

УДК 621.721.01

Ершов С. В.  
Мельник С. Н.  
Мосъпан В. В.  
Гаврилин С. Ю.  
Дудка Р. М.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ШПУНТОВОЙ СВАИ В ФОРМИРУЮЩЕМ КАЛИБРЕ С ДВУСТОРОННИМ ОБЖАТИЕМ ЗАМКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время в связи со сложившейся экономической ситуацией в мире имеется стремление к энергосбережению и сокращению металлоемкости прокатной продукции. Вместе с этим растут требования к прочностным характеристикам продукции, выпускаемой металлургами.

Шпунтовая свая – фасонный профиль специального назначения, имеющий сложную конфигурацию поперечного сечения. В данной статье будет рассматриваться корытный тип шпунтовых свай – «Ларсен». В работе [1] авторы относят данный профиль к группе фасонных профилей с отогнутыми краями и вертикальной осью симметрии. Шпунт «Ларсен» хорошо себя зарекомендовал при строительстве гидротехнических сооружений и более века пользуется спросом на рынке металлопроката. Как правило, шпунтовую сваю тип «Ларсен» производят в условиях рельсобалочного и универсально балочных станков. На сегодняшний день, существует несколько технологий производства этого профиля:

- 1) прокатка в двухвалковых клетях (ДМКД, Украина);
- 2) прокатка в двухвалковых и универсальных клетях (НТМК, РФ);
- 3) прокатка в двухвалковых клетях с последующей гибкой в универсальной клети (ArcelorMittal Steel, Nippon Corporation).

Общей проблемой является выполнение замковых элементов при освоении новых профилеразмеров с большими габаритами.

По форме шпунтовая свая корытного типа схожа со стандартным горячекатаным швеллером. Для двутавровой балки и швеллерной стали проводились экспериментальные и теоретические исследования многими учеными. В работе [2] исследовались коэффициент утяжки и были получены формулы для определения заполнения калибра. В работе [3] рассмотрены экспериментальные данные по прокатке в разрезных калибрах со свободным и стесненным уширением. Основным принципом калибровки валков для сложных профилей является обеспечение одинаковых вытяжек по элементам калибра. При этом важным фактором является деление калибра на элементы, что было показано в работе [4].

Исследования формоизменения при прокатке шпунтовых профилей корытного типа проводились в работах [5–6], где были рассмотрены особенности заполнения сложного разрезного калибра, влияние защемления на формоизменение металла. Однако данные исследования не раскрывают в полной мере физику процесса. Отсутствие данных в технической литературе о деления профиля на элементы и закономерностей течения металла препятствуют освоению более крупных профилеразмеров.

Также важным вопросом является величина концевой обрезки. При прокатке сортовых профилей малых сечений передние концы обрезаются для безаварийного продолжения процесса прокатки. В этом случае расход металла на обрезь – минимален. При прокатке шпунтового профиля длина обрезаемого конца может достигать нескольких метров. Следует учесть, что вес погонного метра такого профиля может достигать от 75 до 105 кг.

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

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 кафедры ОМД Днепродзержинского государственного технического университета.

В валках стана 300 были врезаны фасонные калибры, выполненные в масштабе М 1:7. 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 обжатия и схема деформации согласно планам экспериментов.

В данной работе приведем результаты исследования схемы деформации с обжатием стенки и замковых элементов в первом формирующем калибре, так как результаты без обжатия замковых элементов в 1 проходе были опубликованы в работе [7].

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  $m_2 = S_{cm}/S_3$ , где

$S_{cm} = b_{grn} \cdot h_0$  – площадь стенки,  $S_3 = h_{p0} \cdot b_{p0}$  – площадь замкового элемента (рис. 2).

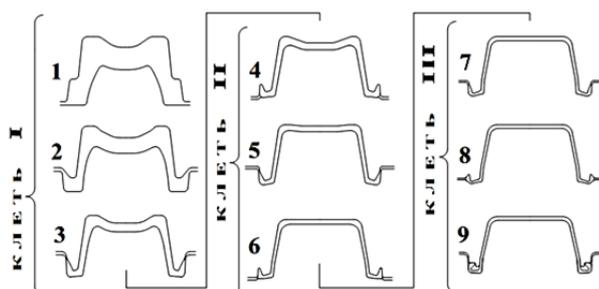


Рис. 1. Схема прокатки шпунтовой сваи Л5Д в условиях ДМКД

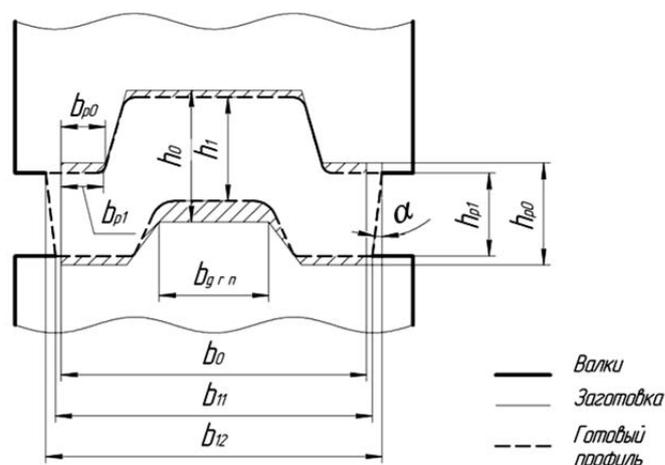


Рис. 2. Схема деформации при проведении эксперимента

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

$$1,09 \leq m_1 \leq 1,42; \quad 5,56 \leq m_2 \leq 8,47.$$

В качестве образцов использовались изготовленные согласно плану эксперимента 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. 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 фотографировались (рис. 3). Выполнялись замеры, результаты которых заносились в табл. 1.

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  $m_2 = S_{cm}/S_3$  на параметры формоизменения:

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

$$\lambda = 0,3 + 0,7 \frac{h_0}{h_1} + 0,0006 \frac{S_{cm}}{S_3} \text{ – для обеих частей.}$$

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

$$\beta_{11} = 0,9 + 0,06 \frac{h_0}{h_1} + 0,006 \frac{S_{cm}}{S_3} \text{ – средняя часть;}$$

$$\beta_{11} = 0,9 + 0,07 \frac{h_0}{h_1} + 0,0012 \frac{S_{cm}}{S_3} \text{ – передний конец.}$$

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

$$\beta_{12} = 0,9 + 0,13 \frac{h_0}{h_1} + 0,006 \frac{S_{cm}}{S_3} \text{ – средняя часть;}$$

$$\beta_{12} = 0,9 + 0,12 \frac{h_0}{h_1} - 0,004 \frac{S_{cm}}{S_3} \text{ – передний конец.}$$

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

$$\alpha = 1,1 - \frac{h_0}{h_1} + 0,03 \frac{S_{cm}}{S_3} \text{ – средняя часть;}$$

$$\alpha = -1,2 + 8,8 \frac{h_0}{h_1} - 1,1 \frac{S_{cm}}{S_3} \text{ – передний конец.}$$

Таблица 1

## Результаты замеров до и после прокатки

Зона установившегося процесса (средняя часть полосы)														
№	m1	m2	h0	h1	b <sub>грн</sub>	hp0	hp1	bp0	bp1	b0	b11	b12	L0	L1
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)														
№	m1	m2	h0	h1	b <sub>грн</sub>	hp0	hp1	bp0	bp1	b0	b11	b12	L0	L1
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

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. Темплеты от зоны установившегося и неустановившегося процессов

Анализ полученных данных представляется в виде гистограммы на рис. 4

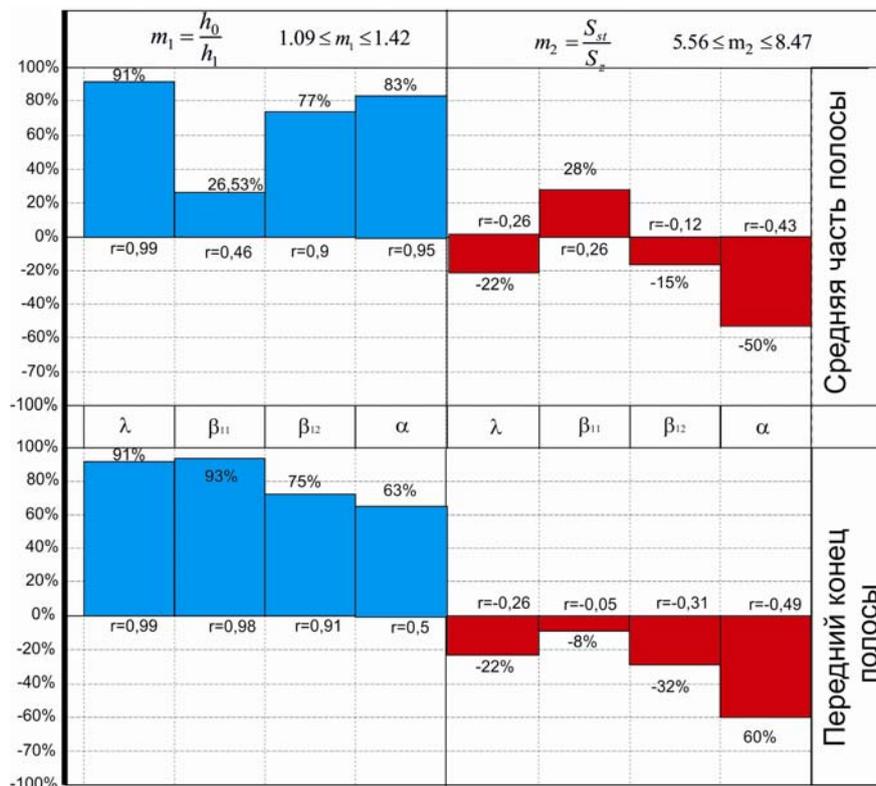


Рис. 4. Степень влияния независимых факторов  $m_1$  и  $m_2$  на параметры деформированного состояния: % – степень влияния;  $r$  – частная корреляция

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  $m_2 = S_{cm}/S_3$  площади стенки к площади замковой части приводит к уменьшению вытяжки.

Коэффициент корреляции между параметром  $m_1$  и коэффициентом вытяжки равен 0,99. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 91 % изменчивости коэффициента  $\lambda$  (от 1,06 до 1,3 – анализ регрессионного уравнения).

Коэффициент корреляции между параметром  $m_2$  и коэффициентом вытяжки равен – 0,26, что говорит о незначительном влиянии этого параметра на вытяжку профиля. Изменением параметра  $m_2$  объясняется 22 % изменчивости коэффициента  $\lambda$  (от 1,1 до 1,2 – анализ регрессионного уравнения).

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

В средней части профиля и на переднем конце увеличение обжатия по стенке  $m_1 = h_0/h_1$  приводит к увеличению коэффициента уширения  $\beta_{11}$ .

В средней части профиля увеличение отношения  $m_2 = S_{cm}/S_3$  (площади стенки к площади замковой части) приводит к увеличению коэффициента уширения  $\beta_{11}$ .

На переднем конце увеличение отношения  $m_2 = S_{cm}/S_3$  (площади стенки к площади замковой части) приводит к уменьшению коэффициента уширения  $\beta_{11}$ .

В средней части профиля значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1$ ,  $m_2$  и коэффициентом уширения  $\beta_{11}$  равны 0,46 и 0,26 соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 25 % изменчивости коэффициента  $\beta_{11}$  (от 1,011 до 1,021). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 28 % изменчивости коэффициента  $\beta_{11}$  (от 1,014 до 1,025). Следует отметить, что приведенные значения коэффициентов корреляции являются очень малыми, что говорит о слабой зависимости коэффициента  $\beta_{11}$  от параметра  $m_1$  и о независимости коэффициента  $\beta_{11}$  от параметра  $m_2$ .

На переднем конце значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1$ ,  $m_2$  и коэффициентом уширения  $\beta_{11}$  равны 0,98 и  $-0,05$  соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 93 % изменчивости коэффициента  $\beta_{11}$  (от 1,03 до 1,067). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 8 % изменчивости коэффициента  $\beta_{11}$  (от 1,045 до 1,048).

Таким образом, видно, что формоизменение переднего конца профиля значительно отличается от формоизменения его центральной части.

*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  $\beta_{12}$ .

Для средней части профиля и переднего конца увеличение отношения  $m_2 = S_{cm}/S_3$  (площади стенки к площади замковой части) приводит к уменьшению коэффициента уширения  $\beta_{12}$ .

Для средней части профиля значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1$ ,  $m_2$  и коэффициентом уширения  $\beta_{12}$  равны 0,9 и 0,12 соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 77 % изменчивости коэффициента  $\beta_{12}$  (от 1,022 до 1,068). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 15 % изменчивости коэффициента  $\beta_{12}$  (от 1,039 до 1,048). Это показывает, что влияние параметра  $m_1 = h_0/h_1$  на коэффициент уширения  $\beta_{12}$  во много раз сильнее, чем влияние параметра  $m_2 = S_{cm}/S_3$ . Значение коэффициента корреляции равно величине 0,12 показывает, что зависимость очень слабая, недостоверная и ей можно пренебречь.

Для переднего конца значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1$ ,  $m_2$  и коэффициентом уширения  $\beta_{12}$  равны 0,91 и  $-0,31$  соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 75 % изменчивости коэффициента  $\beta_{12}$  (от 1,032 до 1,092). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 32 % изменчивости коэффициента  $\beta_{12}$  (от 1,044 до 1,07). Это показывает, что влияние параметра  $m_1 = h_0/h_1$  на коэффициент уширения  $\beta_{12}$  в 2 раза сильнее, чем влияние параметра  $m_2 = S_{cm}/S_3$ .

*Угол наклона 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 и переднего конца увеличение отношения  $m_2 = S_{cm}/S_3$  (площади стенки к площади замковой части) приводит к уменьшению 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 0,95 и  $-0,43$  соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 83 % изменчивости угла  $\alpha$  (от 1,2 до 7,8 градусов). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 50 % изменчивости угла  $\alpha$  (от 2,2 до 6,2 градусов). Это показывает, что влияние параметра  $m_1 = h_0/h_1$  практически в два раза сильнее, чем влияние параметра  $m_2 = S_{cm}/S_3$ .

Для переднего конца значения коэффициентов корреляции между параметрами  $m_1$ ,  $m_2$  и углом наклона боковой грани замкового элемента  $\alpha$  равны 0,6 и  $-0,5$  соответственно. Изменением параметра  $m_1$  объясняется 63 % изменчивости угла  $\alpha$  (от 0,2 до 5,2 градусов). Изменением параметра  $m_2$  объясняется 60 % изменчивости угла  $\alpha$  (от 0,0 до 4,8 градусов). Это показывает, что влияние параметров  $m_1 = h_0/h_1$  и  $m_2 = S_{cm}/S_3$  на угол  $\alpha$  равны.

## ВЫВОДЫ

Установлено значительное различие в формоизменении переднего конца полосы от средней части полосы.

Показано различное влияние обжатия и соотношения площадей на коэффициенты формоизменения переднего конца полосы (неустановившемся процессом) и средней части полосы (установившемся процессом).

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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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. Мутьев М. С. Определение утяжки и вынужденного уширения при прокатке [В кн. : Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. ] / М. С. Мутьев; ДМетИ. – М. : Металлургиздат, 1952. – С. 156–158.
3. Мутьев М. С. Калибровка черновых валков / М. С. Мутьев – Москва: изд. «Металлургия», 1964. – 189 с.
4. Мутьев М. С. О разбивке калибра на элементы при прокатке с неравномерным обжатием / М. С. Мутьев // Технический прогресс в технологии прокатного производства : труды конференции 12–15 мая 1959 г. – Свердловск : Metallurgizdat, 1960. – С. 290–303.
5. Мельник С. Н. Развитие метода расчета калибровки валков для прокатки крупных шпунтовых профилей: дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук : 05.03.05 / Мельник Сергей Николаевич. – Днепродзержинск, 2007. – 266 с.
6. 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.
7. 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.

Ершов С. В. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ;

Мельник С. Н. – канд. техн. наук, гл. калибровщик ПАО «ДМКД»;

Мосьпан В. В. – техн. директор ПАО «ДМКД»;

Гаврилин С. Ю. – аспирант ДГТУ;

Дудка Р. М. – рук. произв. практики ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,  
г. Днепродзержинск.

ПАО «ДМКД» – Публичное акционерное общество «Днепровский металлургический комбинат им. Ф. Э. Дзержинского», г. Днепродзержинск.

E-mail: sgavrilyn@gmail.com

Статья поступила в редакцию 07.02.2012 г.