

УДК 621.721.01

С. В. ЕРШОВ, докт. техн. наук, проф., ДГТУ, Днепродзержинск;
С. Ю. ГАВРИЛИН, ассистент, ДГТУ, Днепродзержинск;
С. Н. МЕЛЬНИК, канд. техн. наук, гл. калибровщик, ПАО ДМКД,
 Днепродзержинск.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОКАТКЕ ФАСОННОЙ ПОЛОСЫ В ФОРМИРУЮЩЕМ ШПУНТОВОМ КАЛИБРЕ

Шпунтовые сваи работают как консольные балки, нагруженные рассредоточенными силами. Основную нагрузку воспринимает полотно профиля. Суммарное воздействие сил создаёт изгибающий момент, под действием которого сваи могут деформироваться. Это приводит к разъединению свай в замковых элементах. Поэтому при производстве шпунтов особое внимание уделяют выполнению замковых элементов.

Ключевые слова: деформация, калибр, замковой элемент, формоизменение

Введение. На сегодняшний день растет тенденция уплотненной застройки и также реконструкция сооружений вблизи существующих зданий, подземных коммуникаций, что приводит к сокращению затрат на инфраструктуру. Использование шпунтового ограждения является одной из основных мер по предотвращению осадки фундамента близстоящих зданий при стесненном гражданском и промышленном строительстве.

Большим спросом пользуется шпунтовое ограждение с использованием металлического профиля шпунтовой сваи типа «Ларсен». Данный профиль, представляет собой П-образный контур с замковыми элементами на краях боковых стоек (фланцах).

Анализ последних исследований и литературы. На сегодняшний день существует несколько технологий производства профиля шпунтовой сваи типа «Ларсен»:

- 1) прокатка в двухвалковых клетях (ДМКД, Украина);
- 2) прокатка в двухвалковых и универсальных клетях (НТМК, РФ);
- 3) прокатка в двухвалковых клетях с последующей прокаткой-гибкой в непрерывной группе клетей типа «Тандем» (ArcelorMittal Steel, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation).

Отличие данных технологий проявляется в различном выборе исходной заготовки в зависимости от необходимого профилиразмера и схемы прокатки [1–4]: $B_0 > H_0$, $H_0 < B_0$, фасонный подкат, непрерывно литой балочный подкат. Как правило, прокатка ведется в 9–12 калибрах за 11–17 пропусков.

Общность данных технологий заключается в схожести калибров по назначению. По назначению калибры можно разделить в следующей последовательности: первые 3÷5 калибров – для формирования П – образного подката с утолщением на концах полок для последующего формирования замковых элементов; следующие 5÷6 калибров для утонения стенки, полок и

начального формирования замковых элементов, последние 1÷2 для окончательного формирования замкового элемента методом гибки.

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

В работе [4] автор относит шпунтовую сваю типа «Ларсен» к группе профилей с вертикальной осью симметрии и отогнутыми краями. В работах [6–7] авторы акцентируют внимание на назначение первых формирующих калибров, а именно, симметричную разрезку металла и равномерное накопление его в концах полок раската. В работах [8–9] были рассмотрены особенности заполнения сложного разрезного калибра, влияние защемления на формоизменение металла, получены данные, связывающие коэффициент обжата и соотношения площадей с параметрами деформированного состояния. Авторами работы [10] сопоставлены экспериментально и теоретически полученные картины течения металла в формирующих калибрах. В работе [11] проведен экспериментальный анализ формоизменения металла на различных этапах заполнения металлом очага деформации.

Описанные исследования проводились для профилей с базой профиля $B_{\text{п}}=500$ мм (ширина готового профиля). Появление новых конструкций профиля шпунтовой сваи типа Ларсен ($B_{\text{п}} > 500$ мм) приводит к изменению соотношений площадей между элементами профиля, что в свою очередь приводит к необходимости разработки новых методов расчёта калибровки валков, особенно в первых разрезных и черновых калибрах.

Цель исследования, постановка проблемы. Целью работы является определение влияния формы и размеров калибра на величину коэффициентов деформации при прокатке фасонной полосы в формирующих шпунтовых калибрах для новых конструкций профиля шпунтовой сваи типа Ларсен с $B_{\text{п}} \geq 500$ мм.

Материалы исследований. Для определения влияния формы и размеров калибра на величину коэффициентов деформации при прокатке в шпунтовых формирующих калибрах было проведено планируемое теоретическое исследование, которое реализовано при помощи математической модели, общая методика которой изложена в работе [12]. Теоретический расчет выполнялся при помощи программного пакета ESV Deform, разработанного на кафедре ОМД ДГТУ, который в качестве математического аппарата использует метод конечных элементов для аппроксимации полей скоростей течения металла и вариационный принцип механики сплошных сред. За основу были взяты параметры прокатки в формирующем калибре при производстве шпунтовой сваи Л5Д ($B_{\text{п}} = 500$ мм, $B_{\text{кн}} = 445$ мм): $V = 4,4$ м/с; $T = 1050^{\circ}$ С; $D_{\text{maxB}} = 1200$ мм, $D_{\text{maxH}} = 616$ мм. Характерные размеры заготовки, раската и калибра представлены на рис.

В качестве независимых параметров геометрического очага деформации при планировании эксперимента были приняты следующие безразмерные величины:

$$m_1 = \eta = \frac{h_1}{h_0}, \quad m_2 = \frac{B_{grn} - B_{grv}}{h_{gr}}, \quad m_3 = \frac{B_{kn} - B_{kv}}{h_k} \times \frac{h_{z0}}{B_{zn} - B_{zv}}$$

где m_1 – коэффициент обжатия (отношения толщины стенки после деформирования к толщине стенки задаваемого подката);

m_2 – коэффициент формы гребня нижнего ручья (отношение разности ширин оснований гребня к его высоте);

m_3 – коэффициент учитывающий защемление (отношение угла наклонной части калибра к углу наклона полки задаваемого подката).

Пределы варьирования факторов ограничили следующими величинами:

$$0.83 \leq m_1 \leq 0.98; \quad 0.54 \leq m_2 \leq 1.06; \quad 0.44 \leq m_3 \leq 0.9$$

Толщина заготовки была принята равной $h_0 = 200$ мм.

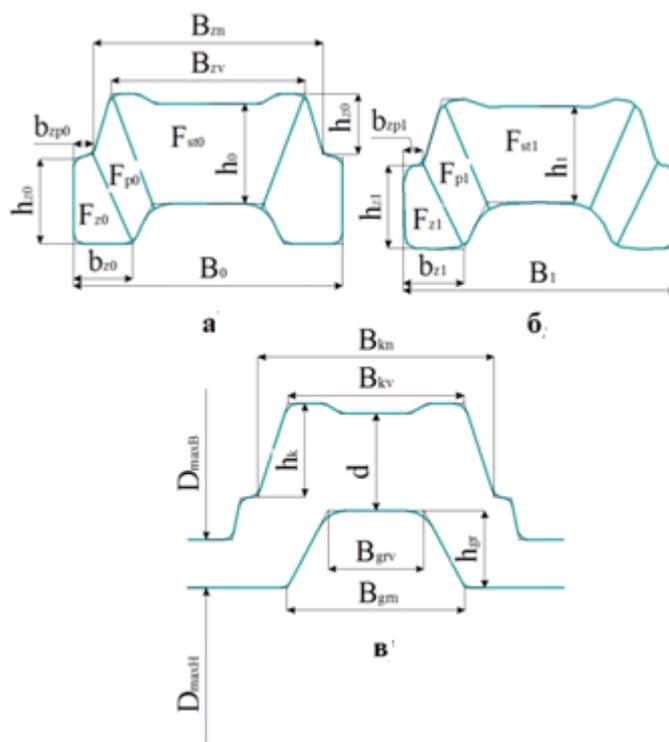


Рис. – Схема расстановки размеров: а – заготовка; б – раскат; в – калибр.

Размеры образцов и калибров для каждого опыта, а также расчетные величины коэффициентов формоизменения приведены в таблицах 1–4:

Таблица 1. Матрица планирования эксперимента

№	X ₁	X ₂	X ₃	m ₁	m ₂	m ₃
1	+	+	+	0,98	1,06	0,90
2	-	+	+	0,83	1,06	0,90
3	+	-	+	0,98	0,54	0,90
4	-	-	+	0,83	0,54	0,90
5	+	+	-	0,98	1,06	0,44
6	-	+	-	0,83	1,06	0,44
7	+	-	-	0,98	0,54	0,44
8	-	-	-	0,83	0,54	0,44

Таблиця 2. Розміри образців до деформування

№	h_0 , мм	h_{z0} , мм	b_{z0} , мм	b_{zp0} , мм	B_0 , мм	F_{st0} , мм ²	F_{p0} , мм ²	F_{z0} , мм ²
1	200	169,6	117,5	39	10,0	62010	15660	13679
2	200	169,6	117,5	39	10,0	62010	15660	13679
3	200	169,6	117,5	39	20,0	62010	15660	13679
4	200	169,6	117,5	39	20,0	62010	15660	13679
5	200	169,6	117,5	39	15,0	62010	15660	13679
6	200	169,6	117,5	39	15,0	62010	15660	13679
7	200	169,6	117,5	39	25,0	62010	15660	13679
8	200	169,6	117,5	39	25,0	62010	15660	13679

Таблиця 3. Розміри образців після деформування

№	h_1 , мм	h_{z1} , мм	b_{z1} , мм	b_{zp1} , мм	B_1 , мм	F_{st1} , мм ²	F_{p1} , мм ²	F_{z1} , мм ²
1	195,00	131,9	110,6	30	532,9	49907,31	20496,68	9705,15
2	165,00	128,1	96,59	34,48	534,8	45549,15	19745,03	8402,34
3	195,00	114,1	92,37	32,15	538	62226,68	12198,57	6680,14
4	165,00	107,1	97,06	34,42	537,98	50979,31	13911,32	6307,22
5	195,00	144,38	104,98	60,83	530	44747,4	15211,06	11485,24
6	165,00	133	97,5	61	532	41762,19	15088,2	9802,8
7	195,00	127,8	96,76	63	536	52441,54	9092,47	9616,44
8	165,00	112,2	96,4	54,5	532	49794,88	9294,71	8103,08

Таблиця 4. Розміри калібра

№	B_{gm1} , мм	B_{grv1} , мм	h_{gr1} , мм	B_{kv1} , мм	B_{kn1} , мм	h_{k1} , мм
1	354,00	190,00	155,00	350,00	470,00	187,00
2	354,00	190,00	155,00	350,00	470,00	187,00
3	354,00	270,00	155,00	350,00	470,00	187,00
4	354,00	270,00	155,00	350,00	470,00	187,00
5	354,00	190,00	155,00	350,00	409,00	187,00
6	354,00	190,00	155,00	350,00	409,00	187,00
7	354,00	270,00	155,00	350,00	409,00	187,00
8	354,00	270,00	155,00	350,00	409,00	187,00

Таблиця 5. Розрахункові величини коефіцієнтів формозмінення

№	λ_{cp}	k_{fl}	η_z	β_z	β_{zp}	β	λ_{st}	λ_z	\square_p
1	1,094	0,910	0,778	1,062	1,300	1,004	1,243	1,409	0,764
2	1,185	0,998	0,755	1,216	1,131	1,000	1,361	1,628	0,793
3	1,207	0,947	0,673	1,272	1,213	0,994	0,997	2,048	1,284
4	1,320	0,999	0,631	1,211	1,133	0,994	1,216	2,169	1,126
5	1,230	0,874	0,851	1,119	0,641	1,009	1,386	1,191	1,030
6	1,318	0,982	0,784	1,205	0,639	1,006	1,485	1,395	1,038
7	1,343	0,892	0,754	1,214	0,619	0,998	1,182	1,422	1,722
8	1,427	0,995	0,662	1,219	0,716	1,006	1,245	1,688	1,685

Результати дослідження. В результаті обробки експериментальних даних отримали регресійні залежності:

$\beta = 1 + 0,013 \cdot m_2 - 0,014 \cdot m_3$ ($R = 0,89$; $\sigma = 0,03$) – коефіцієнт уширення полоси $\beta = B_1/B_0$;

где R – коэффициент множественной корреляции,

σ – стандартная ошибка оценки модели.

$\beta_z = 1,58 - 0,15 \cdot m_2$ ($R = 0,73$; $\sigma = 0,06$) – коэффициент уширения полосы по нижней кромке замка $\beta_z = b_{z1}/b_{z0}$;

$\beta_{zp} = -0,112 - 1,18 \cdot m_3$ ($R = 0,98$; $\sigma = 0,07$) – коэффициент уширения полосы по верхней кромке замка $\beta_{zp} = b_{zp1}/b_{zp0}$;

$\eta_z = 0,3 + 0,37 \cdot m_1 + 0,21 \cdot m_2 - 0,11 \cdot m_3$ ($R = 0,98$; $\sigma = 0,02$) – коэффициент обжатия полосы по замку $\eta_z = \eta_{z1}/\eta_{z0}$;

$k_{f1} = 1,46 - 0,58 \cdot m_1$ ($R = 0,97$; $\sigma = 0,02$) – коэффициент заполнения металлом верхнего ручья $k_{f1} = h_1/d$;

$\lambda_{cp} = 2,199 - 0,627 \cdot m_1 - 0,227 \cdot m_2 - 0,279 \cdot m_3$ ($R = 0,99$; $\sigma = 0,01$) – коэффициент средней вытяжки полосы $\lambda_{cp} = F_{cp0}/F_{cp1}$;

$\lambda_p = 2,345 - 1,061 \cdot m_2 - 0,824 \cdot m_3$ ($R = 0,97$; $\sigma = 0,10$) – условный коэффициент вытяжки полосы по полке $\lambda_p = F_{p0}/F_{p1}$;

$\lambda_{st} = 1,868 - 0,834 \cdot m_1 + 0,403 \cdot m_2 - 0,263 \cdot m_3$ ($R = 0,97$; $\sigma = 0,04$) – условный коэффициент вытяжки полосы по стенке $\lambda_{st} = F_{st0}/F_{st1}$;

$\lambda_z = 2,922 - 0,824 \cdot m_2 + 0,851 \cdot m_3$ ($R = 0,96$; $\sigma = 0,12$) – условный коэффициент вытяжки полосы по замку $\lambda_z = F_{z0}/F_{z1}$.

Проверка адекватности формул по критерию Фишера показала, что эти модели адекватно описывают процесс формоизменения при прокатке в первых формирующих калибрах в диапазоне исследованных независимых параметров. Дополнительно выполнены оценка частных корреляций (табл. 5), а также количественная оценка взаимного влияния между функциями отклика и независимыми параметрами (табл. 6).

Таблица 6. Оценка корреляции между независимыми параметрами и функциями отклика

	\square_{cp}	k_{f1}	\square_z	\square	\square_z	\square_{zp}	\square_{st}	\square_z	\square_p
m1	-0,48	-0,91	0,40	0,00*	-0,42	0,07*	-0,45	-0,32*	0,06*
m2	-0,59	-0,18*	0,81	0,64	-0,63	0,01*	0,75	-0,67	-0,80
m3	-0,65	0,29*	-0,38*	-0,62	0,01*	0,98	-0,43	0,61	-0,55

* – параметры статистически не значимы

Таблица 7. Количественная оценка взаимного влияния независимых параметров от функций отклика

	\square_{cp}	k_{f1}	\square_z	\square	\square_z	\square_{zp}	\square_{st}	\square_z	\square_p
m1	-33%	-68%	27%		-40%		-27%		
m2	-33%		52%	40%	-38%		43%	-44%	-57%
m3	-36%			-46%		77%	-25%	41%	-40%

Уширение полосы β :

Увеличение m_2 приводит к увеличению коэффициента уширения β_{11} ;

Увеличение отношения m_3 приводит к уменьшению коэффициента уширения β ;

Параметр m_1 статистически не значим.

Уширение по нижней кромке замковых элементов β_z :

Увеличение параметра m_1 приводит к уменьшению коэффициента уширения β_z ;

Увеличение параметра m_2 приводит к уменьшению коэффициента уширения β_z ;

Параметр m_3 статистически не значим.

Уширение по верхней кромке замковых элементов β_{zp} :

Параметр m_1 статистически не значим;

Параметр m_2 статистически не значим;

С увеличением параметра m_3 возрастает β_{zp} .

Средняя вытяжка полосы λ_{cp} :

Увеличение параметра m_1 приводит к уменьшению λ_{cp} ;

Увеличение параметра m_2 приводит к уменьшению λ_{cp} ;

Увеличение параметра m_3 приводит к уменьшению λ_{cp} .

Условная вытяжка полосы по стенке λ_{st} :

Увеличение параметра m_1 приводит к уменьшению λ_{st} ;

Увеличение параметра m_2 приводит к увеличению λ_{st} ;

Увеличение параметра m_3 приводит к уменьшению λ_{st} .

Условная вытяжка полосы по замку λ_z :

Параметра m_1 статистически не значим;

Увеличение параметра m_2 приводит к уменьшению λ_z ;

Увеличение параметра m_3 приводит к увеличению λ_z .

Условная вытяжка полосы по полке λ_p :

Параметра m_1 статистически не значим;

Увеличение параметра m_2 приводит к уменьшению λ_p ;

Увеличение параметра m_3 приводит к увеличению λ_p .

Коэффициент обжатия полосы по замку η_z :

Увеличение параметра m_1 приводит к увеличению η_z ;

Увеличение параметра m_2 приводит к увеличению η_z .

Параметр m_3 статистически не значим.

Коэффициент заполнения верхнего ручья по высоте k_{f1} :

Увеличение параметра m_1 приводит к уменьшению k_{f1} ;

Параметр m_2 статистически не значим.

Параметр m_3 статистически не значим.

Выводы. Выполнено теоретическое исследование течения металла при прокатке фасонной полосы в формирующем шпунтовом калибре. Получены новые зависимости для определения коэффициентов вытяжки, уширения, утяжки и заполнения металлом верхнего ручья, которые могут быть рекомендованы для разработки калибровок профилей шпунтовой свай типа Ларсен с базой больше 500 мм.

1. Уширение полосы можно корректировать параметром m_2 и параметром m_3 в равных пропорциях.

2. На уширение нижней кромки можно влиять только параметром m_2 .

3. На уширение верхней кромки можно влиять только параметром m_3 .

4. Вытяжку стенки можно корректировать всеми параметрами. Параметром m_2 в большей степени, чем параметрами m_1 и m_2 .

5. Вытяжку замкового элемента можно корректировать только параметрами m_2 и m_3 .

6. Вытяжку полок можно корректировать только параметрами m_2 и m_3 . Параметром m_3 в большей степени.

7. Среднюю вытяжку полосы можно корректировать всеми параметрами.

8. Заполнением верхнего ручья по высоте можно корректировать только параметром m_1 .

9. Утяжку замковых элементов можно корректировать параметрами m_1 и m_2 . Параметром m_2 в большей степени.

Список литературы: 1. Пат. GB2121334A Великобритания, Метод калибровки валков шпунтовой свай / Kanichi Kishikawa; Kazuo Watanabe; Hideki Tokita; Taneharu Nishino / заявитель и владелец Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, заявл.23.03.1978, опубл.29.03.1978. 2. Пат USP 4334419 США, Метод калибровки фасонных профилей с получением хорошего качества фланцев. Kanichi Kishikawa; Kazuo Watanabe; Hideki Tokita; Taneharu Nishino / заявитель и владелец Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, заявл.23.03.1978, опубл.29.03.1978. 3. Пат USP 4334419 США, Метод калибровки и реконструкции рельсового стана для производства шпунтовых свай. Dietmar Kosak, Neuss; Georg Engel, Kaarst./ заявитель и владелец SMS Schloemann-Siemag, заявл.24.12.1986, опубл.24.12.1987. 4. *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. 6. *Ершов С.В.* Анализ производства крупных фасонных профилей с верти-кальной осью симметрии и отогнутыми краями / С.В. Ершов, С. Н. Мельник, В. В. Мосьпан, С. Ю. Гаврилин // Сб. науч. тр. – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2012. – № 2(17) – С 75–80. 7. *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. 8. *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. 9. *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 10. *Ершов С.В.* Экспериментальное и теоретическое исследование течения металла при прокатке фасонной полосы в черновом шпунтовом калибре / С. В. Ершов, С. Н. Мельник, С. Ю. Гаврилин // Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – №47(953) – С.115 – 121. 11. *Ершов С.В.* Экспериментальное исследование течения металла при прокатке фасонной полосы в черновом шпунтовом калибре / С. В. Ершов, С. Н. Мельник, С. Ю. Гаврилин // *Обработка металлов давлением: сб. науч. трудов.* – Краматорск: ДГМА, 2012. – №4(33) – С.153 – 156 12. *Илюкович Б.М.* Теоретические основы обработки металлов давлением. В 2 т. Том 2. / Б.М. Илюкович, А.П. Огурцов, Н.Е. Нехаев, С.В. Ершов – Днепропетровск: РИА «Днепр-ВАЛ», 2002.- 485 с.

Надійшла до редколегії 05.11.2013

УДК 621.721.01

Теоретическое исследование формоизменения металла при прокатке фасонной полосы в формирующем шпунтовом калибре / Ершов С. В., Гаврилин С.Ю, Мельник С. Н. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія Нові рішення в сучасних технологіях – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 42 (1015). – С. 55-62. Бібліогр.: 12 назв.

Шпунтові палі працюють як консольні балки, навантажені розосереджених-ми силами. Основне навантаження сприймає полотно профілю. Сумарне від дії сил створює вигинає момент, під дією якого палі можуть деформуватись. Це призводить до роз'єднання паль у замкових елементах. Тому при виробництві шпунтів особливу увагу приділяють виконанню замкових елементів..

Ключові слова: деформація, калібр, замкової елемент, формоїзмененіє

Sheet piles act as cantilever beams, loaded dispersal of E-forces. Most of the load profile perceives canvas. The total action of a force creates a bending moment, under the influence of which the piles can deform. This leads to the separation of piles interlocking elements. Therefore, in the manufacture of sheet piling pay special attention to the implementation of locking elements.

Keywords: strain gauge element of the castle, forming

УДК.621.771.63

А. С. ЗАБАРА, аспірант, НТУ «ХПІ»

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ЗАМКНУТОГО СЕЧЕНИЯ

В статье разработана методика расчета калибровок валков для изготовления замкнутых гнутых профилей замкнутого сечения методом осадка трубной заготовки, обеспечивающая получение качественных профилей, с одинаковыми радиусами закруглений мест изгиба поперечного сечения профилей.

Ключевые слова: гнутый профиль замкнутого сечения, калибровка, технология, осадка трубы.

Введение. Современный уровень развития гнутых профилей замкнутого сечения во всех отраслях экономики в Украине обуславливает высокие требования к качеству и надежности потребляемой продукции.

Выбор и расчет рациональной системы калибровки валков при изготовлении гнутых профилей замкнутого сечения имеют большое значение для получения качественной продукции.

Методика расчета калибровок валков должна обеспечить правильный выбор диаметра заготовки, рациональный режим профилирования, построение конфигурации калибров, гарантирующих точную задачу и необходимую деформацию.

Анализ последних исследований и литературы. Существуют относительно небольшое число промышленных способов изготовления гнутых профилей замкнутого сечения табл. [1]. Эти способы отличаются друг от друга технологией формовки.