаты расчёта размеров калибров представлены в табл. 2.1.

Коэффициенты вытяжки и обжатия по проходам представлены на рис.

2.6.

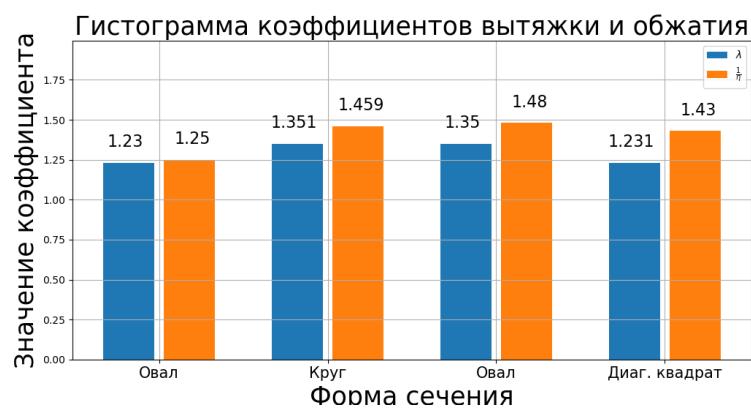


Рисунок 2.6 — Значения коэффициентов вытяжки и обжатия по проходам

Таблица 2.1 — Формоизменение полосы и размеры калибров

Параметр	Исходное сечение	Калибр №4	Калибр №3	Калибр №2	Калибр №1
Форма прохода	Круг	Овал	Круг	Овал	Диагональный квадрат
$H_1$ , мм	38	28.282	30.552	20.94	26.190
$H'_1$ , мм	-	-	-	-	28.68
$B_1$ , мм	38	45.217	30.552	32.738	26.190
$B_k$ , мм	-	70.939	32.913	52.517	28.68
$B_{\text{вр}}$ , мм	-	68.760	32.112	50.324	26.68
$r_1$ , мм	-	8	3	5	3
$r$ , мм	-	3	-	-	3
$H_{\text{вр}}$ , мм	-	-	14.276	-	13.34
$R$ , мм	-	51.544	-	38.163	-
$\Pi$ , мм	-	156.190	95.979	115.632	74.077
$\frac{1}{\eta}$	-	1.343	1.48	1.459	1.25
$\lambda$	-	1.231	1.35	1.351	1.23

### 3 Расчёт энергосиловых параметров

#### 3.1 Формулы для расчёта энергосиловых параметров

Длина исходной заготовки:

$$l_0 = 1.5 \cdot \frac{90^2}{\pi \frac{38^2}{4}} = 10.713 \text{ м}$$

Приведённая высота полосы расчитывается по формуле:

$$\Delta h^{\text{пр}} = \frac{F_i}{B_i} \quad (3.1)$$

Абсолютное обжатие расчитывается по формуле:

$$\Delta h^{\text{пр}} = h_0^{\text{пр}} - h_1^{\text{пр}} \quad (3.2)$$

Относительная деформация расчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h^{\text{пр}}}{h_0^{\text{пр}}} \quad (3.3)$$

Катающий радиус валков расчитываются по формуле:

$$R_{\text{кат}i} = \frac{D - \frac{F_i}{B_i}}{2}$$

Длина дуги контакта расчитывается по формуле:

$$l = \sqrt{R_{\text{кат}} \Delta h^{\text{пр}}} \quad (3.4)$$

При прокатке на линейном стане скорость выхода полосы из калибра определяется скоростью вращения валков. Скорость входа полосы определяется коэффициентом вытяжки(опережением и отставанием пренебрегаем):

$$v_{\text{вых}} = \frac{\pi D_{\text{ки}} n}{60}$$

$$v_{\text{вх}i} = \frac{v_{\text{вых}i}}{\lambda_i}$$

Скорость деформации расчитывается по формуле:

$$u = \frac{v \cdot \varepsilon \cdot 1000}{l} \quad (3.5)$$

Сопротивление деформации методом термомеханических коэффициентов:

$$\sigma_\phi = A_1 A_2 A_3 \sigma_{\text{од}} e^{-m_1 t} \varepsilon^{m_2} u^{m_3} \quad (3.6)$$

Для стали 12Х18Н9Т:

$$A_1 A_2 A_3 \sigma_{\text{од}} = 3250 \text{ МПа}; m_1 = 0.0028; m_2 = 0.28; m_3 = 0.087$$

Коэффициент трения по формуле Экелунда с поправками Б. П. Бахтинова и М. М. Штернова:

$$\mu_{\text{уст}} = 0.6 k_1 k_2 k_3 (1.05 - 0.0005 T) \quad (3.7)$$

Так как материал валков — чугун, то

$$k_1 = 0.8$$

$$k_2 = \begin{cases} 1, & v \leq 3 \\ 1.53v^{-0.467}, & v > 3 \end{cases}$$

Для стали 12Х18Н9Т

$$k_3 = 1.47$$

Уширение расчитывается по формуле:

$$\Delta B = B_1 - B_0 \quad (3.8)$$

Среднее контактное давление определяется по формуле:

$$p_{\text{cp}} = \gamma n'_\sigma n''_\sigma n'''_\sigma n_{\text{в}} n_{\text{k}} \sigma_\phi \quad (3.9)$$

Где:

$$\gamma = \begin{cases} 1.155, & \frac{b_{\text{cp}}}{h_{\text{cp}}} > \frac{0.465}{\mu_{\text{уст}}} \\ 1 + \frac{\mu_{\text{уст}}}{3} \frac{b_{\text{cp}}}{h_{\text{cp}}}, & \frac{b_{\text{cp}}}{h_{\text{cp}}} < \frac{0.465}{\mu_{\text{уст}}} \end{cases}$$

$$n'_\sigma = \begin{cases} 1 + \frac{l}{4h_{cp}} & , \frac{l}{h_{cp}} > 4 \\ \frac{2h_H}{\Delta h \delta} \left[ \left( \frac{h_H}{h_1^{np}} \right)^\delta - 1 \right] & , 2 < \frac{l}{h_{cp}} < 4 \\ 1 + \frac{l}{6h_{cp}} & , 1 < \frac{l}{h_{cp}} < 2 \end{cases}$$

При этом:

$$\frac{h_H}{h_1^{np}} = \left( \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left( \frac{h_0^{np}}{h_1^{np}} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right)^{\frac{1}{\delta}}$$

$$\delta = \frac{2\mu_{yct}l}{\Delta h^{np}}$$

$$n''_\sigma = \begin{cases} 1 & , \frac{l}{h_{cp}} > 1 \\ \left( \frac{l}{h_{cp}} \right)^{-0.4} & , \frac{l}{h_{cp}} < 1 \end{cases}$$

$n'''_\sigma = 1$ , так как натяжение отсутствует

$$n_B = \frac{1 + \frac{3b_{cp} - l}{6b_{cp}} \cdot \mu \frac{l}{h_{cp}}}{1 + \frac{\mu}{2} \frac{l}{h_{cp}}}$$

$$n_K = \frac{1.155 \left( 1 + \frac{2\mu_{yct}\alpha l}{3h_{cp}\pi} \right)}{\gamma \left( 1 + \frac{\mu}{3} \frac{l}{h_{cp}} \right)}$$

Тогда усилия при прокатке:

$$P = p_{cp} F_k \quad (3.10)$$

Где

$$F_{\text{к}} = b_{\text{cp}} l$$

Момент при прокатке определяется следующим выражением:

$$M = 2P\psi l \quad (3.11)$$

Где  $\psi$  — коэффициент плеча,

$$\psi = \begin{cases} \frac{1}{2-\varepsilon} \left( 1 - \varepsilon \left( \frac{l^m}{l^m - 1} - \frac{1}{m} \right) \right), & m \geq 0.5 \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon}{2}} \left( 1 - \varepsilon \cdot \frac{1+m}{2+m} \right), & m < 0.5 \end{cases} \quad (3.12)$$

При этом:

$$m = \frac{\mu_{\text{уст}} l}{h_{\text{cp}}^{\text{пп}}} \quad (3.13)$$

При горячей прокатке в металле практически нет деформационного упрочнения из-за рекристаллизации, поэтому вся работа деформации превращается в тепло. Температура полосы после клети определяется следующим образом:

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{вх}}^i + \Delta T_{\text{д}}^i - \Delta T_{\text{в}}^i - \Delta T_{\text{л}}^i - \Delta T_{\text{к}}^i \quad (3.14)$$

Где  $\Delta T_{\text{д}}^i$  — повышение температуры полосы за счет пластической деформации,

$$\Delta T_{\text{д}} = \frac{p_{\text{cp}} \cdot \ln \left( \frac{h_0}{h_1} \right) \eta}{c \rho} \quad (3.15)$$

Здесь  $c = 548 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^\circ \text{C}}$  — теплоёмкость стали,  $\rho = 7900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  — плотность стали при заданной температуре,  $\eta = 0.8$  — потери тепла в окружающую среду.

$\Delta T_{\text{в}}$  — охлаждение полосы за счёт контакта с валками,

$$\Delta T_{\text{в}} = \frac{4.87}{h_0 + h_1} (T_{\text{вх}} - T_{\text{пп}}) \sqrt{\frac{2lh_0}{10^3 (h_0 + h_1) v}} \quad (3.16)$$

Здесь  $T_{\text{цв}}$  — температура центра валков. Примем  $T_{\text{цв}} = 50^{\circ}\text{C}$ .

$\Delta T_{\text{л}}$  — охлаждение полосы за счет лучеиспускания при перемещении ее между клетями,

$$\Delta T_{\text{л}} = k_{\text{ст}} \frac{T_i^4}{h_1^{\text{пр}}} \tau_{\text{мк}} \cdot 10^{-12} \quad (3.17)$$

Здесь  $k_{\text{ст}} = 17.5$  — коэффициент, зависящий от марки сталей,  $T_i = T_{\text{вх}} + \Delta T_{\text{д}} - \Delta T_{\text{в}}$  — Температура полосы непосредственно на выходе из валков после  $i$ -го прохода,  $^{\circ}\text{K}$ .

$\tau_{\text{мк}}$  — время прохождения полосы в межклетевом промежутке.

Длина обводного аппарата по условию задания 4 м. После выхода из клети полоса движется до следующей клети по обводному аппарату со скоростью выхода из калибров. Так как скорость входа полосы в следующую клеть меньше, чем скорость входящей полосы, то обводной аппарат раскрывается, и начинает формироваться петля. После раскрытия обводного аппарата оставшаяся часть полосы входит в следующую клеть со скоростью входа, определяемой частотой вращения валков и коэффициентом вытяжки в калибре.

Время движения по обводному аппарату составит:

$$\tau_{OA} = \frac{l_{OA}}{v_{\text{вых}}}$$

Время нахождения оставшейся части полосы между клетями:

$$\tau_{xvi} = \frac{l_i - l_{OA}}{v_{\text{вх}i-1}}$$

$\Delta T_{\text{k}}$  — охлаждение полосы за счёт конвекции,

$$\Delta T_{\text{k}} = 0.03 \Delta T_{\text{л}} \quad (3.18)$$

Расчёт будем вести в программе `tplsp.py`. Текст программы приведён в приложениях А, Б.

### 3.2 Исходные данные для расчёта в программе

$$F_0 = 1134.082; B_0 = 38$$

$$F_4 = 922.784; B'_4 = 45.217; B_4 = 28.282$$

$$F_3 = 683.544; B_3 = 30.552$$

$$F_2 = 505.872 B'_2 = 32.738; B_2 = 20.94$$

$$F_1 = 411.278 B_1 = 26.190$$

$$D_{\text{в}} = 300$$

$$T_0 = 1020$$

$$l_{\text{мк}} = 4000$$

$$n = 230$$

$$\lambda_4 = 1.231; \lambda_3 = 1.35; \lambda_2 = 1.351; \lambda_1 = 1.23$$

$$l_0 = 10713$$

### 3.3 Результаты расчёта энергосиловых параметров

Результаты расчёта представлены в табл. 3.1.

Гистограмма абсолютного обжатия полосы представлена на рис. 3.1.

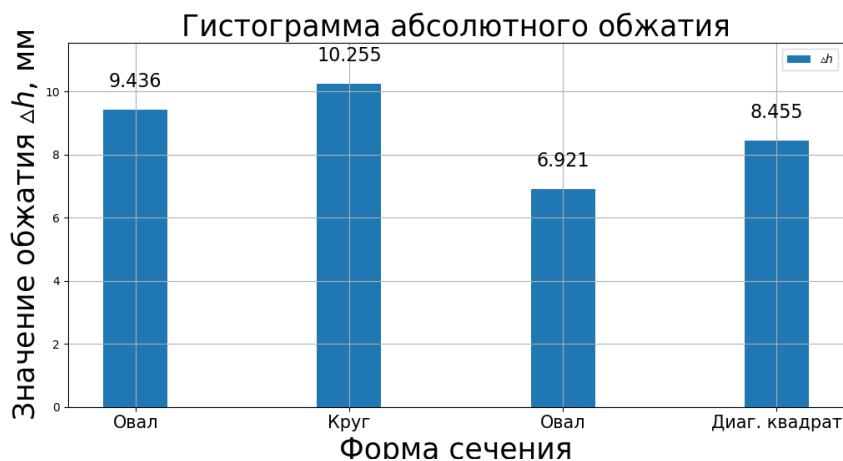


Рисунок 3.1 — Абсолютное обжатие полосы по проходам

Гистограмма относительной деформации представлена на рис. 3.2.

Гистограмма среднего контактного давления по проходам представлена на рис. 3.3.

Гистограмма силы прокатки представлена на рис. 3.4.

Гистограмма момента прокатки представлена на рис. 3.5.

[ ]

Таблица 3.1 — Результаты расчёта программы `tplsp.py`

Параметр	Калибр № 4	Калибр № 3	Калибр №2	Калибр №1
$\Delta h$ , мм	9.436	10.255	6.921	8.455
$\varepsilon$	0.316	0.314	0.309	0.35
$l$ , мм	36.32	37.729	31.38	34.667
$u, \frac{1}{c}$	29.311	27.851	33.78	34.562
$\sigma_\phi$ , МПа	181.616	183.925	190.953	210.884
$\mu_{\text{уст}}$	0.331	0.334	0.333	0.34
$\Delta b$ , мм	7.217	2.27	2.186	5.25
$b_{\text{cp}}$ , мм	41.608	29.417	31.645	23.565
$p_{\text{cp}}$ , МПа	231.272	226.629	244.057	259.438
$P_{\text{пр}}$ , кН	349.507	251.532	242.35	211.942
$M_{\text{пр}}$ , кН·мм	8.096	8.253	10.842	13.008
$l_{\text{вых}}$ , мм	13187.703	17803.399	24052.392	29584.442
$T_{\text{вых}}$ , °C	1013.3	1004.318	981.907	964.71
$\Delta T_{\text{д}}$ , °C	16.243	15.801	16.692	20.65
$\Delta T_{\text{в}}$ , °C	10.641	9.87	12.788	12.613
$\Delta T_{\text{л}}$ , °C	11.944	14.479	25.548	24.499
$\Delta T_{\text{k}}$ , °C	0.358	0.434	0.766	0.735
$\tau$	4.898	6.639	8.372	8.641
$v_{\text{вх}}$	2.735	2.477	2.536	2.783
$v_{\text{вых}}$	3.367	3.343	3.427	3.424

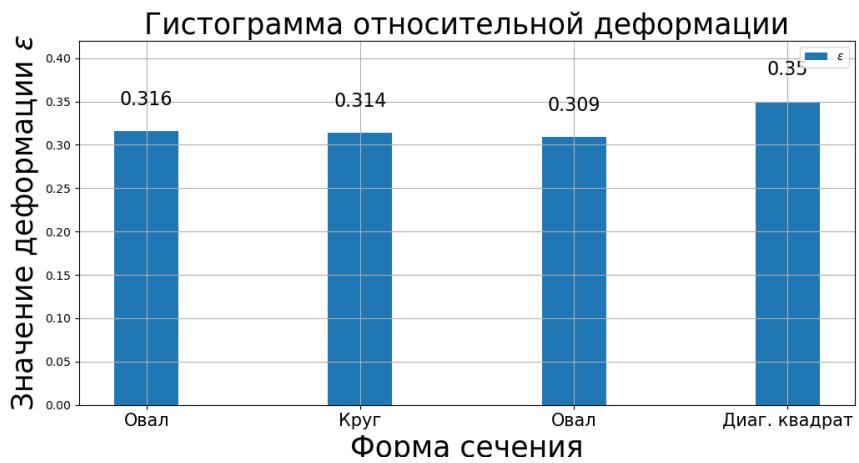


Рисунок 3.2 — Относительная деформация по проходам

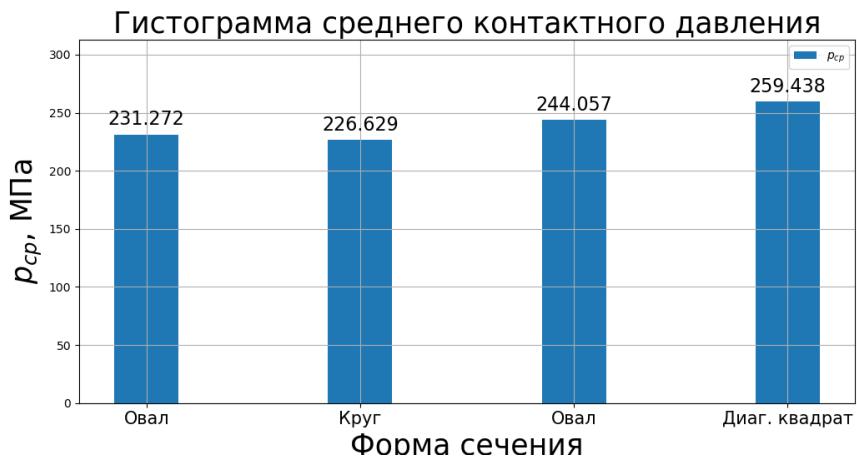


Рисунок 3.3 — Среднее контактное давление по проходам

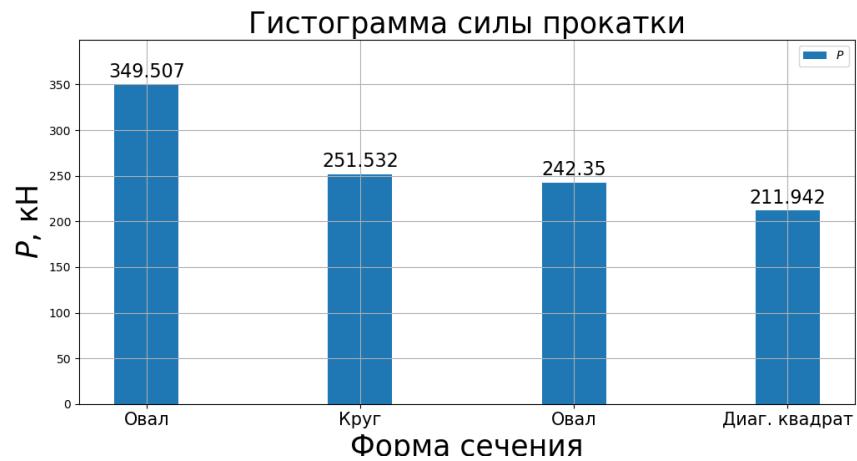


Рисунок 3.4 — Сила прокатки по проходам

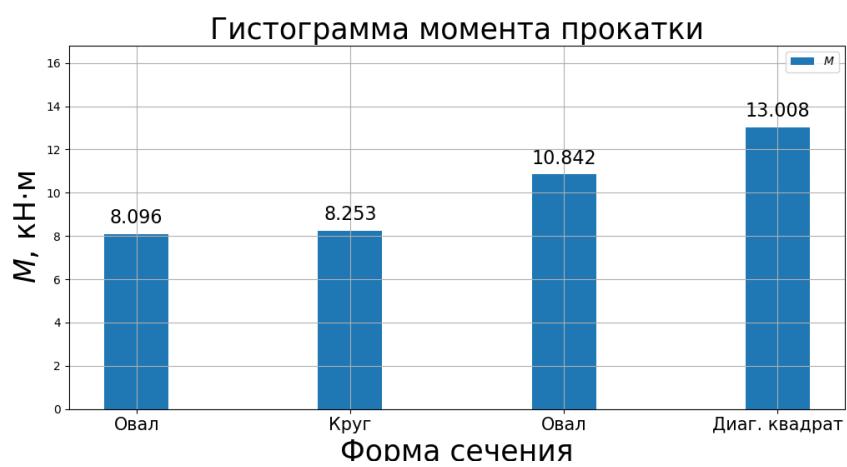


Рисунок 3.5 — Момент прокатки по проходам

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- [1] К. Смирнов В., А. Шилов В., В. Инатович Ю. Калибровка прокатных валков. «Теплотехник», 2010.
- [2] С. Никитин Г. Теория непрерывной продольной прокатки. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
- [3] Никитин Г.С., Восканьянц А. А., Крюков К. А. Расчёт энергосиловых параметров при горячей прокатке в непрерывной группе сортового стана: метод. указания. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010.
- [4] Теория прокатки. Справочник / Целиков А. И., Томленов А. Д., Зюзин В. И. [и др.]; под ред. Целиков А. И. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1982.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Текст программы `tplsp.py`

```
1. from rolling_stand import Stand, LetStripStand
2.
3. F_4, F_3, F_2, F_1, F_0 = 922.784, 683.544, 505.872,
411.278, 1134.082
4. B_4, B_4_sht, B_3, B_2, B_2_sht, B_1, B_0 = 28.282,
45.217, 30.552, 32.738, 20.94, 26.19, 38
5. D_val, T_0, l_mk, n, = 300, 1020, 4000, 230
6. lambda_4, lambda_3, lambda_2, lambda_1 = 1.231, 1.35
, 1.351, 1.23
7. l_0 = 10_713
8. #-----вычисляем скорости прокатки-----
---
9. caliber_4 = LetStripStand(F_0, F_4, B_0, B_4_sht, D_
val, T_0, l_mk, n, lambda_4, l_0, 1)
10. caliber_3 = LetStripStand(F_4, F_3, B_4, B_3, D_val
, T_0, l_mk, n, lambda_3, l_0, 1)
11. caliber_2 = LetStripStand(F_3, F_2, B_3, B_2, D_val
, T_0, l_mk, n, lambda_2, l_0, 1)
12. caliber_1 = LetStripStand(F_2, F_1, B_2_sht, B_1, D_
val, T_0, l_mk, n, lambda_1, l_0, 1)
13. #caliber_4.computing()
14. #caliber_3.computing()
15. #caliber_2.computing()
16. #caliber_1.computing()
17.
18. #-----вычисляем параметры прокатки-----
-----
```

```

19. caliber_4 = LetStripStand(F_0, F_4, B_0, B_4_sht, D
 _val, T_0, l_mk, n, lambda_4, l_0, caliber_3.v_vh)

20. caliber_4.computing()
21. caliber_3 = LetStripStand(F_4, F_3, B_4, B_3, D_val
 , caliber_4.params[r'$T_{\text{вых}}$', $^{\circ}C$], l
 _mk, n, lambda_3, caliber_4.params[r'$l_{\text{вых}}$', "
мм"], caliber_2.v_vh)
22. caliber_3.computing()
23. caliber_2 = LetStripStand(F_3, F_2, B_3, B_2, D_val
 , caliber_3.params[r'$T_{\text{вых}}$', $^{\circ}C$], l
 _mk, n, lambda_2, caliber_3.params[r'$l_{\text{вых}}$', "
мм"], caliber_1.v_vh)
24. caliber_2.computing()
25. caliber_1 = LetStripStand(F_2, F_1, B_2_sht, B_1, D
 _val, caliber_2.params[r'$T_{\text{вых}}$', $^{\circ}C$]
 , l_mk, n, lambda_1, caliber_2.params[r'$l_{\text{вых}}$'
 , "мм"], caliber_1.v)
26. caliber_1.computing()
27.
28. ans = []
29. for key in caliber_4.params.keys():
30.     tt = [key, round(caliber_4.params[key], 3), rou
nd(caliber_3.params[key], 3), round(caliber_2.params[ke
y], 3), round(caliber_1.params[key], 3)]
31.     ans.append(tt)
32.
33. ans = [['Параметр', 'Калибр № 4', 'Калибр № 3', 'Ka
либр №2', 'Калибр №1']] + ans
34. for i in ans:
35.     print(*i, sep=' & ', end='\\\\\\n\\\\hline\\n')

```

36.

37.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Текст модуля rolling\_stand

```
1. import sympy
2.
3. class Stand:
4.     def __init__(self, r_kat, h_0, h_1, b_0, t_vh, a
, v, lambd, l_0, v_vh_next = None, b_1 = None):
5.         self.r_kat = r_kat
6.         self.h_0 = h_0
7.         self.h_1 = h_1
8.         self.b_0 = b_0
9.         self.b_1 = b_1
10.        self.t_vh = t_vh
11.        self.a = a
12.        self.v = v
13.        self.lambd = lambd
14.        self.l_0 = l_0
15.        self.params = {}
16.        self.v_vh_next = v_vh_next
17.        self.is_computing = False
18.
19.    def computing(self):
20.        if self.is_computing:
21.            return None
22.        params = dict()
23.        params[r'$\triangle h$', 'мм'] = self.h_0 - s
elf.h_1
24.        params[r'$\varepsilon$'] = params[r'$\triang
le h$', 'мм'] / self.h_0
25.        params[r'$l$', 'мм'] = (self.r_kat * params[r
```

```

' $\triangle h$, мм']) ** 0.5
26.         params['$u$', '$\frac{1}{c}$'] = self.v * params[r'$\varepsilon$'] * 1000 / params['$l$', 'мм']
27.         #params['u'] = 0.105 * n_валков * (params[r'\varepsilon'] * R_рабочий_валков / self.h_0) ** 0.5
28.         params[r'$\sigma_{\text{f}}$, МПа'] = 3250 * sympy.exp(-0.0028 * self.t_vh).n(5) * params[r'$\varepsilon$'] ** (0.28) * params['$u$', '$\frac{1}{c}$'] ** (0.087)
29.         def k_2(v):
30.             if v < 3:
31.                 return 1
32.             else:
33.                 return 1.53 * v ** (-0.467)
34.         params[r'$\mu_{\text{yct}}$'] = 0.6 * 0.8 * k_2(self.v) * 1.47 * (1.05 - 0.0005 * self.t_vh)
35.         if self.b_1 is None:
36.             print('b_1 is None!')
37.         params[r'$\triangle b$'] = 1 / 2 * (1 - params[r'$\triangle h$'] / (2 * params[r'$\mu_{\text{yct}}$'])) * sympy.ln(self.h_0 / self.h_1).n(5)
38.         else:
39.             params[r'$\triangle b$, мм'] = ((self.b_1 - self.b_0) ** 2) ** 0.5
40.             params[r'$b_{\text{cp}}$, мм'] = self.b_0 + params[r'$\triangle b$, мм'] / 2
41.             self.b_1 = self.b_0 + params[r'$\triangle b$, мм']
42.
43.         def gamma(b_1, b_0, h_1, h_0, mu):
44.             if (((b_1 + b_0) / 2) / ((h_0 + h_1) /

```

```

2) > 0.465 / mu):
45.                     return 1.155
46.         else:
47.             return 1 + mu / 3 * (((b_1 + b_0) /
2) / ((h_0 + h_1) / 2))
48.     def delta(mu, l, delta_h):
49.         return (2 * mu * l) / (delta_h)
50.
51.     def h_n(h_1, h_0, delta):
52.         return (((1 + (1 + (delta ** 2 - 1) * (
(h_0 / h_1) ** delta)) ** 0.5) / (delta + 1)) ** (1 / d
elta)) * h_1
53.
54.
55.     def n_1(l, h_1, h_0, mu):
56.         if l / ((h_1 + h_0) / 2) > 4:
57.             return 1 + 1 / (4 * ((h_1 + h_0) /
2))
58.         elif l / ((h_1 + h_0) / 2) > 2:
59.             d = delta(mu, l, (h_0 - h_1))
60.             hn = h_n(h_1, h_0, d)
61.             return (2 * hn) / ((h_0 - h_1) * (d
- 1)) * ((hn / h_1) ** d - 1)
62.         else:
63.             return 1 + 1 / (6 * ((h_1 + h_0) /
2))
64.
65.     def n_2(l, h_1, h_0):
66.         if l / ((h_1 + h_0) / 2) > 1:
67.             return 1
68.         else:

```

```

69.                     return (l / ((h_1 + h_0) / 2)) ** (-0.4)
70.
71.     def n_v(l, b_1, b_0, h_1, h_0, mu):
72.         return (1 + ((3 * ((b_1 + b_0) / 2) - 1) / (6 * ((b_1 + b_0) / 2))) * mu * l / ((h_1 + h_0) / 2)) / (1 + mu / 2 * l / ((h_0 + h_1) / 2))
73.
74.     def n_k(mu, l, h_1, h_0, gamma):
75.         h_sr = (h_1 + h_0) / 2
76.         return (1.155 * (1 + 2 * mu * 0.9 * l / (3 * h_sr * sympy.pi.n(5)))) / (gamma * (1 + mu / 3 * l / h_sr))
77.     def p_sr(h_1, h_0, b_1, b_0, l, mu, sigma_f):
78.         gm = gamma(b_1, b_0, h_1, h_0, mu)
79.         n1 = n_1(l, h_1, h_0, mu)
80.         n2 = n_2(l, h_1, h_0)
81.         nv = n_v(l, b_1, b_0, h_1, h_0, mu)
82.         nk = n_k(mu, l, h_1, h_0, gm)
83.         return gm * n1 * n2 * l * nv * nk * sigma_f
84.
85.     def k_2(v):
86.         return 1.53 * v ** (-0.467) if v > 3 else 1
87.
88.     def mu(v, t):
89.         return 0.6 * 0.8 * k_2(v) * 1.47 * (1.05 - 0.0005 * t)
90.

```

```

91.         p_mid = p_sr(self.h_1, self.h_0, self.b_1,
self.b_0, params['$l$, ММ'], params[r'$\mu_{\text{yct}}$'],
$params[r'$\sigma_{\text{\text{yct}}}$, МПа'])
92.         params[r'$p_{\text{cp}}$', МПа'] = p_mid
93.         f_k = p_mid * (self.b_1 + self.b_0) / 2 * p
arams['$l$, ММ'] # Это в ньютонах
94.         params[r'$P_{\text{пр}}$', кН'] = f_k / 1000
# это в килоньютонах
95.         def var_m(mu, l, h_1, h_0):
96.             h_sr = (h_1 + h_0) / 2
97.             return mu * l / h_sr
98.
99.         def var_psi(epsilon, mu, l, h_1, h_0):
100.             m = var_m(mu, l, h_1, h_0)
101.             if m >= 0.5:
102.                 return 1 / (2 - epsilon) * (1 - ep
silon * (l ** m / (l ** m - 1) - 1 / m))
103.             else:
104.                 return 0.5 * (1 / (1 - epsilon / 2
)) * (1 - epsilon * (1 + m) / (2 + m))
105.
106.         def mom_prok(epsilon, mu, l, h_1, h_0, p):
107.             psi = var_psi(epsilon, mu, l, h_1, h_0
)
108.             return 2 * p * psi * l / 1000
109.
110.         mp = mom_prok(params[r'$\varepsilon$'], pa
rams[r'$\mu_{\text{yct}}$'], params['$l$, ММ'], self.h_
1, self.h_0, p_mid)
111.         params['$M_{\text{пр}}$', кН$\cdot$м'] =
mp

```

```

112.
113.         v_vih = self.v * self.lambd
114.         #params[r'v_{\text{вых}}'] = v_vih
115.         params[r'$l_{\text{вых}}$', mm'] = self.l_0
116.             * self.lambd
117.             def delta_t_d(p, h_0, h_1):
118.                 return p * sympy.ln(h_0 / h_1).n(5) *
119.                     0.8 / (7900 * 548) * 10 ** 6
120.             def delta_t_v(h_0, h_1, t_vh, l, v):
121.                 #return 0
122.                 return 4.87 / (h_0 + h_1) * (t_vh - 50
123. ) * (2 * l * h_0 / (10 ** 3 * (h_0 + h_1) * v)) ** 0.5
124.             def delta_t_l(t_vh, t_d, t_v, h_1, l_mk, l
125. _1, v, v_vh_next):
126.                 t = t_vh + t_d - t_v + 273
127.                 tau = l_mk / v + (l_1-l_mk) / v_vh_nex
128. t # так как моя заготовка > 4 метров
129.                 return 17.5 * t ** 4 / h_1 * tau * 10
130. ** (-15)
131.
132.             def t_vih(t_vh, p, h_0, h_1, v, l, l_mk, l
133. _1, v_vh_next):
134.                 t_d = delta_t_d(p, h_0, h_1)
135.                 t_v = delta_t_v(h_0, h_1, t_vh, l, v)

```

```

_mk, l_1, v, v_vh_next)
136.         t_k = delta_t_k(t_l)
137.         return t_vh + t_d - t_v - t_l - t_k, t
138.         _d, t_v, t_l, t_k
139.         params[r'$T_{\text{вых}}$', $^{\circ}C$'],
t_d, t_v, t_l, t_k = t_vih(self.t_vh, p_mid, self.h_0,
self.h_1, self.v, params['$l$', 'мм'], self.a, params[r'$
l_{\text{вых}}$', 'мм'], self.v_vh_next)
140.
141.         params[r'$\triangle T_{\text{д}}$', $^{\circ}C$'] = t_d
142.         params[r'$\triangle T_{\text{в}}$', $^{\circ}C$'] = t_v
143.         params[r'$\triangle T_{\text{л}}$', $^{\circ}C$'] = t_l
144.         params[r'$\triangle T_{\text{к}}$', $^{\circ}C$'] = t_k
145.
146.         params['$\tau$'] = self.a / (self.v * 100
0) + (params[r'$l_{\text{вых}}$', 'мм']-self.a) / (self.v
_vh_next * 1000)
147.
148.         self.params = params
149.         self.is_computing = True
150.
151.     def return_params(self):
152.         if not self.is_computing:
153.             self.computing()
154.         return self.params
155.

```

```
156. class LetStripStand(Stand):
157.     def __init__(self, f_start, f_end, b_start, b_
end, d_valkov, t_vh, a, n, lambd, l_0, v_vh_next):
158.         h_0 = f_start / b_start
159.         h_1 = f_end / b_end
160.         d_kat = d_valkov - f_end / b_end
161.         r_kat = d_kat / 2
162.         v = (3.1415 * r_kat * 2 * n) / 60_000
163.         self.v_vh = v / lambd
164.         #r_kat, h_0, h_1, b_0, t_vh, a, v, lambd,
l_0, v_vh_next = None, b_1 = None
165.         super().__init__(r_kat, h_0, h_1, b_start,
t_vh, a, v, lambd, l_0, v_vh_next, b_end)
166.
167.     def computing(self):
168.         super().computing()
169.         self.params['$v_{\text{вх}}$'] = self.v_vh
170.         self.params['$v_{\text{вых}}$'] = self.v_vh
171.
```