

УДК 621.721.01

С. В. Ершов<sup>1</sup>, С. Н. Мельник<sup>2</sup>, В. В. Мосьпан<sup>2</sup>, С. Ю. Гаврилин<sup>1</sup><sup>1</sup>Днепродзержинский государственный технический университет. Украина, г. Днепродзержинск<sup>2</sup>ПАО «Днепровский металлургический комбинат имени Ф.Э. Дзержинского».

Украина, г. Днепродзержинск

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ФАСОННОЙ ПОЛОСЫ В ЧЕРНОВОМ ШПУНТОВОМ КАЛИБРЕ БЕЗ ОБЖАТИЯ ЗАМКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

### Анотація

Дана робота присвячена експериментальному дослідженню в лабораторних умовах деформованого стану при прокатці шпунтового профілю Коритного типу.

Важливість роботи полягає тим, що до теперішнього часу існує дослідження, які, як правило, мають якісний характер і недостатньо розкривають фізику процесу формозміни металу при прокатці шпунтового профілю.

Наведений в роботі якісний і кількісний аналіз впливу параметрів осередку деформації на коефіцієнти формозміни дозволяє науково обгрунтовано оцінити методи впливу на деформований стан і зрозуміти причини спостережуваних на практиці явищ.

Результати роботи дозволяють розширити існуючі уявлення про можливості прогнозування формозміни металу при прокатці шпунтових профілів.

### Abstract

This paper describes an experimental study in the laboratory strain state during rolling of complex shaped sheet piling profile.

The importance of this work stems from the fact that to date there are a limited number of studies on this issue. The available research, as a rule, are qualitative in nature and do not establish a pattern of metal flow on the parameters of the deformation. The reason for this state of affairs is the difficulty of conducting research in a production environment associated with the large dimensions of sheet pile profiles and the need for rolling experiments on heavy-rolling mill.

Another issue explored in the production of sheet profiles is a great loss to the scraps of metal, because the weight of one meter of sheet piling profile ranges from 75 to 105 kg, and the length of the defective section of rolled sheet can reach several meters.

Studies have shown that the reason for this difference is the material flow in the middle of the band and its front end. The resulting patterns allow designers to minimize the calibration of this type of loss through

the development of deformation patterns that minimize contraction interlocking elements.

Reproduced in a qualitative and quantitative analysis of the influence of the deformation parameters on the deformation coefficients can scientifically evaluate the methods of influence on the strain state and to understand the causes of the phenomena observed in practice.

The results allow to extend existing ideas about the possibilities of predicting deformation during the rolling of sheet pile profiles.

### Введение

Шпунтовые сваи — это металлические профили фасонного сечения, которые представляют собой необходимую составляющую промышленного и гражданского строительства. Шпунтовой профиль применяется в строительстве дорог, мостов, причалов, дамб, а также нефтяных и газовых путепроводов. Он может выступать и в роли ограды котлована от воды, укрепляя его стены созданием водонепроницаемой преграды. Шпунтовая стенка может служить защитой от оползня.

В данной статье будет рассматриваться корытный тип шпунтовых свай — «Ларсен». Данный тип шпунтового профиля производственникам известен более 100 лет. И спрос на рынке металлопроката на данный вид продукции в наше время возрастает.

### Состояние вопроса

Согласно классификации [1], авторы относят шпунтовую сваю корытного типа к группе профилей с вертикальной осью симметрии и отогнутыми краями. Из крупных профилей данной группы можно отметить: металлическую шпалу, профиль шахтной стойки (СВП-27 — СВП-33).

Шпунтовая свая типа «Ларсен» имеет геометрическое сходство, а также и способы прокатки со швеллером в первых формирующих калибрах. Однако весомым фактором является наличие замковых элементов, который вносит свои коррективы в формоизменение металла при прокатке шпунта. Теоретические и практические исследования формоизменения металла в формирующих калибрах для производства швел-

лера и двутавровых балок проводили многие ученые: И.Я. Тарновский, Б.М. Илюкович, Б.В. Мерекин, М.М. Штернов, Б.П. Бахтинов, Д.И. Старченко, Б.Б. Диомидов, А. А. Нефедов, Н.В. Литовченко, А.П. Чекмарев, М. С. Мутьев, К. Рытель.

В работе [2] рассмотрен механизм формоизменения металла в открытых и закрытых черновых калибрах при прокатке как швеллеров так и двутавров. В работе [3–4] исследовались коэффициент утяжки и были получены формулы для определения заполнения калибра. Также рассмотрены экспериментальные данные по прокатке в разрезных калибрах со свободным и стесненным уширением. При прокатке фасонных профилей важным фактором является деление калибра на элементы, что было показано в работах [5–6]. Автор работы [7] обращает внимание на неравномерное распределение вытяжек во фланцевых профилях и влияние этого фактора на вынужденное уширение. Работа [8] посвящена влиянию формы разрезного гребня на уширение и механизм поворота боковых граней открытых фланцев.

Исследование формоизменения металла при прокатке шпунтовых профилей корытного типа проводилось в работах [9–10], где были рассмотрены особенности заполнения сложного разрезного калибра, влияние защемления на формоизменение металла. Также получены зависимости течения металла в установившемся и неустойчивом процессе. Однако данные исследования раскрывают физику процесса в первом разрезном калибре.

Отсутствие данных в технической литературе о закономерности течения металла в установившемся и неустойчивом процессе в последующих формообразующих калибрах препятствуют освоению профилируемых шпунтовых свай с массой погонного метра свыше 100 кг.

Еще одним важным вопросом является величина концевой обрезки. При прокатке шпунтового профиля длина обрезаемого конца достигает нескольких метров.

### Постановка задачи

Целью работы является исследование формоизменения металла по всей длине полосы при прокатке шпунтового профиля Л5Д, и определение факторов, влияющих на формоизменение металла в установившемся и неустойчивом процессе.

### Методика исследований

При анализе технологического процесса производства шпунтовой сваи Л5Д в условиях рельсобалочного стана 900 ДМКД для исследования формоизменения в первых формирующих калибрах был выбран полупромышленный лабораторный стан 300 кафе-

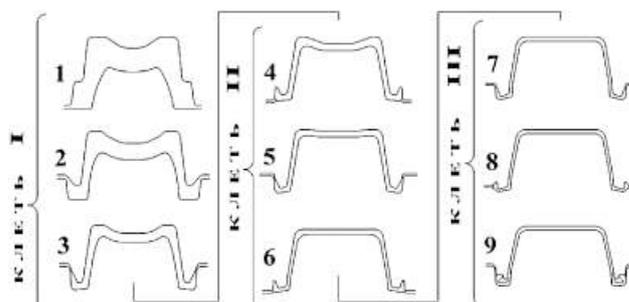


Рис. 1. Схема прокатки шпунтовой сваи Л5Д в условиях ПАТ ДМКД

ры ОМД Днепродзержинского государственного технического университета.

В валках стана 300 были врезаны фасонные калибры, выполненные в масштабе М1:7. Значение масштаба обуславливается техническими возможностями лабораторного стана 300.

Исследованию подверглись 4 первые калибра схемы прокатки шпунта (рис. 1), в которых происходит первоначальное формирование замковых элементов.

Было проведено пять экспериментов, в ходе которых менялись режимы обжатий и схема деформации согласно планам экспериментов.

В данной работе приведем результаты одного эксперимента. Выбрана схема деформации с обжатием стенки и без обжатия замковых элементов в первом формирующем калибре 3 проход, так как результаты без обжатия замковых элементов в 1 проходе были опубликованы в работе [10].

В качестве факторов планируемого эксперимента были выбраны безразмерные величины:

- коэффициент обжатия  $m_1 = h_0/h_1$ , отношение начальной и конечной толщины стенки;
- отношение площади стенки к площади замкового элемента  $m_2 = S_{ст}/S_з$ , где  $S_{ст} = b_{gm} \cdot h_0$  – площадь стенки,  $S_з = h_{p0} \cdot b_{p0}$  – площадь замкового элемента (рис. 2).

При проведении эксперимента значения параметров  $m_1$  и  $m_2$  находились в следующем диапазоне:

$$1.09 \leq m_1 \leq 1.42; 5.56 \leq m_2 \leq 8.47.$$

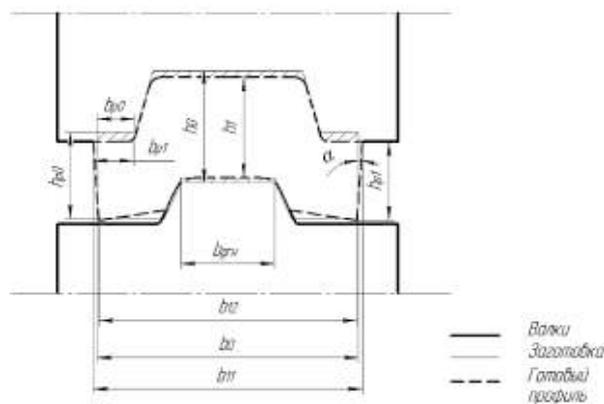


Рис. 2. Схема деформации при проведении эксперимента

## Результаты замеров до и после прокатки

Зона установившегося процесса (средняя часть полосы)														
№ Обр.	$m_1$	$m_2$	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$bg_{гр}$ , мм	$hp_0$ , мм	$hp_1$ , мм	$bp_0$ , мм	$bp_1$ , мм	$b_0$ , мм	$b_{11}$ , мм	$b_{12}$ , мм	$L_0$ , мм	$L_1$ , мм
1	1,09	5,6	23,4	21,4	33,7	19,3	15,8	7,3	8,8	80,3	81	82,1	98,3	105,2
2	1,42	5,56	24,1	17	33,3	19	11,6	7,6	9,5	80,3	81	84,4	99	128,8
3	1,07	8,47	24,4	22,8	33,1	18,7	17,2	5,1	6,6	76,9	78,1	79,1	99,2	106
4	1,41	6,69	24,3	17,2	33,5	19	12,2	5,9	8,1	77,4	80,6	83,1	98,4	127,5
Зона неустановившегося процесса (передний конец полосы)														
№ Обр.	$m_1$	$m_2$	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$bg_{гр}$ , мм	$hp_0$ , мм	$hp_1$ , мм	$bp_0$ , мм	$bp_1$ , мм	$b_0$ , мм	$b_{11}$ , мм	$b_{12}$ , мм	$L_0$ , мм	$L_1$ , мм
1	1,07	5,6	23,4	21,8	33,7	19,3	16,8	7,3	8,2	80,3	82,9	82,9	98,3	105,2
2	1,42	5,56	24,1	17	33,3	19	11	7,6	10,15	80,3	84,6	87,7	99	128,8
3	1,08	8,47	24,4	22,5	33,1	18,7	17,1	5,1	6,7	76,9	79,5	79,7	99,2	106
4	1,52	7,26	24,3	16	33,5	19	11,2	5,9	11	77,4	82,6	83,3	98,4	127,5

В качестве образцов использовались изготовленные согласно плану эксперимента 2<sup>2</sup> на ОАО ДМКД стальные заготовки фасонного сечения. Бандажи были изготовлены из стали 45 без термической обработки. Перед прокаткой все заготовки были измерены штангенциркулем с ценой деления нониуса 0,05 мм. Для всех заготовок были сделаны обводки. От одного из концов заготовки отрезался темплет. Заготовки нагревались в методической лабораторной печи до 1150–1200 °С. Проводилась прокатка. После прокатки, отрезались темплеты от средней части полосы и передних концов, делались обводки и фотографии. Выполнялись замеры, результаты которых заносились в таблицу 1

Темплеты от зоны неустановившегося процесса (передний конец полосы)

Образец 1

Образец 2



Темплеты от зоны установившегося процесса (средняя часть полосы)

Образец 1

Образец 2



Рис. 3. Фото темплетов от зоны установившегося и неустановившегося процессов

В результате статистической обработки экспериментальных данных в статистическом программном пакете были получены регрессионные зависимости и степень влияния независимых факторов  $m_1 = h_0/h_1$  и  $m_2 = S_{ст}/S_3$  на параметры формоизменения:

- коэффициент вытяжки всей полосы  $\lambda = L_1/L_0$ :

$$\lambda = 0,2895 + 0,7593 \frac{h_0}{h_1} - 0,0169 \frac{S_{ст}}{S_3} \quad \text{— для обеих частей } (R = 0,88 \text{ — коэффициент множественной корреляции}).$$

- коэффициент уширения по нижней кромке замковых элементов  $\beta_{11} = b_{11}/b_0$ :

$$\beta_{11} = 1,1423 - 0,1052 \frac{h_0}{h_1} \quad \text{— средняя часть } (R = 0,87);$$

$$\beta_{11пер} = 1,0443 - 0,016 \frac{h_0}{h_1} \quad \text{— передний конец } (R = 0,96).$$

- коэффициент уширения по верхней кромке замковых элементов  $\beta_{12} = b_{12}/b_0$ :

$$\beta_{12} = 0,9472 + 0,0417 \frac{h_0}{h_1} + 0,0101 \frac{S_{ст}}{S_3} \quad \text{— средняя часть } (R = 0,96);$$

$$\beta_{12пер} = 0,893 + 0,1534 \frac{h_0}{h_1} - 0,0031 \frac{S_{ст}}{S_3} \quad \text{— передний конец } (R = 0,9).$$

Коэффициент утяжки замковых элементов по высоте  $\eta_p = h_{p0}/h_{p1}$ :

$$\eta_p = 0,5136 + 0,4987 \frac{h_0}{h_1} + 0,0097 \frac{S_{ст}}{S_3} \quad \text{— средняя часть } (R = 0,91);$$

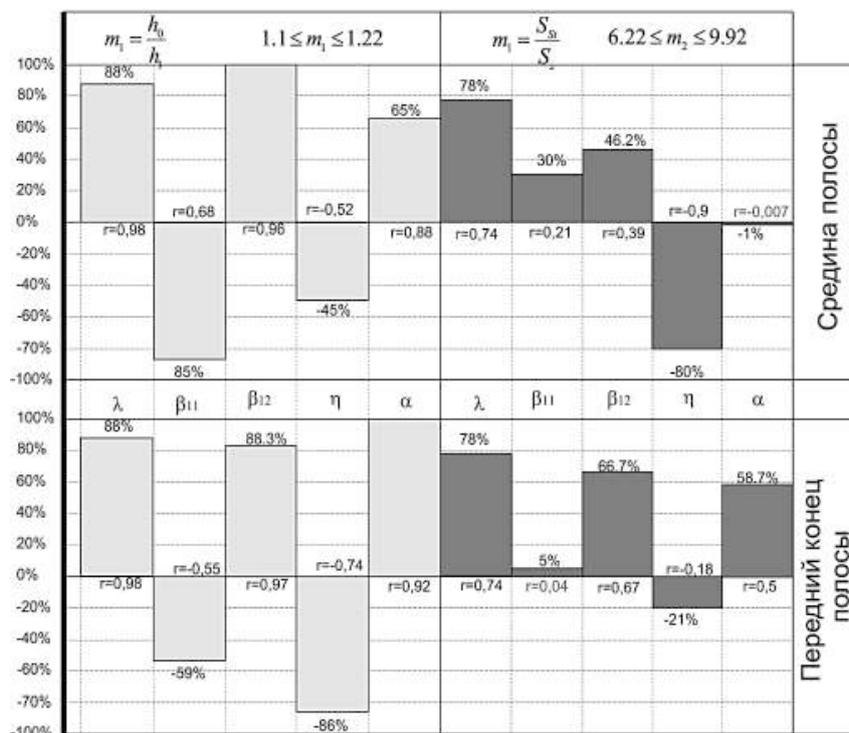


Рис. 4. Степень влияния независимых факторов  $m_1$  и  $m_2$  на параметры деформированного состояния: % – степень влияния;  $r$  – частная корреляция

$$\eta_{\text{пер}} = 0,4659 + 0,473 \frac{h_0}{h_1} \text{ – передний конец } (R = 0,9).$$

- угол наклона боковых граней замковых элементов  $\alpha$ :

$$\alpha = -20,3 + 16,9 \frac{h_0}{h_1} \text{ – средняя часть } (R = 0,97);$$

$$\alpha_{\text{пер}} = -14,9 + 18,9 \frac{h_0}{h_1} - 0,2 \frac{S_{\text{ст}}}{S_3} \text{ – передний конец } (R = 0,92).$$

Анализ полученных данных представляется в виде гистограммы на рис. 4

#### Коэффициент вытяжки $\lambda = L_1/L_0$ .

Результаты анализа показали, что увеличение обжатия по стенке  $m_1 = h_0/h_1$  приводит к увеличению вытяжки. Увеличение отношения  $m_2 = S_{\text{ст}}/S_3$  площади стенки к площади замковой части приводит к увеличению вытяжки.

Коэффициент корреляции между параметром  $m_1$  и коэффициентом вытяжки равен 0.98. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 88% изменчивости коэффициента  $\lambda$  (от 1.022 до 1.11 – анализ регрессионного уравнения).

Коэффициент корреляции между параметром  $m_2$  и коэффициентом вытяжки равен 0.74. Изменением параметра  $m_2$  объясняется 78% изменчивости коэффициента  $\lambda$  (от 1.032 до 1.11 – анализ регрессионного уравнения).

#### Коэффициент уширения по нижней кромке замковых элементов $\beta_{11} = b_{11}/b_0$ .

Для средней части профиля и переднего конца увеличение обжатия по стенке  $m_1 = h_0/h_1$  приводит к уменьшению коэффициента уширения  $\beta_{11}$ . Увеличение отношения  $m_2 = S_{\text{ст}}/S_3$  (площади стенки к площади замковой части) приводит к увеличению коэффициента уширения  $\beta_{11}$ .

Для средней части профиля значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1, m_2$  и коэффициентом уширения  $\beta_{11}$  равны  $-0.68$  и  $0.21$  соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 85% изменчивости коэффициента  $\beta_{11}$  (от 0.99 до 1.007). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 30% изменчивости коэффициента  $\beta_{11}$  (от 0.996 до 1.002).

Для переднего конца значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1, m_2$  и коэффициентом уширения  $\beta_{11}$   $-0.55$  и  $0.04$  соответственно.

Изменением параметра  $m_1$  объясняется 59% изменчивости коэффициента  $\beta_{11}$  (от 1.019 до 1.032). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 5% изменчивости коэффициента  $\beta_{11}$  (от 1.0255 до 1.0265). Это говорит о незначимости влияния параметра  $m_2 = S_{\text{ст}}/S_3$  на коэффициент уширения.

#### Коэффициент уширения по верхней кромке замковых элементов $\beta_{12} = b_{12}/b_0$ .

Для средней части профиля и переднего конца увеличение обжатия по стенке  $m_1 = h_0/h_1$  приводит к увеличению коэффициента уширения  $\beta_{12}$ . Увеличение отношения  $m_2 = S_{\text{ст}}/S_3$  (площади стенки к площади замковой части) приводит к увеличению коэффициента уширения  $\beta_{12}$ .

Для средней части профиля значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1, m_2$  и коэффициентом уширения  $\beta_{12}$  равны 0.96 и 0.39 соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 97% изменчивости коэффициента  $\beta_{12}$  (от 1.02 до 1.078). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 63% изменчивости коэффициента  $\beta_{12}$  (от 1.032 до 1.07).

Для переднего конца значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1, m_2$  и коэффициентом уширения  $\beta_{12}$  равны 0.98 и 0.67 соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 89% изменчивости коэффициента  $\beta_{12}$  (от 1.02 до 1.036). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 39% изменчивости коэффициента  $\beta_{12}$  (от 1.025 до 1.032).

### Коэффициент утяжки замковых элементов по высоте $\eta_p = h_{p0}/h_{p1}$ .

Для средней части профиля и переднего конца увеличение обжатия по стенке  $m_1 = h_0/h_1$  приводит к уменьшению коэффициента утяжки  $\eta_p$ . Увеличение отношения  $m_2 = S_{ст}/S_3$  (площади стенки к площади замковой части) приводит к уменьшению коэффициента утяжки  $\eta_p$ .

Для средней части профиля значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1$ ,  $m_2$  и коэффициентом утяжки  $\eta_p$  равны  $-0.53$  и  $-0.9$  соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 45% изменчивости коэффициента  $\eta_p$  (от 1.056 до 1.065). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 80% изменчивости коэффициента  $\eta_p$  (от 1.052 до 1.068). Это показывает, что влияние параметра  $m_2 = S_{ст}/S_3$  на коэффициент утяжки  $\eta_p$  в 2 раза сильнее, чем влияние обжатия по стенке  $h_0/h_1$ .

Для переднего конца значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1$ ,  $m_2$  и коэффициентом утяжки  $\eta_p$  равны  $-0.74$  и  $-0.18$  соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 86% изменчивости коэффициента  $\eta_p$  (от 0.97 до 1.03). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 21% изменчивости коэффициента  $\eta_p$  (от 0.99 до 1.005).

### Наклон боковых граней замковых элементов $\alpha$ .

Для средней части профиля и переднего конца увеличение обжатия по стенке  $m_1 = h_0/h_1$  приводит к увеличению угла наклона боковой грани замкового элемента  $\alpha$ .

Для средней части профиля увеличение отношения  $m_2 = S_{ст}/S_3$  не влияет на угол наклона боковой грани замкового элемента  $\alpha$ .

Для переднего конца увеличение отношения  $m_2 = S_{ст}/S_3$  (площади стенки к площади замковой части) приводит к увеличению угла наклона боковой грани замкового элемента  $\alpha$ .

Для средней части профиля значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1$ ,  $m_2$  и углом наклона боковой грани замкового элемента  $\alpha$  равны 0.88 и  $-0.007$  соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 65% изменчивости угла  $\alpha$  (от 1.3 до 4.9 градусов). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 0.9% изменчивости угла  $\alpha$  (от 3.0 до 3.05 градусов). Это показывает, что влияние параметра  $m_1 = h_0/h_1$  во много раз сильнее, чем влияние параметра  $m_2 = S_{ст}/S_3$ . Значение коэффициента корреляции равно  $-0.007$  говорит о незначимости влияния параметра  $m_2 = S_{ст}/S_3$  на угол наклона боковой грани замкового элемента  $\alpha$ .

Для переднего конца значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1$ ,  $m_2$  и углом наклона боковой грани замкового элемента  $\alpha$  равны 0.92 и 0.5 соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 98% изменчивости угла  $\alpha$  (от 0.0 до 5.9 градусов). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 60% изменчивости угла  $\alpha$  (от 0.7 до 4.3 градусов).

### Выводы

1. Проведенные исследования показали, что причиной образования длинного дефектного участка раската является различие течения металла в средней части полосы и на ее переднем конце. Полученные закономерности позволят проектировщикам калибровок минимизировать данный вид потерь путем разработки схем деформаций, минимизирующих утяжку замковых элементов.

2. Приведенный в работе качественный и количественный анализ влияния параметров очага деформации на коэффициенты формоизменения позволяет оценить методы воздействия на деформированное состояние и понять причины наблюдаемых на практике явлений.

3. Рекомендуется учитывать полученные данные при проектировании новых калибровок валков для производства шпунтовых профилей с целью оптимизации формоизменения и повышения экономичности производства за счет сокращения длины обрезаемых частей.

### Литература

1. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка: Справочник. Том 5./ Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев., В. П. Капелюшный — Днепропетровск: РИА «Днепр-Вал», 2004. — 375 с.
2. Тарновский И. Я. Элементы теории прокатки сложных профилей / И. Я. Тарновский, А. Н. Скороходов Б. М. Илюкович — Москва: изд. «Металлургия», 1972. — 352 с.
3. Мутьев М. С. Определение утяжки и вынужденного уширения при прокатке / М. С. Мутьев // Сб. «Обработка металлов давлением». М.: металлургияздат, 1952
4. Мутьев М. С. Калибровка черновых валков / М. С. Мутьев — Москва: изд. «Металлургия», 1964. — 189 с.
5. Мутьев М. С. О разбивке калибра на элементы при прокатке с неравномерным обжатием / М. С. Мутьев // Труды конференции «Технический прогресс в технологии прокатного производства». М.: металлургияздат, 1960
6. Мельник С. Н. Развитие метода расчета калибровки валков для прокатки крупных шпунтовых профилей: диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук : 05.03.05 / Мельник Сергей Николаевич. — Днепродзержинск, 2007. — 266 с.
7. Нефедов А. А. О методах калибровки двутавровых балок и швеллеров / А. А. Нефедов // «Материалы международного съезда по калибровке прокатных валков». М.: изд. «Металлургия», 1965 — С. 187—193.
8. Рытель К. Исследование деформации металла при прокатке в разрезном калибре / К. Рытель // //



«Материалы международного съезда по калибровке прокатных валков». М: изд. «Металлургия», 1965 – С. 165–176.

9. *Левченко Г. В.* Исследование формоизменения металла при прокатке шпунтовых свай типа «Ларсен» / Г. В. Левченко, С. В. Ершов, С. Н. Мельник // *Металлургия и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 3. – С. 48–52.

10. *Ершов С.В.* Особенности формирования замковых элементов профиля шпунтовой формы при прокатке в первом проходе первого формирующего калибра / С. В. Ершов, С. Н. Мельник, В. В. Мосьпан, С. Ю. Гаврилин // *Металлургия и горнорудная промышленность*. – 2011. – № 5. – С 36–39