

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Формообразование гнутых профилей: теория и практика. (2011 г.)

Сборник научных трудов

Ульяновск
УлГТУ
2011

УДК 621.981
ББК 22.251
Ф 53

УДК 621.981
Формообразование гнутых профилей: теория и практика.
Ф 53 (2011 г.) : сборник научных трудов / под науч. ред. д-ра техн. наук, профессора В. И. Филимонова. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 166 с.

В сборнике в основном представлены материалы статей научной школы «Формообразование гнутых профилей методом интенсивного деформирования», объединяющей сотрудников Ульяновского государственного технического университета, ОАО «Ульяновский НИАТ», ООО «Спецтехнология» (г. Ульяновск), НПО «ИДМ» (г. Ульяновск), которые одновременно являются соискателями ученой степени кандидата или доктора наук. Данный сборник трудов может заинтересовать научных работников, аспирантов и докторантов, а также может оказаться полезным технологам и конструкторам, работающим в области профилирования и создания профилировочного и профилегибочного оборудования.

Сборник подготовлен на кафедре «Материаловедение и обработка металлов давлением» УлГТУ.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ И СОПУТСТВУЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ.....	6
Урмацких А. В., Шемшурова Н. Г., Андрюхина Ю. С. Формообразование гнутых профилей с замкнутыми гофрами.....	6
Лапин В. В., Филимонов С. В. Ослабление углов подгибки полок при формовке профиля из упрочняющегося материала.....	12
Меньшенин А. А. Моделирование потери устойчивости полок профиля при его формообразовании.....	22
Марковцев В. А., Волков А. А. Моделирование формообразования в роликах широкополочных деталей с продольной кривизной.....	29
Филимонов С. В., Лапин В. В., Лапшин В. И. Критерий потери устойчивости подгибаемых полок при профилировании.....	41
2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ И КАЧЕСТВА ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ.....	50
Марковцев В. А., Филимонов В. И., Волков А. А. Технология и оборудование для производства гофрированных труб больших диаметров.....	50
Мищенко О. В., Лисин И. О. Оценка длины зоны плавного перехода при изготовлении профилей с отбортовками.....	63
Баранов А. С., Филимонов А. В., Карпов С. А. Проектирование технологии производства широкополочных профилей.....	66
Марковцев В. А., Илюшкин М. В., Дементьев К. С. Исследование схем формовки в роликах профиля «Стойка».....	74
Баранов А. С., Илюшкин М. В., Марковцева В. В. Устойчивость периферийных элементов при производстве тонкостенного профиля.....	84
Марковцев В. А., Волков А. А. Изменение радиусов формовки на промежуточных переходах и их влияние на параметры профиля.....	92
Марковцев В. А., Илюшкин М. В., Волков А. А. Формообразование несимметричных профилей на профилировочных станках.....	102
Филимонов С. В., Лапшин В. И., Лапин В. В. Формовка несущего профиля с элементами двойной толщины.....	110
3. КОНСТРУКЦИИ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ: КЛАССИФИКАЦИЯ, РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СБОРКА КОНСТРУКЦИЙ.....	118
Лапин В. В., Филимонов А. В. Технологичность гнутых профилей и узлов на их основе.....	118

Филимонов А. В., Лисин И. О. Классификационные признаки основных видов полужакрытых и закрытых гнутых профилей.....	126
Лисин И. О. Классификация и применение гнутых профилей закрытого типа, изготавливаемых методом интенсивного деформирования.....	130
4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, ВНЕДРЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ.....	136
Филимонов С. В., Лапшин В. И. Линии производства гнутых профилей.....	136
5. ОБЗОРЫ И ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ.....	146
Марковцев В. А., Филимонов В. И. Ресурсосберегающие технологии и оборудование для производства профилей и гофрированных панелей.....	146
Марковцева В. В. Применение гнутых профилей из материалов с покрытиями	153
Карпов С. А. Основные вопросы производства и применения гнутых профилей несимметричного сечения.....	158
Заключение.....	166

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий профилирования в г. Ульяновске восходит к началу 90-х годов 20 века. В 1982 году в Ульяновском политехническом институте была открыта лаборатория стесненного изгиба под руководством канд. техн. наук, доцента Проскурякова Глеба Васильевича, талантливого организатора науки и изобилующего идеями исследователя. Целью лаборатории было исследование процессов стесненного изгиба, разработка на их основе технологий и оборудования для мелкосерийного производства гнутых профилей преимущественно в области производства летательных аппаратов.

В апреле 1984 года лаборатория стесненного изгиба была передана в организованный в г. Ульяновске филиал НИИ авиационной технологии и организации производства (в дальнейшем «Ульяновский НИАТ») для более тесной связи науки и авиационного производства.

Метод стесненного изгиба, предложенный Г. В. Проскуряковым, предусматривает формовку в роликах волнообразной заготовки с ее осадкой в последнем переходе для предотвращения утонения заготовки и сокращения числа переходов. По данной технологии были разработаны и внедрены технологические процессы, отраслевая нормативно-техническая документация и оборудование для изготовления стрингеров летательных аппаратов ИЛ-114, ИЛ-103, ТУ-334, БЕ-200, АН-140, АН-70.

Ограничения метода стесненного изгиба, в первую очередь, невозможность его применения для формовки многоэлементных профилей с элементами жесткости, привели к созданию метода интенсивного деформирования (1996 – 2003 гг.). Этому способствовала конъюнктура рынка, на котором в указанные годы было востребовано оборудование и технологии сложных профилей для строительства, машиностроения, автомобилестроения и других отраслей промышленности.

В начале 2010-х были созданы ООО «Спецтехнология» и НПО «Интенсивное деформирование материалов», специализирующиеся также в области разработки технологий интенсивного деформирования, основного и вспомогательного оборудования.

В настоящий сборник включены результаты исследований, выполненные сотрудниками указанных предприятий – разработчиков. Авторы статей сборника являются аспирантами или соискателями ученых степеней кандидата или доктора технических наук.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПРОФИЛИРОВАНИЯ И СОПУТСТВУЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ

УДК 621.771.63

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ С ЗАМКНУТЫМИ ГОФРАМИ

Урмацких А. В., канд. техн. наук, профессор Шемшурова Н. Г., Андрюхина Ю. С.

В соответствии с международными стандартами ИСО серии 9000 «Системы менеджмента качества», основное требование к выпускаемой продукции – наиболее полное удовлетворение потребительских требований, в том числе потенциальных. Одним из таких требований при эксплуатации гнутых профилей является повышение их прочностных свойств и жесткости конструкций, изготовленных из этих профилей, расширение сферы их использования.

Спрос на гнутые и гофрированные профили постоянно растет. Их производство в мире ежегодно увеличивается на 2,5%. В настоящее время, по данным Национальной ассоциации производителей стальных гнутых профилей, насчитывается более 110 производителей холодногнутых профилей. Общая установленная мощность всего профилегибочного оборудования на 2011 год – около 3,5 млн тонн в год. С учетом средней загруженности профилегибочного оборудования на уровне 25-30% от его мощностей, производство и потребление профилей оценивается в пределах 0,9-1,1 млн тонн в год. В России и странах СНГ гнутые профили составляют 2-3% от общего объема потребляемого металлопроката. Около 90% общего объема потребности в гнутых профилях представлено четырьмя основными металлопотребляющими отраслями: строительство – 29,5%; тяжелое, энергетическое и транспортное машиностроение – 27,1%; строительное, дорожное и коммунальное машиностроение – 19,9%; автомобильная промышленность – 12,7%. Потребность остальных отраслей составляет всего 10,8%.

Современные, легкие, прочные, гнутые профили выполняют одновременно несколько строительно-архитектурных задач и являются по существу сложными профильными конструкциями, которые наряду с повышенными характеристиками прочности, невысокой ценой и отличным качеством должны также обеспечивать высокую жесткость конструкции. Гофрированные листовые профили повышенной жесткости являются перспективными конструктивными элементами, позволяющими увеличивать несущую способность и снижать вес конструкций и сооружений. Расчеты показывают, что жесткость таких профилей в 3-5 раз выше, чем у аналогичных по размерам (т. е. длине, ширине, высоте гофров, толщине листа и марке стали) трапециевидных профилей.

Основным конструктивным элементом, создающим жесткость гнутого профиля, являются гофры. Большинство гофрированных листовых профилей выполняют с продольными сквозными гофрами, направленными вдоль листа. Продольная жесткость (несущая способность) такого профиля значительно

превышает его поперечную жесткость. Данный профиль рассчитывают как элемент со свободно опертыми концами и равномерно распределенной (или сосредоточенной) нагрузкой. Считают, что деформация кручения отсутствует, а контур поперечного сечения не изменяется в процессе нагружения. Значительное неравенство несущей способности гнутого листового профиля в двух взаимно перпендикулярных направлениях делает необходимым использование дополнительных элементов жесткости (таких как балки, обрешетки, прогоны), располагаемых перпендикулярно направлению гофров.

Одним из новых направлений повышения несущей способности гофрированных листовых профилей является увеличение длины горизонтальных и вертикальных элементов гофров за счет заполнения металлом пространства в основании гофров. Получается так называемый профиль с полузамкнутыми и замкнутыми гофрами (рис. 1). При этом несущая способность может быть увеличена более чем в пять раз. Рассматриваемые профили в сравнении с известными допускают меньший радиус изгиба в поперечном направлении, что объясняется большей длиной развертки профиля.

Технология профилирования листовых гнутых профилей с полузамкнутыми и замкнутыми гофрами основана на осадке высоких гофров (с отношением высоты гофра к его ширине не менее 1,5) в последних проходах профилегибочного стана [1]. Дальнейшее совершенствование данного процесса требует изучения закономерностей деформации гофров.

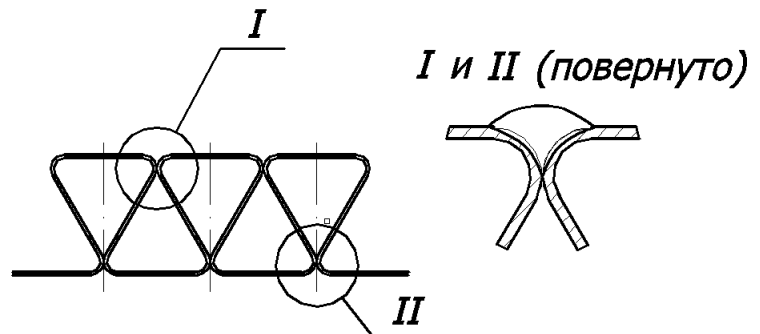


Рис. 1. Профиль с замкнутыми гофрами

Проанализируем особенности формоизменения высоких гофров при осадке плоскими пуансонами (рис. 2). Вследствие симметрии формы гофров исследуем только четверть гофра от точки A до C (рис. 2, а). Рас-

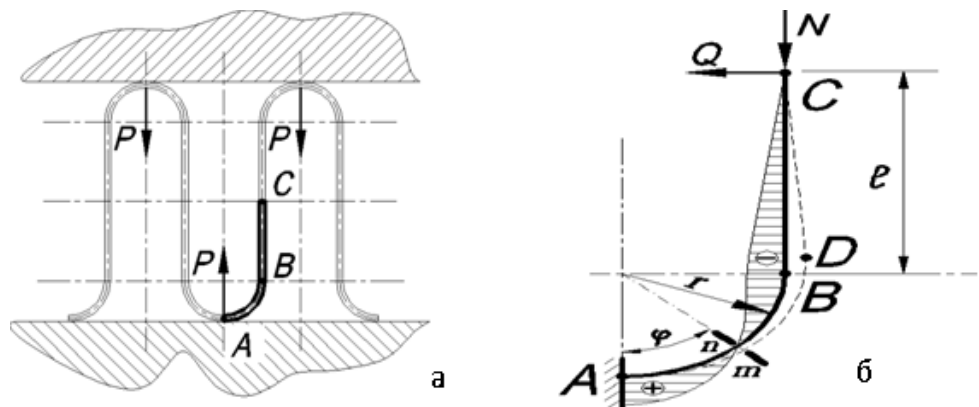


Рис. 2. Распределение изгибающих моментов по сечению гофра

пределение изгибающих моментов и упругое искривление гофра выделенного элемента под действием нагрузки показано пунктирной линией (рис. 2, б).

Данный элемент представим в виде кривого бруса постоянного поперечного сечения, который нижним концом A заделан, а на другом конце нагружен

вертикальной силой $N = P/2$ (см. рис. 2). Так как межгофровое расстояние при осадке гнутого профиля не изменяется, считаем, что точка C испытывает только вертикальные перемещения. В начале нагружения силой N выделенный элемент будет испытывать только упругие деформации. Горизонтальная сила в точке C $Q = k_1 P = 2k_1 N$, а изгибающий момент $M = k_2 Pr = 2k_2 Nr$, где k_1 и k_2 – числовые коэффициенты, зависящие от величины отношения l/r .

Кривая моментов (см. рис. 2, б) имеет два максимума – в точках A и B . Знак минус указывает на то, что изгибающие моменты в точке B стремятся увеличить кривизну гофра, а в точке A – уменьшить ее. На кривой AB есть участок, где изгибающий момент равен нулю.

В качестве примера рассмотрим случай, когда $l/r = 2$, тогда $k_1 = 0,0598$, $N = P/2$.

Изгибающий момент в каком-либо поперечном сечении $m-n$ для криволинейного участка

$$M = Nr(1 - \sin \varphi) - Qr \cos \varphi - Ql.$$

В точке A , где $\varphi = 0^\circ$, изгибающий момент $M = 0,6412Nr$.

В точке B изгибающий момент $M = 0,2356Nr$.

Изгибающий момент внешней силы уравнивается моментом внутренних сил. При упругом изгибе максимальный изгибающий момент внутренних сил [2]

$$M_{вн} = \sigma_T \frac{S^2 b}{6},$$

где $\frac{S^2 b}{6}$ – момент сопротивления при упругом изгибе; S – толщина профиля; B – ширина осаживаемого участка гофра.

При упругом изгибе распределение нормальных напряжений по сечению полосы можно представить в виде треугольника. В крайних, наиболее удаленных от оси полосы волокна нормальные напряжения достигают величины предела текучести σ_T .

По мере увеличения нагрузки и момента внешней силы глубина распространения пластической зоны по толщине полосы увеличивается. Нормальные напряжения на поверхности также возрастают в результате упрочнения металла. При этом кривая AB выделенного элемента гофра будет поворачиваться против часовой стрелки относительно точки, в которой возникла пластическая деформация, в результате чего произойдет перераспределение напряжений и в поперечном сечении полосы второй критической точки также начнется пластическая деформация.

Известно [3], что в сечении, соответствующем относительному радиусу изгиба $\bar{\rho} = r/S \leq 250$, напряжения и деформации на поверхности достигают предела текучести, при $\bar{\rho} = r/S \leq 125$ пластическая зона распространяется на всю толщину полосы в этом сечении, а при $\bar{\rho} = r/S \leq 5$ практически охватывает все сечение места изгиба.

В процессе увеличения нагрузки деформация элемента увеличивается, плоский участок гофра BC искривляется. Стрела прогиба переместится из точки B в точку D . В этой зоне происходит изгиб полосы, в результате чего относительный радиус кривизны изменяется от бесконечности до $\bar{\rho} \leq 125$, что связано с вовлечением в процесс деформации прямого участка гофра. Так как в точке A полоса закреплена и оперта на пуансон, то при деформации произойдет ее разгибание ($125 \leq \bar{\rho} \leq \infty$), что эквивалентно гибке прямого листа на данный радиус кривизны (принимая, что в исходном гофре остаточные напряжения отсутствуют). Таким образом, в точках A и B полоса находится в пластическом состоянии по всему сечению. В этом случае момент внутренних сил всего сечения полосы при изгибе [4]

$$M_{вн} = \sigma_T \frac{S^2 b}{4},$$

где $\frac{S^2 b}{4}$ – пластический момент сопротивления.

Как известно, при изгибе полосы прямоугольного сечения изгибающий момент при пластической деформации в 1,5 раза больше момента упругого изгиба. Это выражение не учитывает упрочнение металла при деформации.

При изгибе волокна, находящиеся на различном расстоянии от нейтрального слоя, получают разные деформации и действующие в них напряжения различны.

Более точное значение момента внутренних сил можно найти из выражения [5]

$$M_{вн} = \sigma_T \frac{S^2 b}{4} \left(1,5 + \frac{S}{2\rho} \right). \quad (1)$$

Здесь принято, что напряжения связаны с деформациями линейной зависимостью:

$$\rho = R_B k S,$$

где ρ – радиус кривизны нейтрального слоя; R_B – внутренний радиус места изгиба; k – коэффициент смещения нейтрального слоя:

$$k = \frac{\sqrt{(R_B + S)R_B} - R_B}{S} \quad [6].$$

Будем считать, что дальнейший изгиб полосы в точках A и B пойдет без увеличения момента внутренних сил. В сечениях, соответствующих этим точкам, образуется пластический шарнир и весь выделенный элемент ABC превратится в подвижную систему. При формоизменении данной системы под действием силы Q (рис. 3) происходит изгиб в точках A и B . Из рис. 3 следует, что $h_1 = l_1 \sin \alpha$; $h_2 = l_2 \sin \beta$; $\beta = \gamma - \alpha$.

Так как кривизна выделенного элемента в точках A и B одинакова и $\rho \geq 5$, то моменты внутренних сил в этих точках равны. Следовательно, изгибающие моменты внешних сил в этих точках также равны между собой ($M_A = M_B$):

$$M_A = Q h_1 = Q l_1 \sin \alpha; \quad M_B = Q h_2 = Q l_2 \sin \beta$$

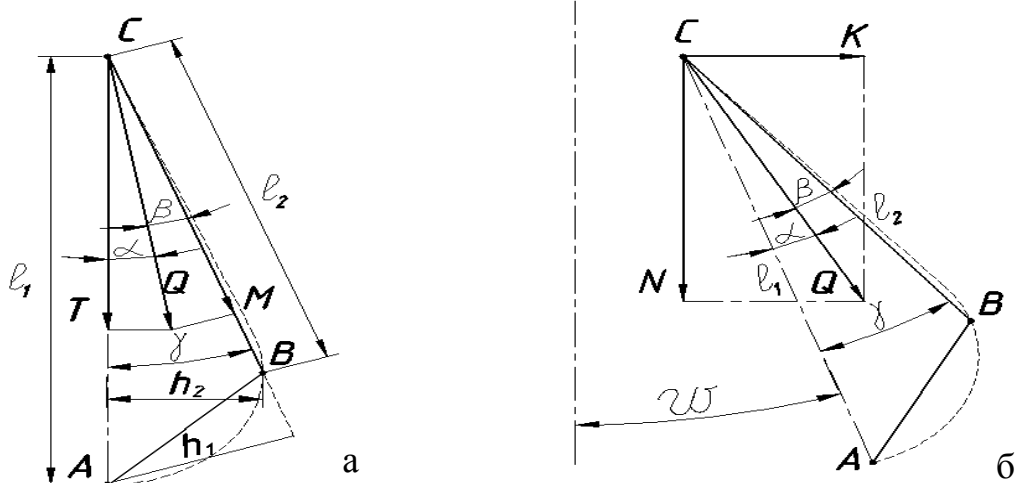


Рис. 3. Схема к определению усилия осадки гофра: а – сила T совпадает с направлением профилирования (частный случай); б – общий случай расположения выделенного элемента относительно оси гофра

Приравнявая первое и второе выражения, заменяя $\beta = \gamma - \alpha$ и сокращая подобные члены, получим

$$\ell_1 \sin \alpha = \ell_2 \sin (\gamma - \alpha) .$$

После преобразования получим

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\ell_1}{\ell_2 \sin \gamma} + \operatorname{ctg} \gamma . \quad (2)$$

Значения ℓ_1 , ℓ_2 и угол γ можно найти из геометрии профиля при осадке, угол α из выражения (2).

С другой стороны, момент внешних сил равен моменту внутренних сил. Тогда для точки A можно записать $M_A = M_{BH}$.

Но $M_A = Q h_1 = Q \ell_1 \sin \alpha$, а $M_{BH} = \frac{S^2 b}{4}$, и с учетом выражения (1) получим $Q = \sigma_T \frac{S^2 b}{4 \ell_1 \sin \alpha}$.

В общем случае угол, под которым действует суммарная сила Q по отношению к оси гофра, можно найти как сумму углов $\alpha + \omega$ (см. рис. 3, б).

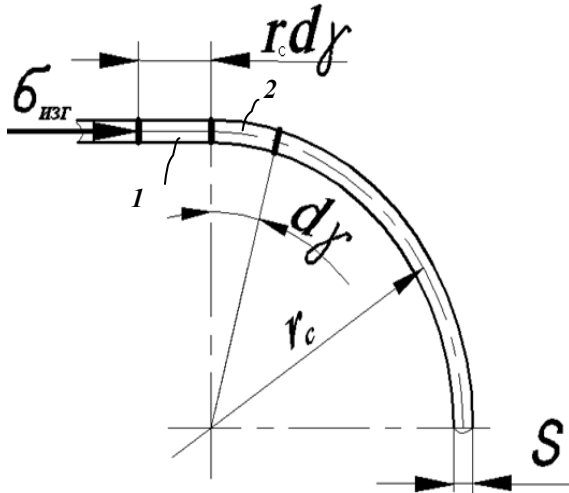
Силу Q можно разложить на две составляющие: силу N , параллельную к оси гофра, и K , перпендикулярную этой оси:

$$N = Q \cos(\alpha + \omega) = \sigma_T \frac{S^2 b}{4 \ell_1 \sin \alpha} \cos(\alpha + \omega) ;$$

$$K = Q \sin(\alpha + \omega) = \sigma_T \frac{S^2 b}{4 \ell_1 \sin \alpha} \sin(\alpha + \omega) .$$

Аналогичные выводы можно сделать для точки B .

Значение силы N можно найти путем измерения усилия осадки листового гнутого профиля.



Для точки B можно оценить отношение изгибающего напряжения $\sigma_{изг}$, вызывающего изгиб полосы, к напряжению текучести σ_T .

Согласно работе [4], при изгибе полосы шириной b (рис. 4) переход из положения 1 в положение 2 затрачивает работу, равную произведению силы на путь, т. е. $\sigma_{изг} b S r_c d\gamma$. Эта работа равна произведению изгибающего момента $M_{изг}$ на угол поворота оси $d\gamma$.

Рис. 4. Изгиб заготовки в точке B

Тогда

$$\sigma_{изг} S r_c b = \sigma_T \frac{S^2 b}{4}.$$

После преобразований получим

$$\frac{\sigma_{изг}}{\sigma_T} = \frac{1}{4\rho}.$$

Следовательно,
$$\frac{1}{500} \leq \frac{\sigma_{изг}}{\sigma_T} \leq \frac{1}{20}.$$

Таким образом, напряжения в точке B , приводящие к изгибу полосы, значительно меньше напряжения текучести металла, а деформация гофров происходит под действием изгибающих сил.

Как было сказано выше, при разработке технологии профилирования в качестве прототипа принята схема формовки ребристых профилей, в процессе профилирования которых применяют последовательную систему калибровки для получения промежуточной волнистой заготовки с последующей осадкой ее в последних клетях. Данная система калибровки обеспечивает меньшее утонение металла в местах изгиба, стабильность размеров по длине и сечению профиля, уменьшает вероятность образования волн на боковых кромках.

Для проверки возможности получения гофрированных листовых профилей повышенной жесткости из волнистой заготовки методом профилирования в ЛПЦ-8 ОАО «ММК» был изготовлен волнистый профиль [7]. Профилирование было проведено в чистовой группе клетей комплекта валков I-13 ПГС 1-4x50-300.

Изучение особенностей процесса формоизменения волнистой заготовки по длине и высоте очага деформации при его осадке проведено на недокате, полученном в результате остановки стана. Так как привод клетки осуществлялся только через нижний валок, профилирование вели с подпором профиля. При этом профиль не терял устойчивости.

На основании полученных данных и с учетом особенностей осадки волнистой заготовки в валках разработана схема формовки гофрированного про-

филя 360x27x1,5 мм на профилегибочном стане 0,5-2,5x300x1500 ЛПЦ-8 ОАО «ММК» [8].

Библиографический список

1. Урмацких, А. В. Гофрированные листовые профили повышенной продольной жесткости / А. В. Урмацких, В. Г. Антипанов, С. А. Шишов, Н. Г. Шемшурова и др. // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГТУ, 2005. – С. 118-128.
2. Сопротивление материалов. Том 1. Элементарная теория и задачи / под ред. С. П. Тимошенко. – М. ; Л., 1932. – С. 317-330.
3. Производство и применение гнутых профилей проката : справочник / под ред. И. С. Тришевского. – М. : Металлургия, 1975. – С. 55-56.
4. Громов, Н. П. Теория обработки металлов давлением / Н. П. Громов. – М. : Металлургия, 1967. – С. 324-325.
5. Ильин, Л. Н. Основы учения о пластической деформации / Л. Н. Ильин. – М. : Машиностроение, 1980. – 150 с.
6. Шемшурова, Н. Г. К определению коэффициента смещения нейтрального слоя полосы при профилировании / Н. Г. Шемшурова, В. Ф. Афанасьев, А. В. Авдоница, А. Н. Стефаненков // Известия вузов. Черная металлургия, 1999. – С. 27-28.
7. Патент 2360757 РФ, МПК В 21 D 13/10, В 21 D 5/06. Листовой гнутый профиль / Д. В. Куряев, А.В. Урмацких, Н. Г. Шемшурова. – Оpubл. 10.07.09. Бюл. № 19.
8. Шемшурова, Н. Г. Стальные гнутые профили / Н. Г. Шемшурова, Н. М. Локотунина, В. Г. Антипанов и др. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. – 286 с.



- **Урмацких Анатолий Васильевич**, инженер-конструктор ЛПЦ-8 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
- **Шемшурова Нина Георгиевна**, канд. техн. наук, профессор кафедры «Обработка металлов давлением» ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет им. Г. И. Носова»
- **Андрюхина Юлия Сергеевна**, студентка группы ТО-06 ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

УДК 621.981.1

ОСЛАБЛЕНИЕ УГЛОВ ПОДГИБКИ ПОЛОК ПРИ ФОРМОВКЕ ПРОФИЛЯ ИЗ УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА

Лалин В. В., канд. техн. наук Филимонов С. В.

Интенсивное формообразование гнутых профилей в роликах [1] на профилировочных станках предусматривает уменьшение числа переходов в

сравнении с традиционным профилированием за счет знакопеременной деформации подгибаемых полок профиля в отсутствие потери устойчивости элементов заготовки. Одним из существенных ограничений этой технологии является переформовка заготовки из-за больших углов подгибки элементов, при которых длина зоны плавного перехода (ЗПП) простирается за пределы предшествующего перехода. При проектировании технологии эффект переформовки заготовки далеко не всегда удается прогнозировать.

Целью данной работы является разработка модели ЗПП для упрочняющегося материала, позволяющая назначать такие предельные углы подгибки, которые не приводили бы к переформовке заготовки.

Отметим аналогичные попытки в этом направлении в предшествующий период. Известна модель Гуна-Полухина для формовки уголка из упрочняющегося материала [2], модель ЗПП Бхаттачария-Коллинза подгибки полки из неупрочняющегося материала [3], модель ЗПП при формообразовании швеллера из ортотропного неупрочняющегося материала с изменяющимся радиусомгиба угловых зон [4]. Сравнение и обсуждение указанных моделей приведено в работе [1], однако общим для них является то, что они не учитывают прогиб донной части профиля, проявляющийся при формовке широких профилей, а также изменение жесткости подгибаемой полки в случае формовки многоэлементных профилей.

Будем использовать вариационный метод, определив предварительно работу пластической деформации полки, угловой зоны и дна профиля. Рассмотрим подгибаемую полку приведенных размеров, смежную с дном профиля (рис. 1) на одном из технологических переходов, опустив индексацию переходов. Будем считать, что в данном переходе (скажем, k -м) угол подгибки равен θ_k , а в межклетьевом пространстве текущий угол подгибки является функцией $\theta(x_2)$. При этом следует иметь в виду, что к $(k-1)$ -му переходу суммарный угол подгибки будет составлять α_{k-1} , а к k -му переходу – $\alpha_k = \alpha_{k-1} + \theta_k$.

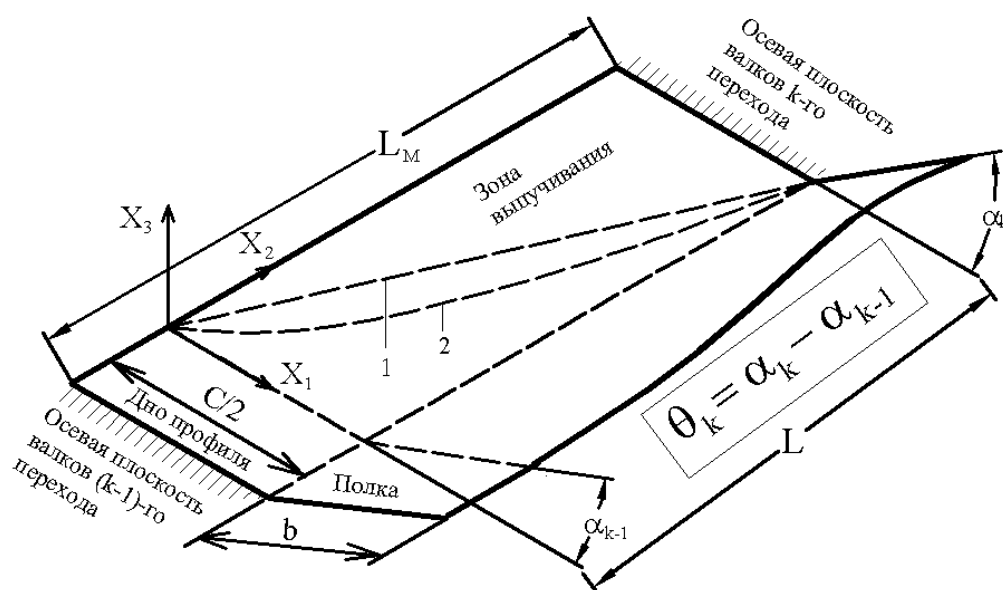


Рис. 1. Геометрия ЗПП и расположение локальной системы координат: 1 – аппроксимация реальной границы пластической области; 2 – реальная граница пластической области

При подгибке полки примем следующие допущения: 1) материал заготовки – несжимаемый, упрочняемый по степенному закону; 2) ширина полки не изменяется, а срединная поверхность полки описывается линейчатой поверхностью; 3) пренебрегаем сдвиговыми деформациями в плоскости полки; 4) пренебрегаем размерами угловой зоны в сравнении с шириной полки.

Уравнение срединной поверхности полки в выбранной системе координат будет иметь вид:

$$x_1 - \frac{C}{2} = v \cdot \cos \theta(u), \quad x_2 = u, \quad x_3 = v \cdot \sin \theta(u), \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3 – декартовы координаты; C – ширина донной части профиля; v, u – криволинейные координаты.

Вычислим предварительно деформации полки при подгибке, для чего найдем коэффициенты первой квадратичной формы [5] ее срединной поверхности, задаваемой уравнениями (1):

$$E = \frac{\partial x_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial u} = 1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial u} \right)^2; \quad F = \frac{\partial x_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial v} = 0; \quad G = \frac{\partial x_i}{\partial v} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial v} = 1, \quad (2)$$

где E, F, G – коэффициенты первой квадратичной формы.

Длина дуги dS в криволинейной системе координат дается выражением:

$$dS = \sqrt{E \cdot (du)^2 + 2F \cdot du \cdot dv + G \cdot (dv)^2}. \quad (3)$$

Продольная логарифмическая деформация e_u для точек, равноудаленных от зоны сгиба, с учетом формул (2 – 3) определяется соотношением ($dv = 0$):

$$e_u = \ln \left(\frac{dS|_{dv=0}}{du} \right) = \ln(\sqrt{E}) = \frac{1}{2} \cdot \ln E. \quad (4)$$

Логарифмическая деформация e_v в направлении координаты v с учетом соотношений (2 – 3) вычисляется по формуле:

$$e_v = \ln \left(\frac{dS|_{du=0}}{dv} \right) = \ln(\sqrt{G}) = 0. \quad (5)$$

Учитывая допущение о несжимаемости материала, на основании формул (4) и (5) получаем формулу для определения деформации по толщине полки:

$$e_n = -e_u - e_v = -e_u. \quad (6)$$

Интенсивность деформаций e_i с учетом формулы (6) можно найти согласно работе [6]:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \left(1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial \theta(u)}{\partial u} \right)^2 \right). \quad (7)$$

Удельную работу деформации полки $A_n^{y\partial}$ с учетом степенного упрочнения [7] можно получить интегрированием приращения удельной работы:

$$A_n^{y\partial} = \int \sigma_i \cdot de_i = \frac{1}{m+1} \cdot A \cdot e_i^{m+1} \approx \frac{A}{m+1} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot v^2 \cdot \left(\frac{\partial \theta(u)}{\partial u} \right)^2 \right]^{m+1}, \quad (8)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; A, m – параметры упрочнения; e_i – интенсивность деформаций, определяемая формулой (7).

Для вычисления удельной работы, связанной с формированием угловой зоны, следует сделать некоторые предварительные замечания. При использовании метода интенсивного деформирования схема формовки предусматривает постоянную величину радиуса зон сгиба на каждом из переходов, что вовсе не означает отсутствие энергетических затрат, идущих на формообразование этих зон. Во-первых, в каждой клетке происходит нагружение будущих угловых зон по крайней мере до уровня пластического состояния; во-вторых, размер угловых зон изменяется уже в межклетьевом пространстве вследствие изменения угла подгибки. Поэтому сформулируем допущения для угловой зоны:

1) принимается схема плоской деформации ($e_u = 0$); 2) радиус кривизны срединной поверхности остается постоянным практически на всех этапах деформирования; 3) работа деформирования сжатой зоны равна работе деформирования растянутой зоны; 4) элементарные площадки при изгибе сохраняют свои площади: $\alpha \cdot \rho \cdot d\rho = \alpha \cdot \rho_c \cdot d\rho_c$,

где $d\rho, d\rho_c$ – приращения радиусов кривизны вблизи произвольной точки и вблизи срединного слоя соответственно.

Координаты произвольной точки угловой зоны в межклетьевом пространстве задаются следующими соотношениями (рис. 2):

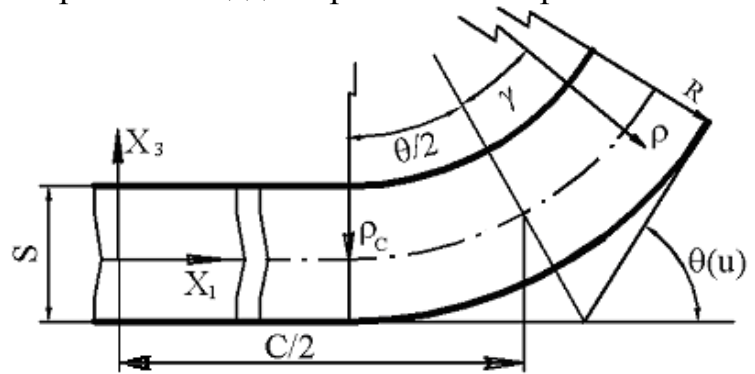


Рис. 2. Параметры угловой зоны

$$x_1 - \frac{C}{2} = \rho \cdot \sin\left(\frac{\theta(u)}{2} + \gamma\right) - \rho_c \cdot \sin\left(\frac{\theta(u)}{2}\right); \quad x_2 = u; \quad x_3 = \rho_c - \rho \cdot \cos\left(\frac{\theta(u)}{2}\right), \quad (9)$$

где ρ – текущий радиус; ρ_c – радиус срединной поверхности угловой зоны; γ – текущий угол, отсчитываемый от биссектрисы угла.

Для определения деформаций найдем предварительно коэффициенты первой квадратичной формы с учетом соотношений (9):

$$E = \frac{\partial x_i}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial \rho} = 1, \quad F = \frac{\partial x_i}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial \gamma} = \rho \cdot \sin(\theta + 2\gamma), \quad G = \frac{\partial x_i}{\partial \gamma} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial \gamma} = \rho^2. \quad (10)$$

Длина дуги для этого случая определяется формулой:

$$dS = \sqrt{E \cdot (d\rho)^2 + 2 \cdot F \cdot d\rho \cdot d\gamma + G(d\gamma)^2}. \quad (11)$$

Окружные логарифмические деформации с использованием зависимостей (10) и (11) вычисляются так:

$$e_\gamma = \ln\left(\frac{dS|_{d\rho=0}}{d\gamma \cdot \rho_c}\right) = \ln\left(\frac{\rho}{\rho_c}\right), \quad (12)$$

а радиальная компонента деформации с учетом третьего допущения вычисляется следующим образом:

$$e_\rho = \ln\left(\frac{dS|_{d\gamma=0}}{d\rho_c}\right) = \ln\left(\frac{\sqrt{(d\rho)^2 \cdot \rho_c}}{\rho \cdot d\rho}\right) = \ln\left(\frac{\rho_c}{\rho}\right). \quad (13)$$

Из формул (12 – 13) следует, что

$$e_\rho = -e_\gamma. \quad (14)$$

Принимая во внимание первое допущение и формулу (14), можно констатировать, что для угловой зоны условие несжимаемости также выполняется.

Следуя логике вычисления удельной работы формообразования полки, найдем удельную работу деформирования угловой зоны:

$$A_{yz}^{y\partial} = \frac{A}{m+1} \cdot e_i^{m+1} \left(\frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \ln\left(\frac{\rho}{\rho_c}\right) \right)^{m+1}. \quad (15)$$

При подгибке полки происходит передача в донную часть профиля сил, заставляющих ее выпучиваться и приходить в пластическое состояние, причем зона выпучивания обычно не простирается далее зоны плавного перехода. На рис. 1 показана пластическая зона донной части профиля, для которой разумными являются следующие допущения: 1) работа выпучивания мала в сравнении с работой пластического сжатия; 2) длина пластической области в донной части профиля равна протяженности зоны плавного перехода подгибаемой полки; 3) боковые границы пластической области в донной части профиля близки по форме к ветвям некоей параболы, которые могут быть аппроксимированы линейной зависимостью с углом подгибки в качестве аргумента.

В этом случае удельную работу пластического деформирования дна профиля можно представить соотношением:

$$A_\partial^{y\partial} = \frac{A}{m+1} \cdot e_{np}^{m+1}, \quad (16)$$

где e_{np} – величина предельной упругой деформации (минимальной пластической деформации).

Последующая задача состоит в определении полной работы пластической деформации полки, угловой зоны и донной части профиля.

Полная работа формообразования полки определяется на основе формулы (8), полученной с учетом разложения в ряд Тейлора логарифмической функции (7) с удержанием члена первого порядка малости.

$$A_n^{полн} = \int_0^L \int_0^b \int_0^S A_n^{y\partial} dS \cdot dv \cdot du = W \int_0^L \left(\frac{\partial \theta(u)}{\partial u} \right)^{2m+2} du, \quad (17)$$

где L – протяженность зоны плавного перехода; S – толщина заготовки.

В формуле (17) величина W дается следующей формулой:

$$W = \frac{A \cdot S \cdot b^{2m+3}}{(m+1)(2m+3)} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1}. \quad (18)$$

Полная работа пластического деформирования угловой зоны вычисляется с использованием формулы (17):

$$A_{y\varphi}^{полн} = 2 \int_0^b \int_{\rho_c}^R A_{y\varphi}^{y\partial} \cdot \rho \cdot d\rho \cdot du = \frac{2A}{m+1} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1} \cdot \int_{\rho_c}^R \left[\ln \left(\frac{\rho}{\rho_c} \right) \right]^{m+1} \cdot \rho \cdot d\rho \cdot \int_0^L \theta(u) du, \quad (19)$$

где R – радиус кривизны наружного контура зоны сгиба.

В формуле (19) подынтегральное выражение, содержащее логарифм, может быть разложено в ряд Тейлора с удержанием первого члена ряда:

$$\ln \sum_{i=1}^n \left[\frac{\left(\frac{\rho}{\rho_c} \right)^i}{i \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_c} \right)^i} \right] \approx \frac{\rho - \rho_c}{\rho}. \quad (20)$$

Анализ соотношения (20) при $\rho = R$ показывает, что второй и несколько последующих членов не превышают в сумме 10% от величины первого члена. Учитывая также, что m существенно меньше единицы, интеграл, содержащий логарифмическую функцию, после проведения интегрирования принимает следующее значение ($R \approx \rho_c + S/2$):

$$\int_{\rho_c}^R \left[\ln \left(\frac{\rho}{\rho_c} \right) \right]^{m+1} \cdot \rho \cdot d\rho \approx \frac{1}{m+1} \cdot \left(\frac{S}{2} \right)^{2+m}. \quad (21)$$

Принимая во внимание формулу (21), полная работа пластического деформирования угловой зоны обретает вид:

$$A_{y\varphi}^{полн} = Y \cdot \int_0^L \theta(u) \cdot du, \quad (22)$$

$$\text{где } Y = \frac{2A}{1-m^2} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1} \cdot \left(\frac{S}{2} \right)^{m+2}.$$

Полная работа пластического деформирования донной части профиля с учетом формулы (16) и допущения об аппроксимации границы пластической области принимает следующий вид:

$$A_o^{полн} = \int_0^L Z \cdot \theta(u) \cdot du, \quad (23)$$

$$\text{где } Z = \frac{A}{m+1} \cdot e_{np}^{m+1} \cdot S \cdot \eta \quad (\text{здесь } \eta = C/(2 \cdot \theta_k) \text{ согласно третьему допущению}).$$

Полная функция работ для правой половины профиля определяется на основе формул (17), (22) и (23):

$$A^{полн} = \int_0^L \left[W \cdot \left(\frac{\partial \theta(u)}{\partial u} \right)^{2m+2} + (Y + Z) \cdot \theta(u) \right] \cdot du. \quad (24)$$

Теперь надлежит решить вариационную задачу с подвижной границей:

$$\delta A^{полн} = \delta \int_0^L \xi(\dot{\theta}, \theta, u) \cdot du, \quad (25)$$

где ξ равно подынтегральной функции в формуле (24).

Решение задачи (25) сводится к интегрированию уравнения Эйлера [8]:

$$\frac{\partial \xi}{\partial \theta} - \frac{d}{du} \left[\frac{\partial \xi}{\partial \dot{\theta}} \right] = 0,$$

которое принимает следующий вид:

$$\frac{d \left(\dot{\theta} \right)^{2m+1}}{du} = \zeta, \quad (26)$$

где $\zeta = \frac{Y+Z}{W \cdot (2m+2)}.$

Решение дифференциального уравнения (26) в окончательном виде представляется функцией:

$$\theta(u) = D \cdot (\zeta \cdot u + C_1)^B + C_2, \quad (27)$$

где C_1, C_2 – константы, подлежащие определению.

Здесь $D = \frac{2m+1}{\zeta \cdot (2m+2)}, \quad B = \frac{2m+2}{2m+1}.$

Граничные условия для определения констант в решении (27) формулируются таким образом:

$$\theta(u)|_{u=0} = 0; \quad \frac{d\theta}{du} \Big|_{u=0} = 0.$$

После удовлетворения указанным граничным условиям решение (27) приобретает вид:

$$\theta(u) = D(\zeta \cdot u)^B. \quad (28)$$

Для определения протяженности ЗПП необходимо использовать условие $\theta(u)|_{u=L} = \theta_k$, откуда следует:

$$L = \left(\frac{\theta_k}{D} \right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{1}{\zeta}. \quad (29)$$

Рассмотрим предельные случаи для модели (29). Если положить $C = 0$ (при $Z = 0$), то получаем модель Гуна-Полухина для формовки уголка из упрочняющейся полосы [2]. Полагая $m = 0$ (неупрочняющийся материал заготовки), легко показать, что предлагаемая модель в точности совпадает с моделью Бхаттачария-Коллинза [3] и с моделью ЗПП при стесненном изгибе для случая формовки изотропной полосы с постоянным радиусомгиба и одинаковым средним диаметром формирующих роликов смежных переходов [4].

Рис. 3 иллюстрирует использование модели (29) применительно к изготовлению швеллерных профилей с шириной дна 50 и 100 мм из стали 08кп толщиной 1 мм при различных углах подгибки. Как видно из графиков, широкое дно профиля приводит к уменьшению длины ЗПП, что вполне согласуется с исследованиями прогибов донной части профилей в работе [1], где впервые было обращено внимание на эффект «ослабления» углов подгибки, связанный с прогибом дна профиля.

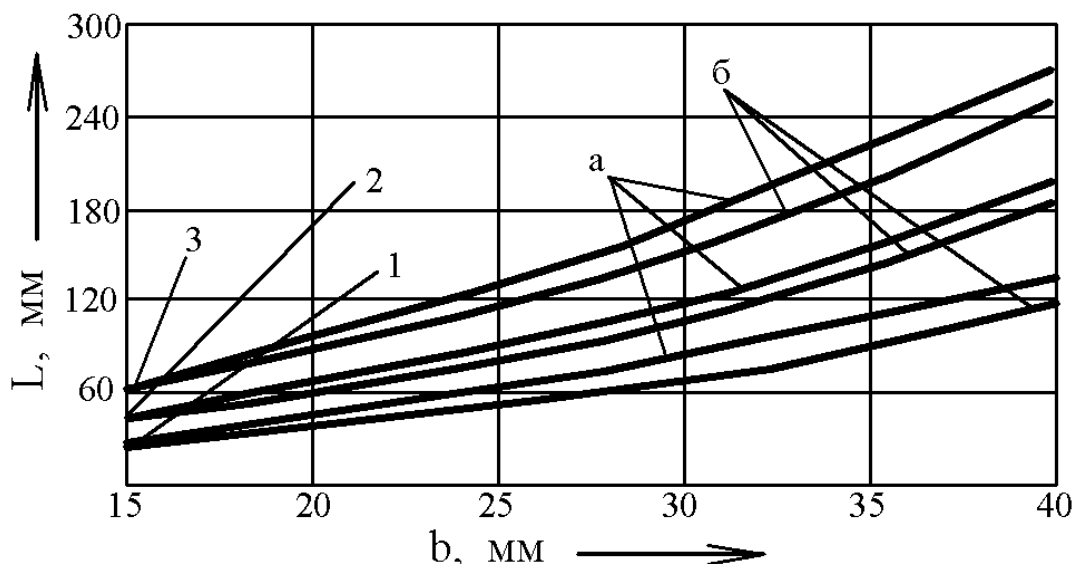


Рис. 3. Зависимость ЗПП от ширины полки: 1, 2, 3 – углы подгибки, равные 15°, 30° и 45° соответственно; а – $C = 50$ мм; б – $C = 100$ мм

На рис. 4 приведены модельные зависимости в сравнении с экспериментальными данными. Отсюда видно, что имеет место достаточно хорошая сходимость теоретических и опытных данных. Экспериментальные данные получены авторами по методике, описанной в работе [1], а данные, приведенные в работе [2], получены с применением тензометрирования (датчики наклеивались с двух сторон полосы во избежание влияния изгиба полки). Следует заметить, что сравнение протяженности ЗПП для различных технологий не всегда возможно: схемы формовки, диаметры катающих роликов и их конструкция, а также режимы формообразования могут отличаться, оказывая тем самым существенное влияние на исследуемый параметр. Даже межклетьевого расстояния профилировочного станка может оказывать некоторое влияние на данный параметр. Замечено, что при увеличении межклетьевого расстояния в два раза (незадействованная промежуточная клеть) длина ЗПП уменьшается на 2-5% для случая тонкостенных профилей типовой номенклатуры, что связано с прогибом не только донной части профиля, но и всего профиля в указанном промежутке.

Заниженное межклетьевого расстояние L_M профилировочного станка может ограничивать технологические возможности последнего. Как указывалось выше, при разработке технологии надлежит следить за тем, чтобы применяемые углы подгибки не выводили длину ЗПП за пределы межклетьевого расстояния, то есть должно выполняться условие: $L \leq L_M$.

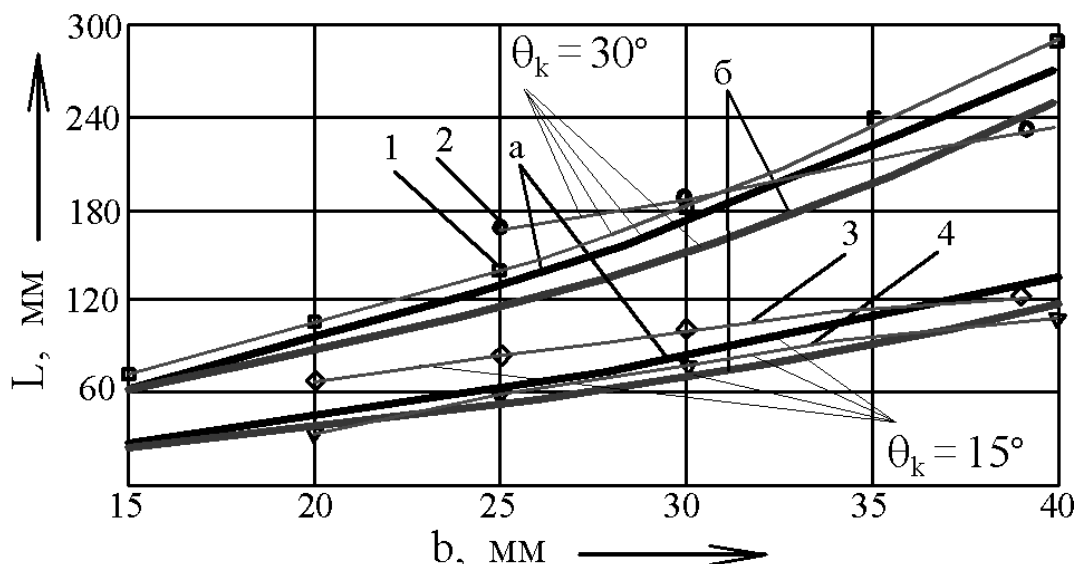


Рис. 4. Модель ЗПП в сопоставлении с опытными данными:

- экспериментальные данные авторов: 1 – сталь 08кп; $S = 0,6$ мм; $C = 0$;
4 – сталь 08кп; $S = 0,6$ мм; $C = 110$ мм;
- экспериментальные данные согласно работе [2]:
2, 3 – сталь 10; $S = 0,55$ мм; $C = 0$;
- расчетные данные согласно предлагаемой модели: а – сталь 08кп;
 $S = 0,55$ мм; $C = 50$ мм; б – сталь 08кп; $S = 0,55$ мм; $C = 100$ мм

Тогда предельный угол подгибки полки $\theta_k^{пред}$ за один технологический переход можно найти из трансцендентного уравнения:

$$\left(\frac{\theta_k}{D} \right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{1}{\zeta} - L_M = 0.$$

Таким образом, при разработке технологии должно учитываться условие:

$$\theta_k \leq \theta_k^{пред}, \quad (30)$$

где θ_k – угол подгибки, назначаемый в k -м переходе.

Однако условие (30) должно строго соблюдаться только при формовке уголков и профилей с узкой донной частью. Как видно на рис. 3 и 4, длина ЗПП профилей с широкой донной частью несколько меньше, чем узких профилей. Используя разработанную модель, можно получить количественную зависимость между углами «ослабления» и шириной дна профиля, используя программирование данной задачи, например, в среде MathCAD-2001 Pro.

Результаты работы такой программы приведены на рис. 5 и 6. Программа предусматривает вычисление длины ЗПП с базовым значением ширины дна C_6 ($C_6 \approx b$), затем образуется невязка между $L(C_6)$ и длиной ЗПП с заданным значением ширины дна. Невязка подвергается процедуре нахождения соответствующего угла подгибки и выводит в форме графика углы «ослабления», т. е. можно установить разность по углу, которая добавляется к углу подгибки в данном технологическом переходе (для формовки профиля с заданной шириной дна). При этом отсутствие переформовки гарантируется. Ясно, что увеличение углов подгибки в ряде переходов позволит уменьшить число переходов и ис-

пользовать малогабаритные профилировочные станки с небольшим числом клеток [1].

Отметим, что зависимость угла подгибки от координаты u (28) при необходимости анализа скоростного режима может быть сведена к зависимости угла подгибки от времени заменой $u = V \cdot t$. При этом возможным становится также определение продольной деформации полки в любой момент времени на основе формул (2), (4) и (28), а также интенсивности деформаций.

Наконец, при формовке многоэлементных профилей подгибаемая полка обладает большей жесткостью за счет «настройки», чем полка со свободным торцом. В этом случае необходимо учитывать жесткость элементов, которые несет основная полка. Учет изменения жесткости полки можно производить согласно следующей процедуре. Первоначально подсчитывается момент сопротивления полки на кручение на

уровне предшествующего перехода, а затем определяется толщина эквивалентной полки той же ширины со свободным торцом. Дальнейшие технологические расчеты с использованием предлагаемой модели не отличаются от описанной выше процедуры.

Таким образом, предлагаемая модель, учитывающая упрочнение металла и прогиб донной части профиля при формообразовании, позволяет устанавливать преимущество технологий формовки профилей с различной шириной донной части профиля. При этом также надлежит учитывать толщину заготовки, существенно влияющую на эффект «ослабления» углов подгибки.

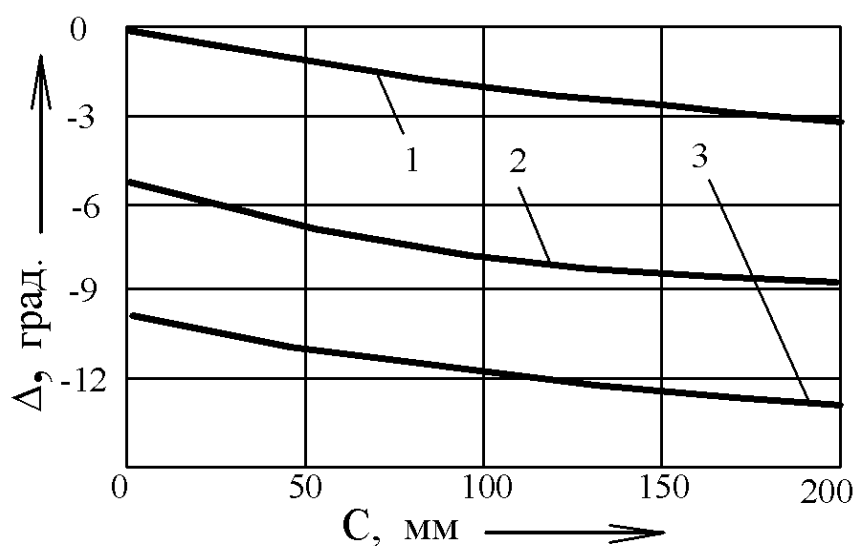


Рис. 5. Зависимость углов «ослабления» от ширины дна профиля: 1, 2, 3 – углы подгибки, равные 15°, 30° и 45° соответственно

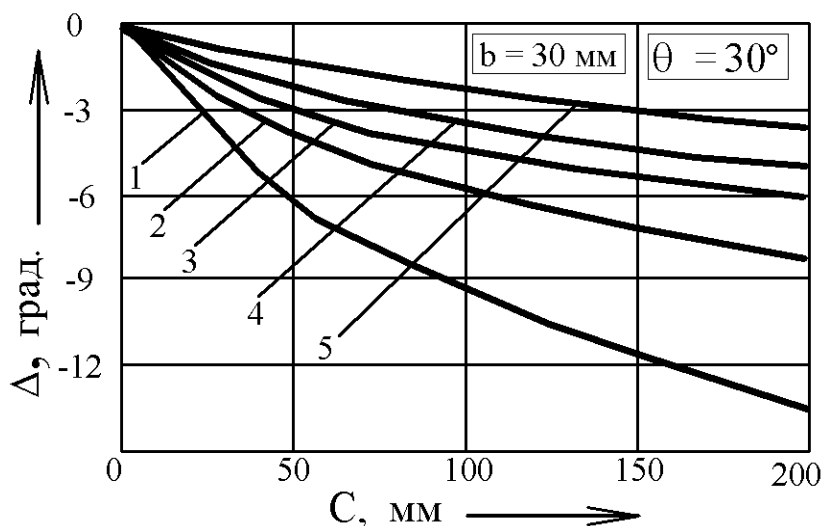


Рис. 6. Зависимость углов «ослабления» от ширины дна профиля: 1, 2, 3, 4, 5 – толщина заготовки $S = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ мм соответственно

Библиографический список

1. Филимонов, С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 246 с.
2. Пластическое формоизменение металлов / Г. Я. Гунн, П. И. Полухин, В. П. Полухин, Б. А. Прудковский. – М. : Металлургия, 1968. – 416 с.
3. Bhattacharyya, D. The prediction of deformation length in cold roll-forming / D. Bhattacharyya, P.D. Smith, L.F. Collins // Journal of Mechanical Working Technology, 1984. – V. 9. – №2. – P. 181–191.
4. Филимонов, В. И. Определение протяженности зоны плавного перехода при формообразовании профиля стесненным изгибом / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, А. С. Москвин // Авиационная промышленность. – 1992. – №7. – С. 5-8.
5. Норден, А. П. Краткий курс дифференциальной геометрии / А. П. Норден. – М. : Физматгиз, 1958. – 244 с.
6. Филимонов, В. И. Теория обработки металлов давлением / В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2004. – 208 с.
7. Арышенский, Ю. М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников. – М. : Металлургия, 1990. – 304 с.
8. Васидзу, К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности: Пер. с английского / К. Васидзу. – М. : Мир, 1987. – 542 с.



- **Лапин Вячеслав Викторович**, генеральный директор ОАО «Ульяновский механический завод»
- **Филимонов Сергей Вячеславович**, канд. техн. наук, генеральный директор НПО «ИДМ», г. Ульяновск

УДК 539.375

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОК ПРОФИЛЯ ПРИ ЕГО ФОРМООБРАЗОВАНИИ

Меньшенин А. А.

Применение различных видов гнутых профилей в промышленности обусловлено их высокими служебными характеристиками и возможностью производства профилей заданной конфигурации. Однако при разработке технологии производства профилей с широкими полками часто возникают проблемы потери устойчивости при их подгибке [1]. Применение математического моделирования процесса формообразования профиля позволяет сократить затраты на создание технологии.

Будем рассматривать формовку широкополочного профиля, схема нагружения полков которого представляется моделью рис. 1.

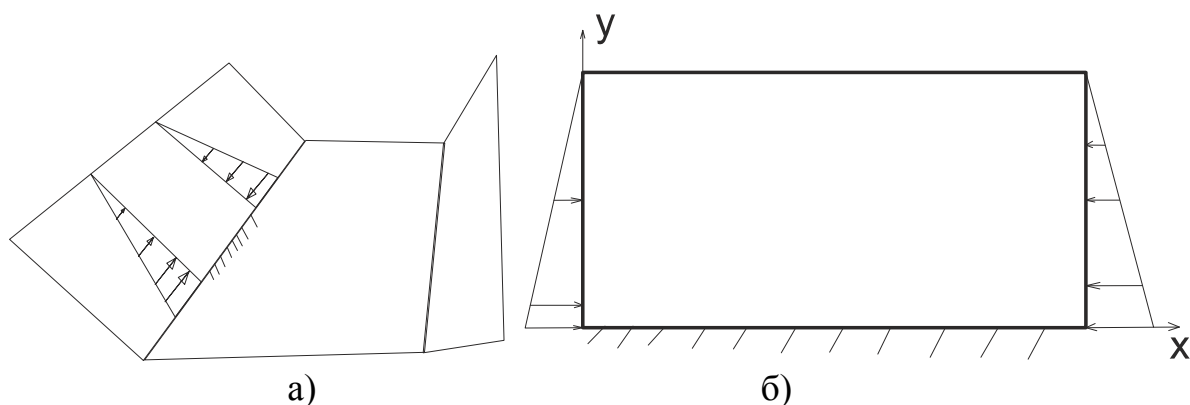


Рис. 1. Математическая модель: а) широкополочный швеллер, б) математическая модель

Расчетная схема процесса деформирования относится к подгибаемой полке, представляющей собой прямоугольную пластину с шарнирно закрепленными короткими сторонами, на которые воздействуют силы, распределенные по линейному закону. При этом одна из длинных сторон закреплена, а другая – свободна. При этом возникает задача об устойчивости пластины [2].

Для решения данной задачи мысленно произведем разрезку пластины на n частей таким образом, чтобы короткие стороны были существенно меньше длин длинных сторон ($a \gg b$). Тогда силы, действующие на каждую полоску, можно было считать равномерно распределенными (рис. 2).

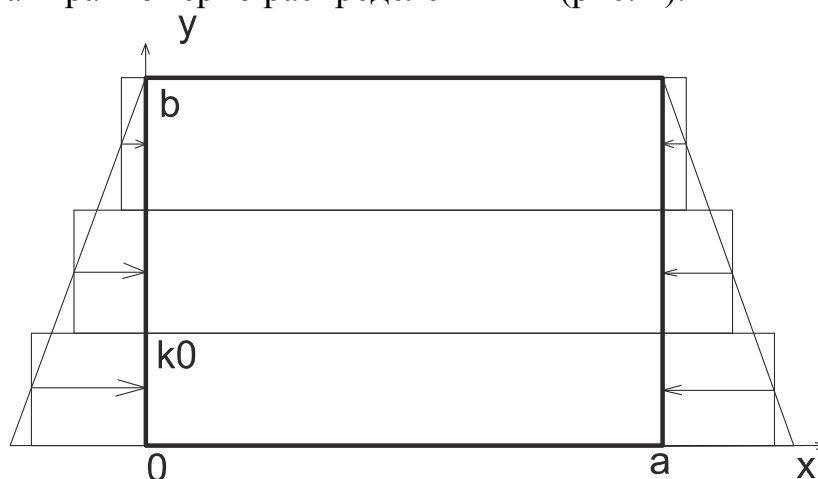


Рис. 2. Абстрактная модель нагружения полки

Для проверки возможности данного подхода (гипотезы) возьмем узкую ($a \gg b$) пластинку, сжатую в одном направлении. Силы, действующие на короткие стороны, распределены равномерно. Пусть нагруженные короткие стороны закреплены шарнирно, а у ненагруженных длинных одна сторона закреплена, а другая – свободна (рис. 3, а).

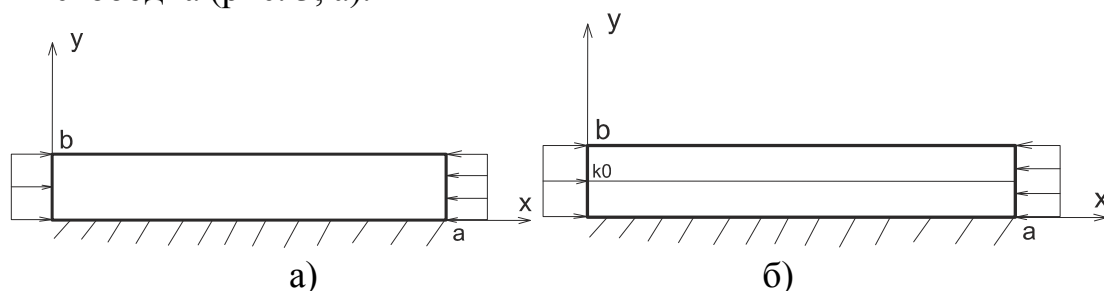


Рис. 3. Проверка гипотезы о делении пластины на полосы

Сначала найдем критическую минимальную силу $\sigma_{кр}^1$, при которой узкая пластина будет терять устойчивость. Далее разрежем эту же пластинку на две полосы (рис. 3, б), и найдем критическую минимальную силу $\sigma_{кр}^2$. Совпадение $\sigma_{кр}^1$ и $\sigma_{кр}^2$ будет означать, что выбранный подход является приемлемым. Проведем первоначально расчет $\sigma_{кр}^1$.

Уравнение изгиба жестких пластинок имеет вид:

$$\frac{D}{h} \nabla^4 w + \sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

где D – коэффициент цилиндрической жесткости, h – толщина пластины. Граничные условия при $y = 0$:

$$(2.1) \quad w=0; \frac{\partial w}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Граничные условия при $y = b$:

$$(2.2) \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0; \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (2 - \mu) \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} = 0. \quad (3)$$

Решение уравнения (1) будем искать в виде:

$$w = Y(y) \sin \frac{m\pi x}{a}. \quad (4)$$

где $Y(y)$ – искомая функция, зависящая только от y , m – порядок потери устойчивости.

Подставляя решение (4) в уравнение (1), получим:

$$\frac{d^4 Y}{dy^4} - 2 \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \frac{d^2 Y}{dy^2} + \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 - \frac{\sigma_x h}{D} \right] \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 Y = 0. \quad (5)$$

Введем обозначение $k = \frac{m\pi}{a}$ и составим характеристическое уравнение для уравнения (5):

$$\lambda^4 - 2\lambda^2 k^2 + \left(k^2 - \frac{\sigma_x h}{D} \right) k^2 = 0.$$

для которого действительные корни имеют вид:

$$\alpha = \sqrt{k^2 + k \sqrt{\frac{\sigma_x h}{D}}}; \beta = \sqrt{-k^2 + k \sqrt{\frac{\sigma_x h}{D}}}, \quad (6)$$

а неизвестную функцию $Y(y)$ будем искать в виде:

$$Y(y) = C_1 ch(\alpha y) + C_2 sh(\alpha y) + C_3 \cos(\beta y) + C_4 \sin(\beta y). \quad (7)$$

Граничные условия (2) и (3) примут вид:

$$\begin{aligned}
C_1 + C_3 &= 0, \\
\alpha C_2 + \beta C_4 &= 0, \\
Y''_{yy}(y) - \mu k^2 Y(y) &= 0, \\
Y'''_{yyy}(y) + (\mu - 2)k^2 Y'_y(y) &= 0.
\end{aligned} \tag{8}$$

Или, подставляя (7) в (8):

$$\begin{aligned}
C_1 + C_2 &= 0, \\
\alpha C_2 + \beta C_4 &= 0, \\
(\alpha^2 C_1 ch(\alpha y) + \alpha^2 C_2 sh(\alpha y) - \beta^2 C_3 \cos(\beta y) - \beta^2 C_4 \sin(\beta y)) - \\
- \mu k^2 (C_1 ch(\alpha y) + C_2 sh(\alpha y) + C_3 \cos(\beta y) + C_4 \sin(\beta y)) &= 0, \\
(\alpha^3 C_1 sh(\alpha y) + \alpha^3 C_2 ch(\alpha y) + \beta^3 C_3 \sin(\beta y) - \beta^3 C_4 \cos(\beta y)) + \\
+ (\mu - 2)k^2 (\alpha C_1 sh(\alpha y) + \alpha C_2 ch(\alpha y) - \beta C_3 \sin(\beta y) + \beta C_4 \cos(\beta y)) &= 0.
\end{aligned} \tag{9}$$

Система уравнений (9) будет иметь решения, отличные от нуля, при условии, что определитель матрицы, составленной из коэффициентов при C_i ($i = 1 \dots 4$) будет равен нулю. Пользуясь таким свойством, мы при численном решении находим минимальное ненулевое значение $\sigma_{кр}^1$ (рис. 4, график №1).

При поиске $\sigma_{кр}^2$ можно использовать то же самое уравнение (1), а его решение постулировать функцией (3). Граничные условия на стыке двух полос представляются в виде:

$$Y_1(y) = Y_2(y), \quad \frac{dY_1}{dy}(y) = \frac{dY_2}{dy}(y). \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
\ddot{Y}_{yy}^1(y) - \mu k^2 Y^1(y) &= \ddot{Y}_{yy}^2(y) - \mu k^2 Y^2(y), \\
\ddot{Y}_{yyy}^1(y) + (\mu - 2)k^2 \dot{Y}_y^1(y) &= \ddot{Y}_{yyy}^2(y) + (\mu - 2)k^2 \dot{Y}_y^2(y).
\end{aligned} \tag{11}$$

Граничные условия на краях полос ($y = 0, b$) будут теми же, что и (2), (3).

Численное решение для этих двух случаев показано на рис. 4, где оба графика являются зависимостями значения определителя от действующего напряжения. Нам интересны те значения напряжений, при которых определители равны нулю. На рисунке – пересечение графиков с $\sigma = 0$.

На основе графиков можно сделать вывод об истинности гипотезы.

Следует заметить, что решение исходной задачи будет аналогично решению задачи на поиск $\sigma_{кр}^2$, с той лишь разницей, что полос будет n штук. При этом граничные условия на стыке полос будут вида (10) и (11). Граничные условия при $y = 0, b$ будут (2) и (3). Для каждой из полос будет свое решение Y вида (7), отличающееся коэффициентами C_i . И, наконец, для каждой полосы будет свои α, β функции вида:

$$\alpha = \sqrt{k^2 + k \sqrt{\frac{h}{D} F(1 - \frac{(i + 0.5)k_0}{b})}}, \quad \beta = \sqrt{-k^2 + k \sqrt{\frac{h}{D} F(1 - \frac{(i + 0.5)k_0}{b})}}, \tag{12}$$

где i – номер полосы, k_0 – ширина полосы, F – максимальное напряжение, выступающее в качестве параметра.

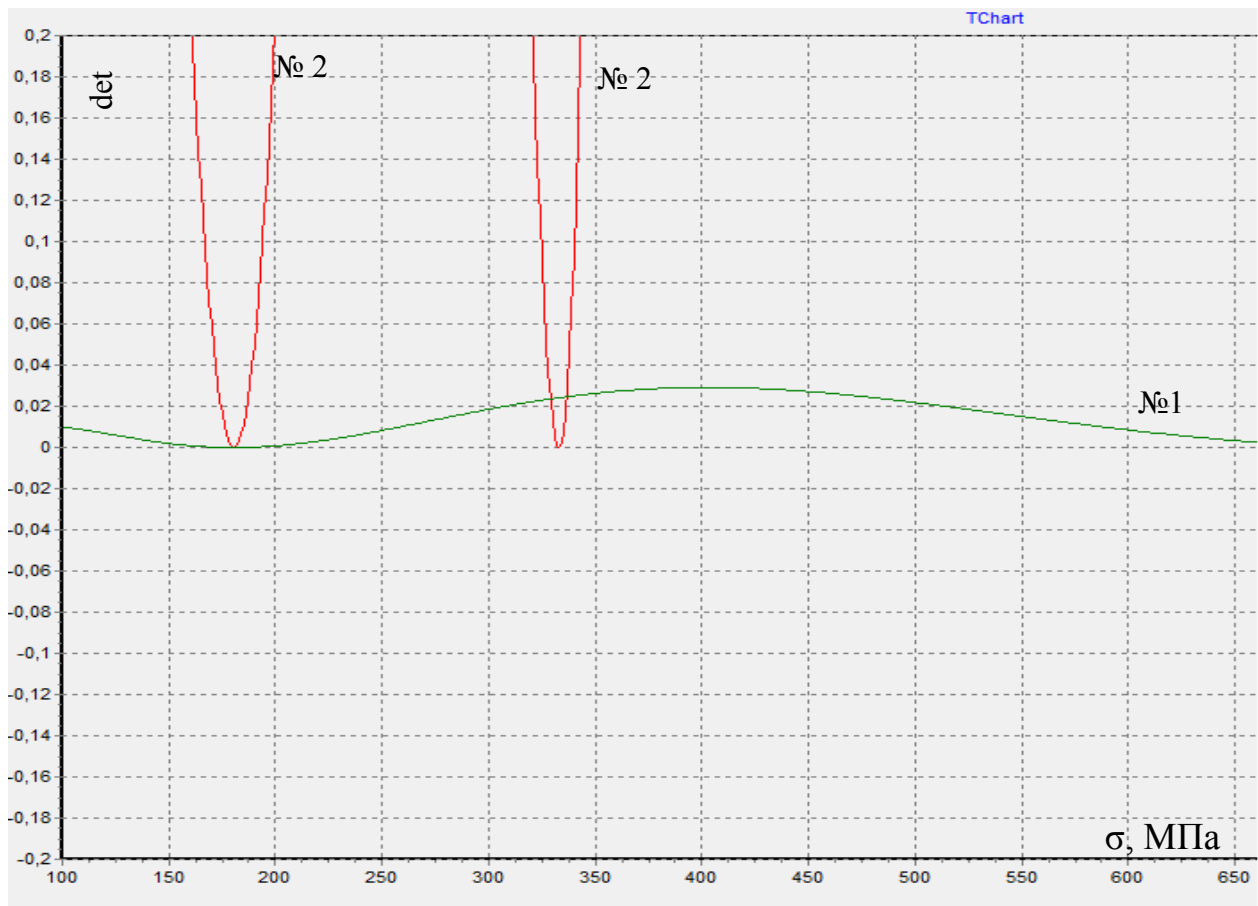


Рис. 4. Проверка гипотезы: № 1 – $\sigma_{кр}^1$; № 2 – $\sigma_{кр}^2$

Блок схема численного решения задачи потери устойчивости пластины представлена на рис. 5. Сущность программы заключается в том, чтобы найти такое F , при котором определитель матрицы A , составленный из коэффициентов C_j^i ($j=1\dots 4$, где i – номер полосы), получаемых из уравнений (6), (3) при подстановке в граничные условия (10), (11), (2), (3), был меньше ε , где ε – достаточно малое число. При этом следует заметить, что изначально F задается с клавиатуры, а затем изменяется по закону $F:=F+\Delta$, где Δ – шаг, также задаваемый с клавиатуры.

В блоке определения количества полос длинные ненагруженные стороны должны быть много длиннее коротких, нагруженных. Блок должен учитывать это. Также этот блок должен определять возможность считать силы (напряжения) равномерно распределенными по кромке каждой из полос. Он должен выводить не только количество полос, но и их ширину – $k0$.

Следующий блок – блок условия. Если пластинка достаточно узка и силы можно считать равномерно распределенными, то матрица A заполняется только коэффициентами C_i , получаемыми при подстановке (7) в (4) и в (2) и (3). Размерность матрицы при этом будет равна четырем. Если $n>1$, то есть пластинка разрезается на несколько полос, задействуется следующий блок условия. Так как размерность матрицы A равна $4*n$, этот блок выполняет роль цикла. При этом, на каждой итерации в матрицу A записываются сначала правые части граничных условий для предыдущей пластинки, а затем левые части граничных условий для последующей пластинки.

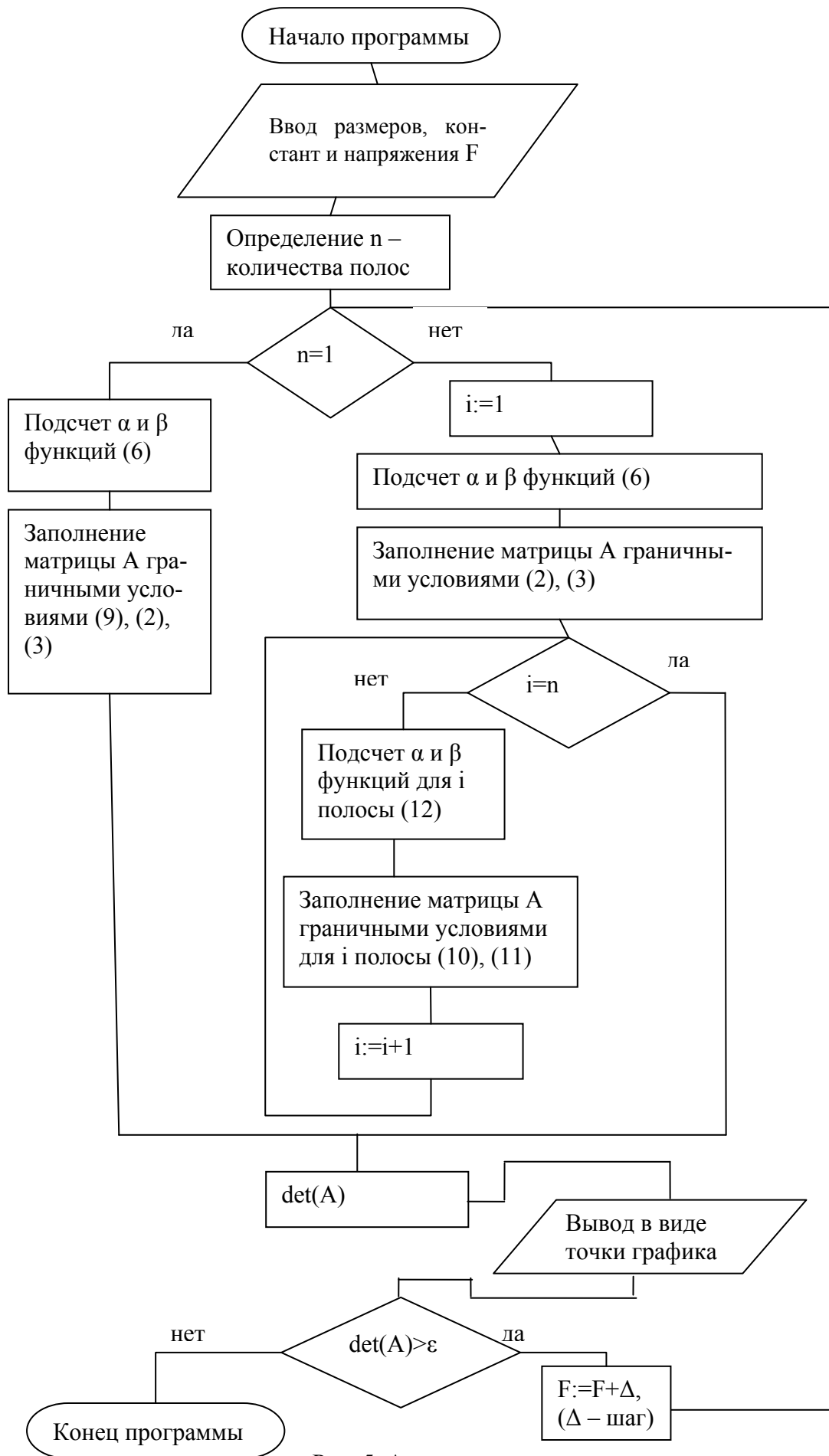


Рис. 5. Алгоритм решения задачи

Исключение составляют лишь крайние полосы – первая и последняя, где вместо правых/левых частей граничных уравнений предыдущей/последующей полос записываются уравнения (2) и (3).

Далее следует блок вывода. Он выводит точку с координатами (F , $\det(A)$). Таким образом, при работе главного цикла (последний блок условия) получается график зависимости определителя матрицы от сил. При первом достижении графика оси $\det(A)=0$ произойдет первая потеря устойчивости по оси y и выход из программы.

Последний блок условия является главным циклом программы. Если выполняется условие выхода – программа завершает работу, если нет – изменяется F и выполняется переход на первый блок условия.

В табл. 1 приведены значения $\sigma_{кр}$ в зависимости от длины и ширины пластинки. При этом использовались следующие константы: модуль Юнга $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, толщина пластинки $h = 0,3$ мм, порядок потери устойчивости $m = 1$.

Таблица 1

а, мм	б, мм	$\sigma_{кр}$, Па
180	30	12688017
180	50	12688020
200	30	10481192
200	50	10481190
200	70	10481200
205	30	10024966
210	30	9599902
225	30	8485041
225	70	8485042
250	30	7039800
250	50	7039805
250	70	7039810

По результатам работы программы видно, что в указанных пределах $\sigma_{кр}$ очень сильно зависит от a – длины пластинки, и очень слабо зависит от b – ширины. С математической точки зрения это объясняется очень просто. Из формул (12) следует, что b и D находятся в знаменателе под двумя знаками квадратного корня. При этом $D \gg b$. Поэтому при расчете $\sigma_{кр}$ для пластинок, равных по длине и различающихся в 2 – 2,5 раза по толщине, будут одинаковые результаты. Это хорошо видно при сравнении данных с результатами работы [3], приведенными в табл. 2.

Таблица 2

а, мм	б, мм	$\sigma_{кр}$, Па
180	50	2676334
200	70	1129327
205	70	1241393
250	70	1356198

Сравнивая эти данные с данными табл. 1, заметим, что значения $\sigma_{кр}$ при $a \in [200; 225]$ мм приблизительно одинаковые. Однако вне этого интервала значения разнятся, причем критические значения напряжений в работе [3] очень сильно зависят от ширины пластинки.

Библиографический список

1. Марковцев, В. А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – 244 с.
2. Алфутов, Н. А. Основы расчета на устойчивость упругих систем / Н. А. Алфутов. – М. : Машиностроение, 1978. – 278 с.
3. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 640 с.



- **Меньшенин Александр Аркадьевич**, студент пятого курса Ульяновского государственного университета

УДК 621.981

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ В РОЛИКАХ ШИРОКОПОЛОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРОДОЛЬНОЙ КРИВИЗНОЙ

канд. техн. наук Марковцев В. А., Волков А. А.

Широкополочные детали с продольной кривизной находят широкое применение в автомобилестроении (бамперы автомобилей), дорожном строительстве (ограждения), металлургии (обручи-вставки для упаковки и транспортировки рулонного тонколистового проката) [1, 2]. До недавнего времени такие детали изготавливали штамповкой или же применяли профилирование с последующим приданием профилю продольной кривизны в штампе. Эти технологии требуют значительных затрат на технологическую подготовку производства и изготовление деталей.

Более выгодными являются технологии производства таких деталей в роликах, которые можно классифицировать согласно рис. 1. Изготовление деталей в профилировочных машинах с одновременным формированием продольной кривизны (блок 1) предусматривает формообразование сечения профиля при обеспечении условий направленного воздействия на очаг деформации для получения требуемой кривизны детали. Так, приложение вращающего момента со стороны правильного устройства к профилю, выходящему из последней пары формирующих роликов станка (блок 1.2), позволяет воздействовать на очаг деформации и получить требуемую кривизну детали. По данной технологии, разработанной в ОАО «Ульяновский НИАТ», производят бамперы автомобиля ВАЗ-06 (рис. 2, а) [1] и стеклоподъемники автомобилей семейства УАЗ [2]. Выбором формы оси профилирования (блок 1.2) профилю можно придать относительно небольшую кривизну на станках с нерегулируемыми по высоте нижни-

ми валами, поскольку изменение формы оси профилирования в данном случае осуществляется за счет выбора диаметров формирующих роликов. Здесь существенным ограничением является скоростной режим процесса формообразования профиля. Регулируемые нижние валы профилировочного станка предоставляют более широкие возможности обеспечения кривизны изготавливаемой детали.



Рис. 1. Классификатор способов изготовления в роликах широкополочных листовых деталей с продольной кривизной

Форму линии профилирования, как правило, изменяют лишь в вертикальной плоскости. В принципе, для придания профилю саблевидности можно изменять форму оси профилирования и в горизонтальной плоскости, однако весьма часто это приводит к неудовлетворительному качеству поверхности профиля и потере устойчивости его элементов. Более целесообразным является дифференцированный обжим донной части профиля по ширине его донной части. Изменением формы линии профилирования изготавливают профиль дорожного ограждения с заданной небольшой продольной кривизной (рис. 2, б).

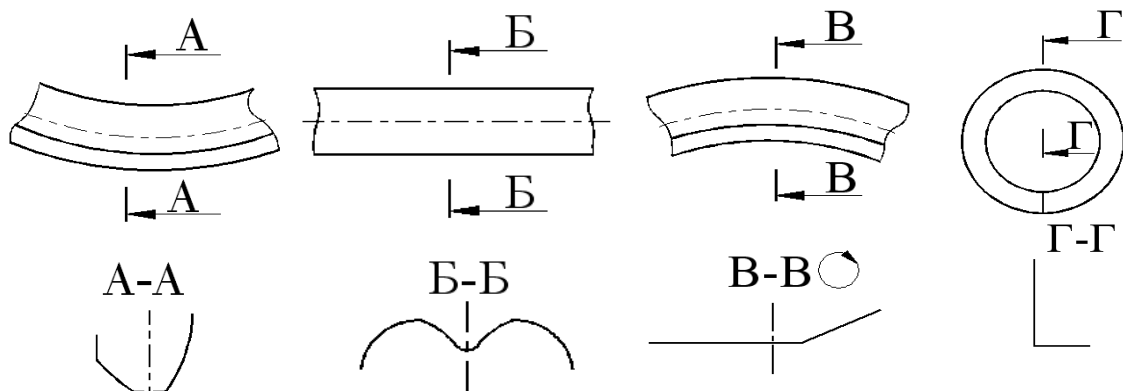


Рис. 2. Виды изготавливаемых деталей с продольной кривизной в роликах: а – бампер автомобиля ВАЗ-06; б – профиль дорожного ограждения; в – бампер автомобиля ВАЗ-07; г – кольцевая деталь типа «обруч упаковочный»

Профиль дорожного ограждения с большой кривизной получают профилированием с последующей гибкой в трехроликовых гибочных машинах (блок 2). Широкополочные профили с продольной кривизной целесообразно изготавливать с дифференцированным (локальным) обжимом определенных участков заготовки (блок 1.3). По такому способу изготавливают бампер автомобиля ВАЗ-07 (рис. 2, в) [2]. Что касается производства деталей с большой кривизной или кольцевых деталей (рис. 2, г), то профили открытого сечения с высотой до 60 мм могут изготавливаться по совмещенной схеме локальным обжимом в роликах последнего перехода профилировочного станка, а крупногабаритные детали после формообразования сечения требуют дополнительной операции деформирования на гибочно-раскатном станке (блок 3). Это связано, в основном, с техническими вопросами отвода профиля и его разрезки на мерные длины, а также технологическими возможностями профилировочных станков (ограничения по высоте формуемого профиля).

Последний из рассмотренных способов изготовления кольцевых деталей был использован для разработки технологии изготовления из стальной ленты упаковочного обруча трех типоразмеров по сечению (50x50x2,5 мм, 60x40x2,5 мм и 100x70x2 мм). Попытка использования трехточечной гибки привела к отрицательным результатам: боковая полка теряла устойчивость в форме кромочной волнистости даже при радиусе кривизны, превышающем в восемь раз заданный радиус. Ниже рассматриваются результаты моделирования процесса и отработки технологии производства «обруча упаковочного» из уголкового профиля 100x70x2 мм, поскольку он наиболее подвержен локальной потере устойчивости при деформировании из-за значительных размеров полок.

Рассмотрим первоначально гибку на ребро уголкового профиля, в котором ребром является полка меньшей ширины. Пусть радиус изгиба в плоскости этой полки шириной H будет R . Для определения окружных деформаций необходимо знать положение центра масс сечения, по крайней мере, в направлении радиуса изгиба. Положим, что при изгибе профиля полка удерживается от бокового смещения. Положение центра масс сечения вдоль радиуса изгиба с отсчетом от внешней поверхности широкой полки легко определить:

$$h = \left(\frac{4 \cdot s [b - (r + s_0)] + 4 \cdot [H^2 - (r + s_0)^2] + \pi \cdot (2 \cdot r + s_0) \cdot [(2 \cdot r + s_0) \cdot (1 - \cos \alpha) + s_0]}{8 \cdot b + 8 \cdot H - 16 \cdot (r + s_0) + 2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot r + s_0)} \right), \quad (1)$$

где s_0 – толщина стенки профиля; b , H – ширина полок ($b > H$); r – радиус сопряжения полок по внутреннему контуру зоны изгиба; α – угол между полками профиля (здесь $\alpha = \pi/2$).

Максимальные окружные деформации для зон растяжения и сжатия определяются соответственно формулами:

$$e_{\theta}^p = \ln \left(\frac{R + H}{R + h} \right), \quad e_{\theta}^c = \ln \left(\frac{R}{R + h} \right), \quad (2)$$

где h определяется соотношением (1).

Однако при изгибе пластически деформируется лишь угловая зона, а перпендикулярная плоскости изгиба полка шириной b теряет устойчивость в фор-

ме кромковой волнистости. Критические деформации потери устойчивости полки можно определить, используя формулу [3]:

$$e^{cr} = \left[(k^* \cdot \lambda)^2 \cdot \frac{n \cdot E}{K} \cdot \left(\frac{s}{b - b_h} \right)^4 \right]^{\frac{1}{n+1}}, \quad \lambda = \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \mu^2)}, \quad (3)$$

где k^* – коэффициент, учитывающий условия закрепления краев полки; E , μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно; b , b_h – ширина полки и координата центра тяжести сечения профиля в плоскости, перпендикулярной плоскости изгиба, соответственно; K , n – параметры упрочнения материала заготовки.

Соотношение (3) дает выражение предельной деформации в закритической области, а потому $\mu = 0,5$. Коэффициент k^* , учитывающий условия закрепления краев полки (один край зажат, другой – свободен), принято брать равным 3,6 [4].

Радиус кривизны, соответствующий условию отсутствия кромковой волнистости, можно определить на основе формул (2) и (3):

$$R \leq \frac{h \cdot \exp(e^{cr})}{1 - \exp(e^{cr})}. \quad (4)$$

С использованием формул (2) – (4) в среде MathCad построены кривые (рис. 3), представляющие критическую деформацию и окружные деформации угловой зоны, на основе которых можно определить предельный радиус детали при различных значениях высоты полки, перпендикулярной плоскости изгиба. В частности, для ширины полки $b = 100$ мм предельный радиус изгиба составляет около 6 м, а для меньших радиусов характерна потеря устойчивости в форме кромковой волнистости (рис. 4, а). В этой связи была предпринята попытка

получения меньшего радиуса изгиба путем удержания обеих полок от деформаций. В этом случае полка, перпендикулярная к плоскости изгиба, испытывает локальную потерю устойчивости в форме выпучивания участка, примыкающе-

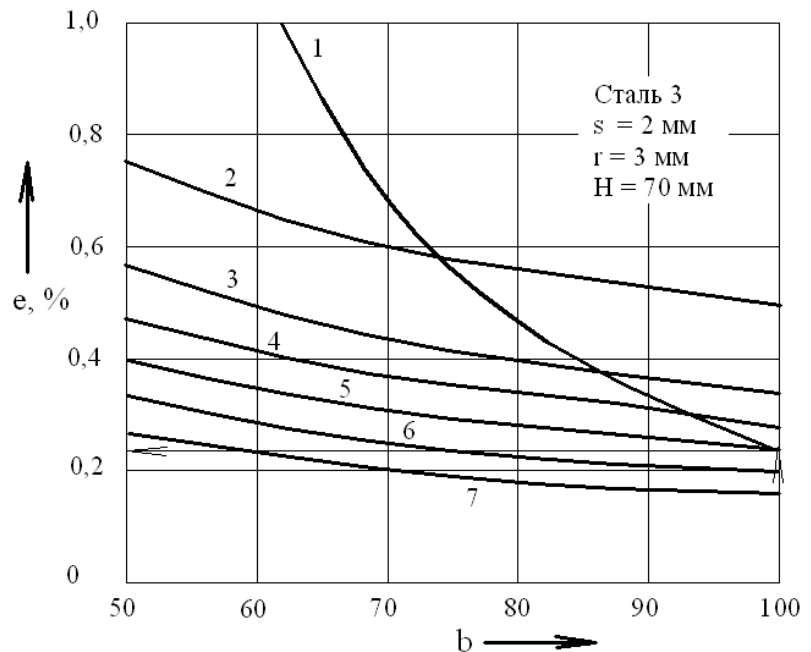


Рис. 3. График для определения предельного радиуса изгиба детали: 1 – деформация периферийных волокон полки, находящейся вне плоскостигиба; 2 – 7 – критические деформации при $R = 3; 4; 5; 6; 7$ и 8 м соответственно

го к угловой зоне. Дальнейшее уменьшение радиуса кривизны приводит к разрушению заготовки по зоне сгиба (рис. 4, б).

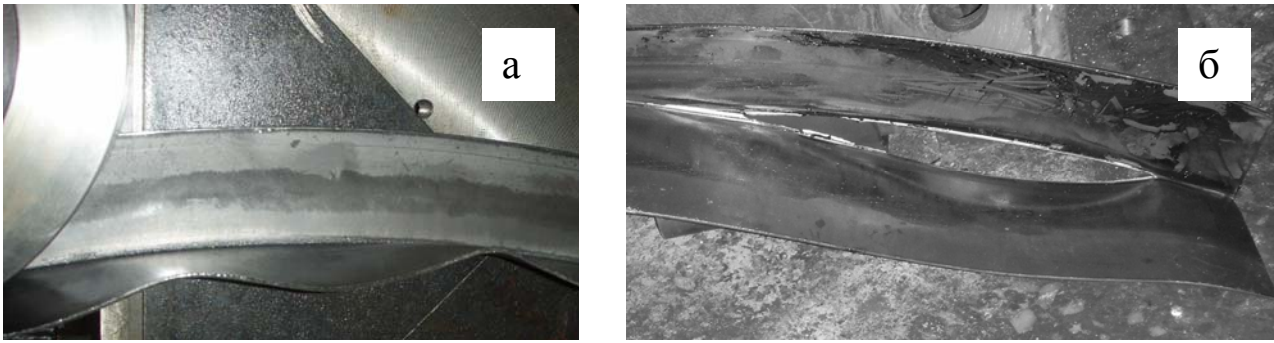


Рис. 4. Дефекты, возникающие при гибке профиля по контуру: а – кромковая волнистость; б – местная потеря устойчивости и разрыв заготовки по угловой зоне

С другой стороны, в закритической области значение окружной деформации угловой части профиля может быть связано с параметрами кромковой волнистости, которая может быть описана в терминах отклонений $w(r, \varphi)$ материальных частиц участков полки от плоскости пластически недеформированных участков по закону [2]:

$$w(r, \varphi) = f \cdot \frac{r - r_n}{b - r_n} \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot R \cdot \varphi}{a}, \quad (5)$$

где f – амплитуда волны на кромке; r – текущая координата, отсчитываемая по нормали от зоны сгиба к кромке; r_n – ширина участка полки, не подверженно-го кромковой волнистости; m – число полуволн при потере устойчивости; φ – текущий угол, измеряемый в плоскости изгиба.

При потере устойчивости полки ее продольная деформация может быть подсчитана а posteriori, если измерить амплитуду и шаг волны на кромке. В этом случае в формуле (5) следует положить $r = b$ и $m = 2$, а затем с использованием функции $w(r, z)$ произвести спрямление волны, которое после несложных, но громоздких вычислений приводит к следующему выражению:

$$J = \frac{2 \cdot a}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{a} \right)^2} \cdot E \left(\frac{\pi}{2}, p \right), \quad (6)$$

где J – длина синусоиды на ее периоде; $E(\pi/2, p)$ – эллиптический интеграл второго рода при $0 < p^2 < 1$.

В формуле (6) параметр p определяется соотношением:

$$p = \sqrt{\frac{2 \cdot f^2 \cdot \pi^2}{a^2 + 2 \cdot f^2 \cdot \pi^2}}.$$

Зависимость продольной деформации кромки, вычисленной на основе выражения (6), от амплитуды и шага волны представлена на рис. 5 в результате расчетов в среде MathCAD. К сожалению, данная модель не дает возможности определения параметров кромковой волнистости, если известна продольная (окружная) деформация угловой зоны профиля. Однако обратная процедура оказывается вполне возможной, поскольку параметры кромковой волнистости

могут быть получены путем непосредственного их замера на детали, подверженной этому виду потери устойчивости. Сравнение полученного значения деформации с деформацией, определяемой по рис. 4, дает возможность оценки точности предлагаемой модели. Например, при $R = 3$ м были получены параметры кромковой волнистости $a = 140$ мм, $2f = 6$ мм. Значения деформаций по рис. 4 ($b = 100$ мм) и по рис. 5 отличаются не более чем на 6%.

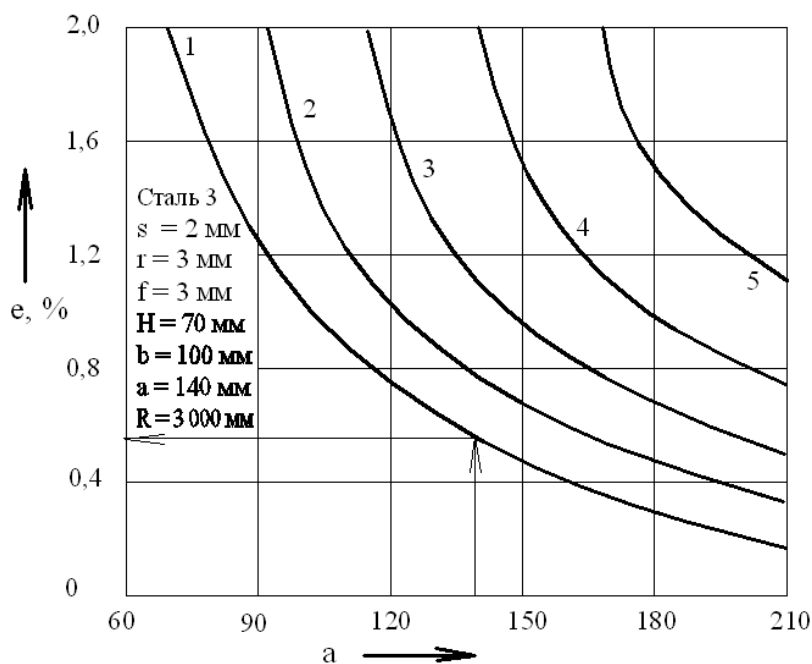


Рис. 5. Деформации полки, подверженной кромковой волнистости: 1 – 5 – $f = 3$; 4; 5; 6 и 7 мм соответственно

Получение детали «обруча упаковочного» без дефектов типа кромковой волнистости возможно путем дифференцированного обжима в конических роликах (рис. 6) полки, лежащей в плоскости изгиба. При этом возникает вопрос выбора из числа существующих или разработки специализированного раскатного станка на основании требуемых значений силовых факторов: силы распора в роликах и крутящего момента.

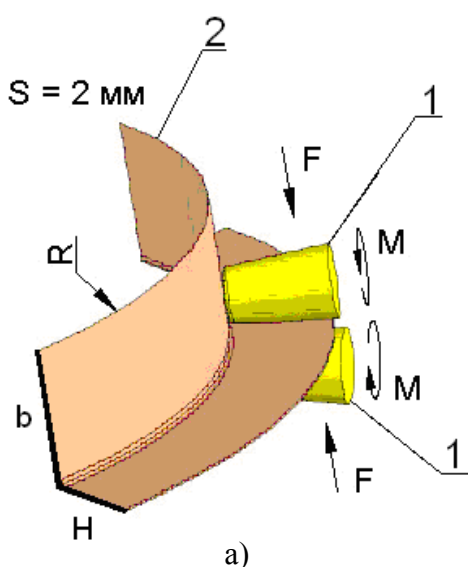


Рис. 6. Раскатка полки в роликах: а – схема раскатки; б – раскатные ролики

Для определения силовых факторов процесса раскатки рассмотрим элемент раскатываемой полки единичной ширины в направлении радиусагиба R кольца. Будем считать величину обжима элемента постоянной в направлении R .

На данный элемент действует нормальное напряжение p со стороны роликов с величиной приведенного радиуса: $R_{np} = \frac{2 \cdot R_n \cdot R_e}{R_n + R_e}$, (7)

где R_n , R_e – радиус нижнего и верхнего раскатного ролика соответственно.

Уравнение равновесия для данного элемента в условиях отсутствия уширения заготовки имеет вид:

$$s \cdot d\sigma_\theta + \left[\sigma_\theta + p \cdot \left(1 + \frac{f}{\operatorname{tg}(\alpha)} \right) \right] \cdot ds = 0, \quad (8)$$

где s – текущее значение толщины сжимаемого элемента; σ_θ – напряжение в тангенциальном направлении, расположенное перпендикулярно радиусу R в плоскости заготовки; f – коэффициент трения между заготовкой и раскатными роликами; α – центральный угол раскатного ролика приведенного радиуса, стягиваемый дугой контура контактной зоны заготовки и ролика.

Условие пластичности для выделенного элемента можно записать в следующем виде:

$$\sigma_\theta + p = K \cdot \left| \ln \left(\frac{s}{s_0} \right) \right|^n, \quad (9)$$

где K , n – константы упрочнения материала заготовки; s_0 – исходная толщина заготовки.

Подставив значение p из соотношения (9) в уравнение (8), после некоторых преобразований получим:

$$\sigma'_\theta - \frac{f}{s} \cdot \sqrt{\left(\frac{R_{np}}{s - s_0} \right)} \cdot \sigma_\theta = -\frac{K}{s} \cdot \left| \ln \left(\frac{s}{s_0} \right) \right|^n, \quad (10)$$

где R_{np} определяется соотношением (7).

Уравнение (10) легко приводится к стандартному виду:

$$\sigma'_\theta + Q(s) \cdot \sigma_\theta = R(s), \quad (11)$$

где $Q(s) = -\frac{f}{s} \cdot \sqrt{\frac{R_{np}}{s - s_0}}$; $R(s) = -\frac{K}{s} \cdot \left| \ln \left(\frac{s}{s_0} \right) \right|^n$.

Линейное дифференциальное уравнение первого порядка (11) имеет общий интеграл:

$$\sigma_\theta(s) = e^{-\int Q(s) \cdot ds} \cdot \left[\int R(s) \cdot e^{\int Q(s) \cdot ds} ds + C \right], \quad (12)$$

где C – константа, определяемая из граничных условий.

Решение (12) не может быть представлено в терминах элементарных функций, однако для заданной толщины заготовки оно может быть линеаризовано с помощью пакета MathCAD так, что его конечный вид представляется зависимостью:

$$\sigma_{\theta}(s) = K \cdot e^{2,4 \left(1 - \frac{s}{s_0}\right)} \cdot \left[4,4 \cdot \left(\frac{s}{s_0} - 1\right)^2 + C \right]. \quad (13)$$

Удовлетворение граничным условиям в выходном сечении заготовки позволяет преобразовать решение (13) к виду:

$$\sigma_{\theta}(s) = -4,4 \cdot K \cdot \frac{(2 \cdot s_0 - s_{\kappa} - s) \cdot (s - s_{\kappa})}{s_0^2} \cdot e^{2,4 \left(1 - \frac{s}{s_0}\right)}, \quad (14)$$

где s_{κ} – толщина заготовки в выходном сечении раскатного калибра (зазор в калибре).

Учитывая, что по ширине раскатываемой полки степень обжима различна, точнее изменяется линейно по ширине полки, представим величину зазора в калибре s_{κ} следующим образом:

$$s_{\kappa}(t) = s_0 - \frac{(s_0 - s_{\kappa})}{H} \cdot t, \quad (15)$$

где t – параметр, определяющий текущее положение точки на раскатываемой полке с отсчетом от зоны сгиба.

Подстановка значения $s_{\kappa}(t)$ из зависимости (15) в решение (14) позволяет определять напряжение σ_{θ} в любой точке очага деформации.

Одним из основных силовых параметров процесса раскатки является сила распора в роликах, которую можно найти интегрированием нормального напряжения p по очагу деформации. Из условия пластичности (9) следует:

$$p = - \left\{ K \cdot \left| \ln \left(\frac{s}{s_0} \right) \right|^n + |\sigma_{\theta}(s)| \right\}. \quad (16)$$

Протяженность участка очага деформации единичной ширины вдоль R дается приближенной формулой:

$$\Delta(t) = \sqrt{R \cdot (s_0 - s_{\kappa}(t)) \cdot \frac{t}{H}}. \quad (17)$$

Для расчета распирающей силы в калибре следует определить максимум значения p в формуле (16). С этой целью нужно продифференцировать соотношение (16) и приравнять правую часть к нулю, откуда определяется значение s , соответствующее максимуму p . Подстановка найденного значения s в формулу (16) дает значение $p_{\max}(t)$. Здесь учтена зависимость $s_{\kappa}(t)$ из формулы (15).

Максимальное значение $p_{\max}(t)$ наиболее просто найти средствами пакета MathCAD. Например, при уровне обжима порядка 15% ($s_{\kappa} = 1,7$ мм) максимальное значение нормального напряжения достигается при $s_{\max} = 1,8$ мм.

Сила распора P определяется интегрированием $p_{\max}(t)$ по очагу деформации с учетом соотношения (17):

$$P = \int_0^H p_{\max}(t) \cdot \Delta(t) \cdot dt. \quad (18)$$

Расчет по формуле (18) целесообразно также производить численно в среде MathCAD. Для рассматриваемого случая найденное значение распирающей силы составляет величину порядка 55 кН. Что касается крутящего момента

на валу, идущего на деформирование при раскатке полки, то он определяется формулой [5]:

$$M_{кр} = 2 \cdot P \cdot \Psi \cdot \sqrt{R_{np} \cdot (s_0 - (s_k)_{cp})}, \quad (19)$$

где Ψ – коэффициент плеча момента; $(s_k)_{cp}$ – среднее значение зазора в калибре.

Значение Ψ в формуле (19), а также другие составляющие суммарного крутящего момента (момент добавочных сил трения, момент при холостом ходе, динамический момент) можно определить на основе методики, приведенной в работе [5]. Приведенные процедуры расчета были использованы при расчете и конструировании раскатного станка (рис. 7) в ОАО «Ульяновский НИАТ».

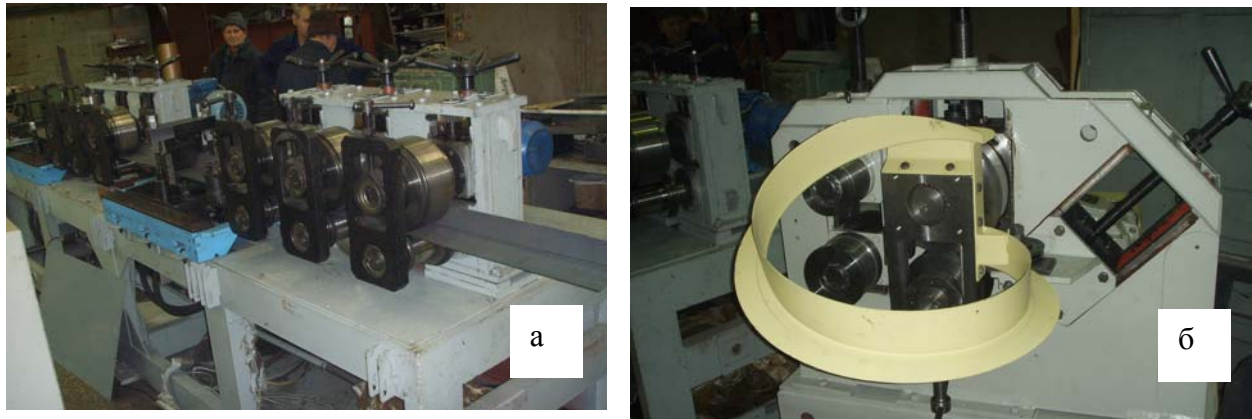


Рис. 7. Оборудование для производства обруча упаковочного:
а – профилировочный станок; б – раскатной станок

Придание профилю кривизны в раскатном станке обеспечивалось выбором зазора между роликами с его линейным изменением от s_0 у угловой зоны до $(0,6-0,7)s_0$ у торца профиля. При этом применялся калибр закрытого типа, что предотвращало течение металла в поперечном направлении. Раскатываемая полка приобретает максимальное удлинение у торца и минимальное – у угловой зоны. Величина радиуса изгиба регулируется настройкой зазора между раскатными роликами. При отработке технологии проводили экспериментальные исследования деформационной картины раскатываемой полки двумя методами: методом сеток и методом отверстий. Ниже приводятся результаты исследований по свертке углового профиля 100x70x2 мм в обруч.

При использовании метода сеток на заготовке на месте раскатываемой полки штангенциркулем с шагом 10 мм была нанесена разметка, а после раскатки были сняты замеры параметров сетки (рис. 8, а-б). По ширине раскатываемой полки сетка имела цифровую нумерацию рядов (от 1 до 6), а в окружном направлении – буквенное обозначение (от «а» до «ж»). Измерения по каждой ячейке производили трехкратно по внешним границам и трехкратно по внутренним границам с целью снижения погрешности, связанной с собственной шириной рисок и размытостью их границ после раскатки. Затем данные усредняли, после чего вычисляли деформации по известным формулам. Результаты вычислений приведены в табл. 1, откуда видно, что снижение деформаций к угловой зоне происходит почти по линейному закону.

Также производили замеры толщины заготовки после раскатки на уровне середины ячеек трех образцов, полученных разрезкой раскатанной полки вдоль

радиуса R . В каждой ячейке выполняли пятикратные замеры с помощью микрометра, а затем усредняли результат и заносили его в табл. 2. Затем выполняли расчет деформаций по толщине заготовки. При пластическом деформировании, как известно, выполняется условие несжимаемости:

$$\varepsilon_\theta + \varepsilon_n + \varepsilon_R = 0, \quad (20)$$

где ε_R – радиальная деформация.

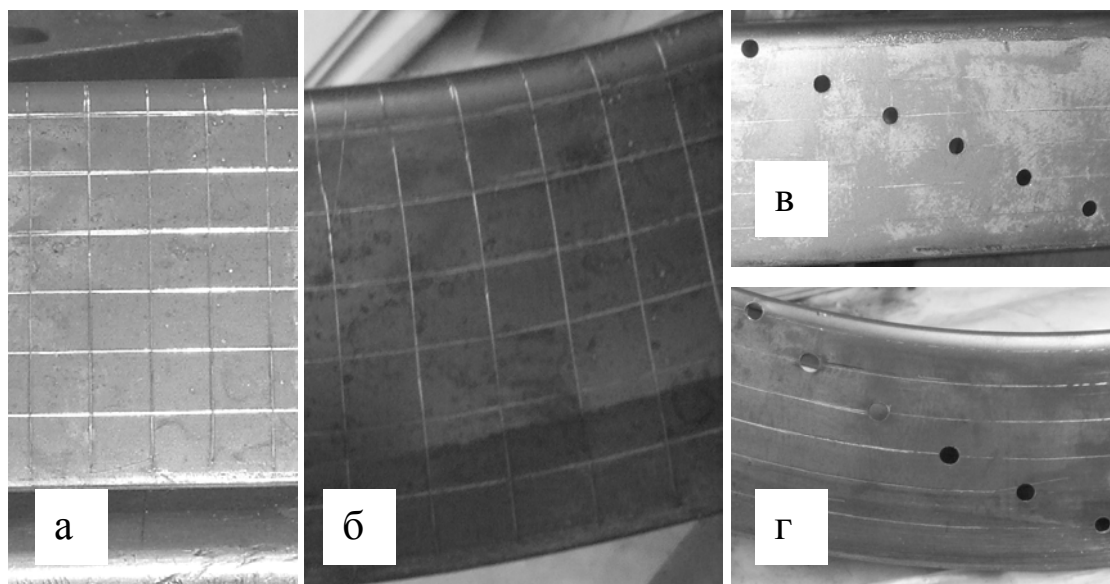


Рис. 8. Исследование деформаций раскатываемой полки: а, б – методом сеток (до и после раскатки соответственно); в, г – методом отверстий (до и после раскатки соответственно)

Таблица 1

Окружные деформации полки в направлении раскатки

Ряд №	Значение окружных деформаций раскатываемой полки, %							$\varepsilon_{\theta \text{ ср}},$ %	$\Delta \varepsilon_{\theta \text{ ср}},$ %
	а	б	в	г	д	е	ж		
1	16	15	16	15	18	15	16	15,8	1,07
2	11	11	10	12	13	13	11	11,6	1,13
3	10	8	8	10	8	11	10	9,3	1,25
4	8	7	6	6	5	8	8	6,8	1,21
5	6	7	3	6	3	6	6	5,3	1,60
6	3	2	3	3	0	3	3	2,4	1,13

Подстановка соответствующих значений деформаций из табл. 1 и табл. 2 в формулу (20) показывает, что радиальная деформация близка к нулю, следовательно, при раскатке полки фактически имеет место плоская деформации, которая обеспечивается закрытым калибром.

При определении деформаций методом отверстий в заготовке на уровне линий сетки были просверлены отверстия диаметром 5 мм, разнесенные на расстояние 25 мм в окружном направлении и с шагом в 10 мм по высоте полки (рис. 8, в, г). Общее число отверстий – 18: по 6 отверстий в каждой из трех зон для повышения достоверности результатов. Обработка данных показала

(табл. 3), что в средней части полки окружные деформации примерно на 5–7% (в терминах абсолютных значений) выше, чем те же деформации полки, полученные методом сеток.

Что касается деформаций вблизи торца раскатываемой полки, то здесь наблюдается существенное расхождение, которое объясняется специфическим течением металла вблизи отверстия по принципу кратчайшей нормали.

Таблица 2

Деформации по толщине раскатываемой полки

Ряд №	Толщина полки в измеряемых точках образцов по номерам, мм				Деформация по толщине раскатываемой полки ϵ_{ncp} , %
	1	2	3	Среднее значение	
1	1,68	1,71	1,65	1,68	-16
2	1,76	1,75	1,75	1,75	-12,5
3	1,83	1,83	1,82	1,83	-8,5
4	1,92	1,90	1,87	1,89	-5,5
5	1,92	1,91	1,90	1,91	-4,5
6	1,97	1,96	1,92	1,95	-2,5

В целом, как показывает табл. 3, в данном случае говорить об условиях плоской деформации не приходится: в зонах, примыкающих к отверстиям, имеет место объемное деформированное состояние. Отсюда следует, что применение метода отверстий может давать удовлетворительные результаты только в случае, когда толщина заготовки изменяется незначительно.

Таблица 3

Деформация отверстий после раскатки

Ряд №	$(D_0)_{cp}$, мм	ϵ_{0cp} , %	$(D_R)_{cp}$, мм	ϵ_{Rcp} , %
1	5,3	6	4,2	-16
2	5,7	14	4,9	-2
3	6,0	20	4,9	-2
4	6,1	22	5,2	4
5	5,8	16	4,8	-4
6	5,2	4	4,4	-12

На раскатанной полке были произведены замеры твердости ультразвуковым портативным твердомером МЕТ-У1 для выяснения степени упрочнения материала заготовки при деформировании. От угловой зоны к торцу полки твердость изменяется монотонно от 160 до 200 единиц НВ, что лишь подтверждает необходимость учета упрочнения при проведении расчетов процесса формообразования детали.

По разработанной технологии изготовлены пилотные партии деталей, прошедшие технический контроль и признанные годными к применению. Оборудование и технология внедрены и эксплуатируются на предприятии заказчика.

Выводы:

1. Производство широкополочных профильных деталей со значительной продольной кривизной целесообразно осуществлять в роликах в два этапа: профилирование заготовки и гибка профиля по контуру с раскаткой периферийных элементов на клин в закрытых калибрах.
2. Разработанная модель потери устойчивости элементов профиля, лежащих вне плоскостигиба, позволяет определить допустимый радиус изгиба при трехточечной схеме гибки. Расхождение экспериментальных и расчетных данных, полученных на основе разработанной модели, не превышает 6%.
3. Модель раскатки полки позволяет определять силовые параметры процесса (силу распора и крутящий момент), необходимые для выбора или проектирования раскатных станков.
4. Результаты экспериментальных исследований деформаций раскатываемой полки методом сеток показывают, что применение закрытого калибра позволяет осуществлять процесс формообразования в условиях плоской деформации. Применение метода отверстий для изучения деформаций раскатываемой полки приводит к значительным погрешностям из-за возникновения объемного деформированного состояния вблизи отверстий.
5. Измерение твердости раскатываемой полки подтверждает необходимость учета упрочнения при разработке математических моделей процесса.

Библиографический список

1. Филимонов, В. И. Автоматизированная линия изготовления автомобильных бамперов и методика ее создания / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Автомобильная промышленность. – 2005. – № 4. – С. 29-31.
2. Марковцев, В. А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2006. – 244 с.
3. Потеря устойчивости и выпучивание конструкций / под ред. Дж. Томсона и Дж. Ханта. – М. : Наука, 1991. – 424 с.
4. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1988. – 712 с.
5. Клименко, П. Л. Расчет энергосиловых параметров прокатки с применением ЭВМ / П. Л. Клименко. – Днепропетровск : Изд-во ДМУТИ, 1979. – 75 с.



- **Марковцев Владимир Анатольевич**, канд. техн. наук, генеральный директор ОАО «Ульяновский НИАТ»
- **Волков Александр Александрович**, аспирант кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

КРИТЕРИЙ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДГИБАЕМЫХ ПОЛОК ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ

канд. техн. наук Филимонов С. В., Лапин В. В., Лапшин В. И.

Широкое развитие технологии профилирования в последние годы привело к созданию метода интенсивного деформирования [1], отличительной характеристикой которого является небольшое число переходов и, как следствие, значительные деформации подгибаемых полок. В ряде случаев при отработке технологии ввиду отсутствия надежных методик расчета и реализации схем формообразования возникает кромковая волнистость – неисправимый дефект профильных деталей, что вызывает непроизводительные затраты времени и ресурсов на стадии технологической подготовки производства. Обычно кромковая волнистость возникает из-за завышенных углов подгибки, вызывающих остаточные продольные деформации подгибаемых полок. В работе [2] представлена математическая модель, позволяющая выравнивать продольные деформации полок на всех переходах с целью снижения кромковой волнистости, однако уменьшение последней еще не гарантирует ее полного отсутствия. Весьма важной для данного случая является задача о критерии потери устойчивости элементов профиля, на основе которого можно было бы вводить ограничения на углы подгибки элементов профиля. Дело в том, что даже при равенстве продольных деформаций на каждом из переходов потеря устойчивости существенно зависит от конфигурации перехода (жесткости соответствующего сечения профиля).

Продольные деформации кромок подгибаемых полок в общем случае приобретаются в трех зонах, которым соответствуют три вида логарифмических деформаций, отнесенных к k -му переходу: e_k^f – деформация кромки заготовки в зоне свободного формообразования; e_k^c – деформация кромки в контактной зоне; e_k^β – деформация, приобретаемая за осевой плоскостью k -го перехода.

Соответствующие формулы для вычисления этих деформаций задаются соотношениями (1) – (3) [3]¹:

$$e_k^f = \ln \sqrt{1 + \left[\frac{2 \cdot b \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{L - (R_k^0 + b \cdot \sin \theta) \cdot \sin \gamma(L_M)} \right]^2}, \quad (1)$$

$$e_k^c = \ln \frac{\gamma(L_M)}{\sin \gamma(L_M)}, \quad (2)$$

$$e_k^\beta = \ln(1 - \eta_k^I \cdot \beta_k^I)(1 - \eta_k^2 \cdot \beta_k^2), \quad (3)$$

¹ В разработке моделей принимал участие д-р техн. наук В. И. Филимонов.

где b – ширина подгибаемой полки, мм; θ – угол подгибки полки в текущем переходе, град; L – протяженность зоны плавного перехода в текущем переходе; R_k^0 – радиус катающих валков под стенкой в k -м переходе, мм; $\gamma(L_M)$ – угол охвата ролика заготовкой, зависящий от межклетьевого расстояния L_M ; η_k^1, η_k^2 – коэффициенты, определенные в работе [3]; β_k^1, β_k^2 – углы, образованные линией профилирования с горизонталью на входе и выходе роликового калибра.

Используя свойство аддитивности логарифмических деформаций, на основании соотношений (1) – (3) получим продольную e_k деформацию кромки в k -м отдельно взятом переходе:

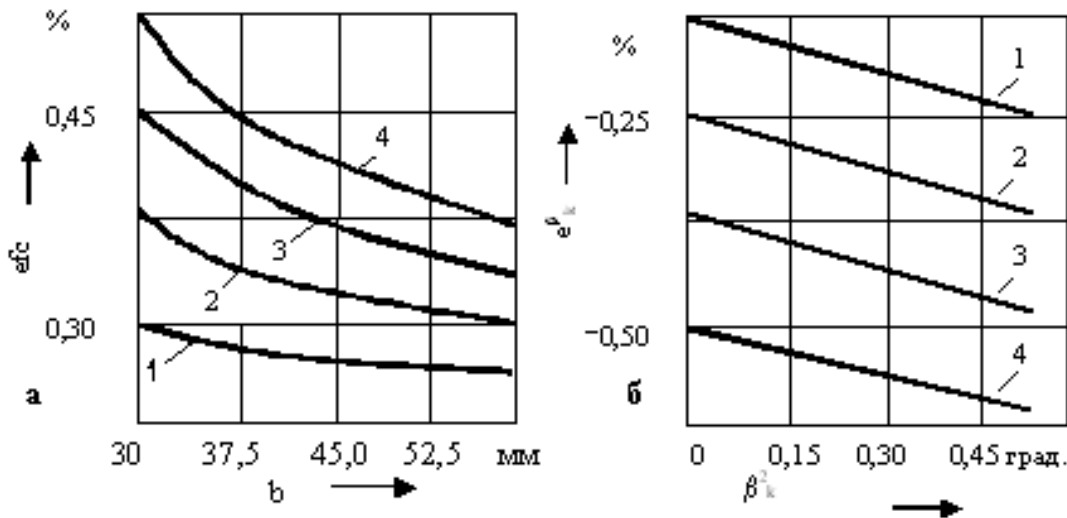


Рис. 1. Зависимость деформаций кромки от параметров процесса:
а – от ширины полки b и углов подгибки θ : 1 – $\theta = 6^\circ$, 2 – $\theta = 12^\circ$, 3 – $\theta = 18^\circ$, 4 – $\theta = 24^\circ$; б – от углов захода β_k^1 и выхода β_k^2 : 1 – $\beta_k^1 = 0^\circ$,
2 – $\beta_k^1 = 1^\circ$, 3 – $\beta_k^1 = 2^\circ$, 4 – $\beta_k^1 = 3^\circ$

$$e_k = e_k^f + e_k^c + e_k^\beta. \quad (4)$$

Суммарную деформацию после j -го перехода можно определить сложением деформаций полок (4) на всех предшествующих переходах:

$$e_j^\Sigma = \sum_{i=1}^j e_i. \quad (5)$$

На рис. 1, а по оси ординат представлена деформация $efc = e_k^f + e_k^c$ в зависимости от углов подгибки и ширины полки профиля. Деформация efc несколько снижается с шириной подгибаемой полки, что обусловлено влиянием зоны плавного перехода. Однако с точки зрения потери устойчивости полки большее значение имеет ее ширина. Поэтому при одном и том же значении деформации полок, кромковой волнистости будет подвержена та, ширина которой больше.

На рис. 1, б приведены графики зависимости продольной деформации от углов захода и выхода профиля при ширине полки 45 мм. Суммарная деформация при изменении углов захода уменьшается ввиду разных знаков слагаемых

деформаций, причем большее влияние на продольную деформацию имеют углы выхода, чем углы захода. Однако управление углами захода и выхода можно осуществлять только с изменением формы линии профилирования. Предпочтительными являются схемы формообразования, в которых линия профилирования – прямая.

Рис. 1 показывает, что при формообразовании профиля деформация является знакопеременной, что зависит от условий реализации процесса: схемы формообразования, исполнения оснастки и настройки оборудования. Возможность появления кромковой волнистости можно прогнозировать, сравнивая накопленную деформацию (5) с критической деформацией, соответствующей потере устойчивости полки, согласно, например, работе [4]. Для установления критических деформаций потери устойчивости воспользуемся результатами модельной задачи гибки профиля по контуру полками во внутрь, позволяющей определять критические напряжения сжатия полок σ_k^{cr} [4, 5]:

$$\sigma_k^{cr} = k^* \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \sqrt{\tau_k^*}}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{s}{H_k - h_k^{cg}} \right)^2, \quad (6)$$

где k^* – коэффициент, учитывающий условия закрепления краев полки; E, μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно; s – толщина стенок профиля, мм; H_k, h_k^{cg} – высота профиля и координата центра тяжести сечения профиля на k -м переходе соответственно, мм.

$$\text{Здесь} \quad H_k - h_k^{cg} \approx \frac{b + c}{2 \cdot b + c} \cdot b \cdot \sin \alpha_k,$$

где b, c – ширина полки и дна профиля соответственно, мм; α_k – угол подгибки полки профиля на текущем переходе, град.

В формуле (6) величина τ_k^* определяется следующим образом:

$$\tau_k^* = \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma_k}{de_k} \Big|_{cr}, \quad (7)$$

где σ_k, e_k – действующее напряжение и соответствующая ему деформация. Приняв закон степенного упрочнения в форме

$$\sigma_k = K \cdot e_k^n, \quad (8)$$

где K, n – константы материала, подставим соответствующие значения величин из формул (8) и (7) в правую часть формулы (6).

Несложные преобразования приводят к выражению критической деформации полок:

$$e_k^{cr} = \left[(k^* \cdot \lambda)^2 \cdot \frac{n \cdot E}{K} \cdot \left(\frac{s}{H_k - h_k^{cg}} \right)^4 \right]^{\frac{1}{n+1}}, \quad (9)$$

$$\text{где} \quad \lambda = \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \mu^2)}.$$

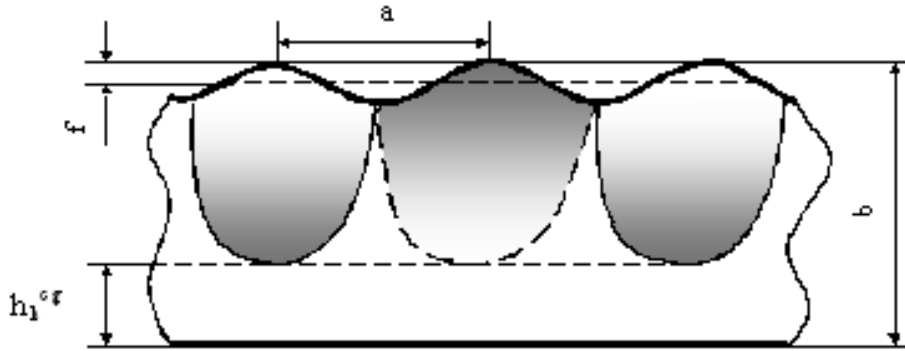


Рис. 2. Потеря устойчивости полки

Условие (9) дает выражение предельной деформации в закритической области, а потому $\mu = 0,5$. Коэффициент, учитывающий условия закрепления краев пластин-полок (один край зашпелен, другой – свободен), принято брать равным 1,277 [4], хотя некоторые авторы считают, что в закритической области значение этого коэффициента должно быть несколько выше (см., например, классический учебник Работнова Ю. Н. [6]). В данной работе принято среднее значение k по работам [4] и [6].

В случае потери устойчивости полки волнистость кромки (см. рис. 2) может быть описана в терминах отклонений $w(r, z)$ материальных частиц периферийных участков полки от плоскости пластически недеформированных участков по закону [7, 8]:

$$w(r, z) = f \cdot \frac{r - h_k^{cg}}{b - h_k^{cg}} \cdot \sin \frac{m \cdot \pi \cdot z}{a}, \quad (10)$$

где f – амплитуда волны на кромке, мм; r – текущая координата вдоль прямой, лежащей в плоскости полки и перпендикулярная линии профилирования, мм; m – число полуволн при потере устойчивости; z – текущая координата в направлении движения профиля ($z = x_3$), мм.

При потере устойчивости полки ее продольная деформация может быть подсчитана апостериори, если измерить амплитуду и шаг волны на кромке. В этом случае в формуле (10) следует положить $r = b$ и $m = 2$, а затем с использованием функции $w(r, z)$ произвести спрямление волны. Спрявление синусоиды после несложных, но громоздких вычислений, приводит к следующему выражению:

$$J = \frac{2 \cdot a}{\pi} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f}{a} \right)^2} \cdot E\left(\frac{\pi}{2}, p\right), \quad (11)$$

где J – длина синусоиды на ее периоде; $E(\pi/2, p)$ – эллиптический интеграл второго рода при $0 < p^2 < 1$.

В формуле (11) параметр p определяется соотношением:

$$p = \sqrt{\frac{2 \cdot f^2 \cdot \pi^2}{a^2 + 2 \cdot f^2 \cdot \pi^2}}$$

Зависимость продольной деформации кромки $\varepsilon_{\text{кв}}$ от амплитуды и шага волны представлена на рис. 3 в результате расчетов в среде MathCAD2001Pro. При этом величину $\varepsilon_{\text{кв}}$ задавали соотношением:

$$e_{\text{кв}} = \ln\left(\frac{J}{a}\right) \times 100\%, \quad (12)$$

где J определяется формулой (11). Как видно из рис. 3, остаточная деформация не зависит от ширины полки и угла подгибки, что обусловлено процедурой расчета, основанной на измерении геометрических параметров волны.

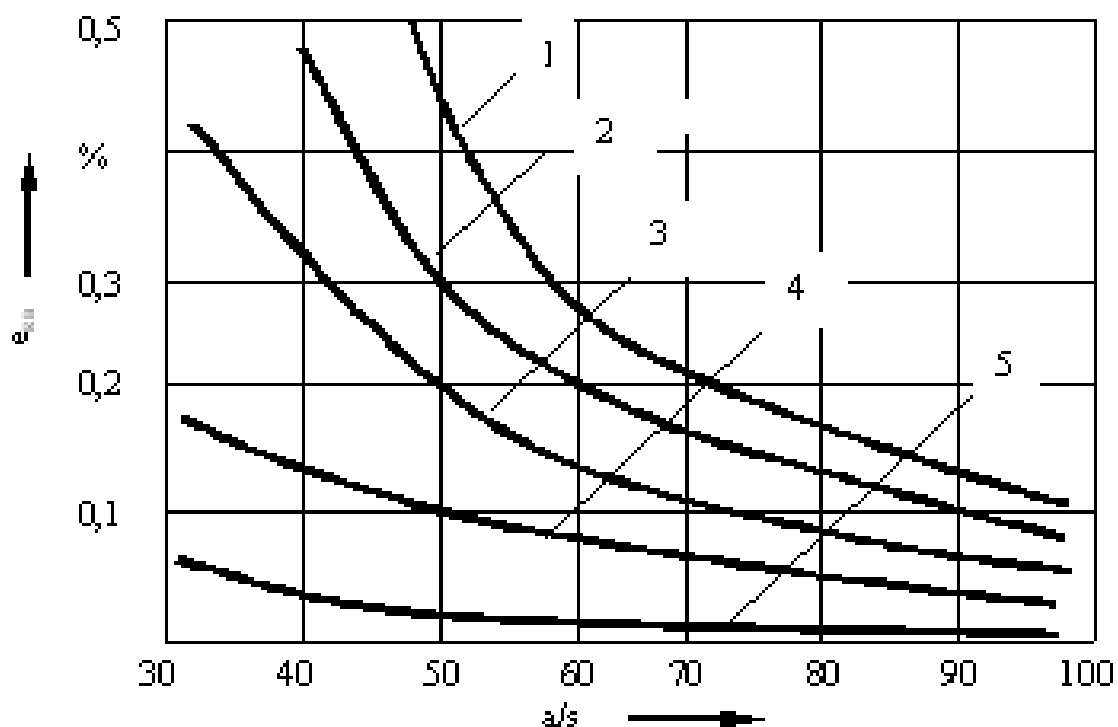


Рис. 3. Зависимость остаточной деформации на кромке от относительного шага a/s и амплитуды волны f при потере устойчивости:

1 – $f = 1,0$ мм; 2 – $f = 0,8$ мм; 3 – $f = 0,6$ мм; 4 – $f = 0,4$ мм; 5 – $f = 0,2$ мм

Уравнение (10) достаточно хорошо согласуется с данными геометрических замеров при изготовлении швеллерных, корытных и С-образных профилей [9, 10, 11, 8], периферийные элементы которых подвергались локальной потере устойчивости (см. рис. 2). Формула (12) может использоваться как верхняя оценка критических деформаций подгибаемых полок профиля.

Сопоставление приобретенной деформации полки (формула (5)) и критической деформации (формула (9)) позволяет сформулировать критерий возникновения кромковой волнистости в следующем виде [8]:

$$I(\xi) = \begin{cases} 0, & \text{при } \xi < 1 \\ 1, & \text{при } \xi \geq 1 \end{cases}, \quad (13)$$

где $I(\xi)$ – индикаторная функция; ξ – отношение остаточной деформации полки к критической деформации, приводящей к локальной потере устойчивости полки по выходу профиля из роликового калибра.

В формуле (13) индексация переходов условно опущена. Индикаторная функция может быть интерпретирована следующим образом: при $I(\xi) = 0$ кромковая волнистость отсутствует; при $I(\xi) = 1$ кромковая волнистость возникает. Функция (13) введена по аналогии с известной дельта-функцией Дирака в квантовой теории поля, однако способ ее задания существенно иной.

Зависимость критических деформаций от параметров профиля и суммарного угла подгибки в соответствии с формулой (10) представлена на рис. 4 и 5.

На рис. 6 изображены графики приобретаемых пластических деформаций полок на основе формулы (4) и критических деформаций, приводящих к локальной потере устойчивости, в соответствии с формулой (9) для первого перехода ($\epsilon^f \approx \epsilon_{\text{кв}}$, $\epsilon^{\text{cr}} \approx \epsilon^{\text{cr}}$ ввиду малости деформаций). Единичные значения индикаторной функции на этом графике представляются точками пересечения графиков двух семейств, причем область допустимых деформаций располагается ниже соответствующей точки.

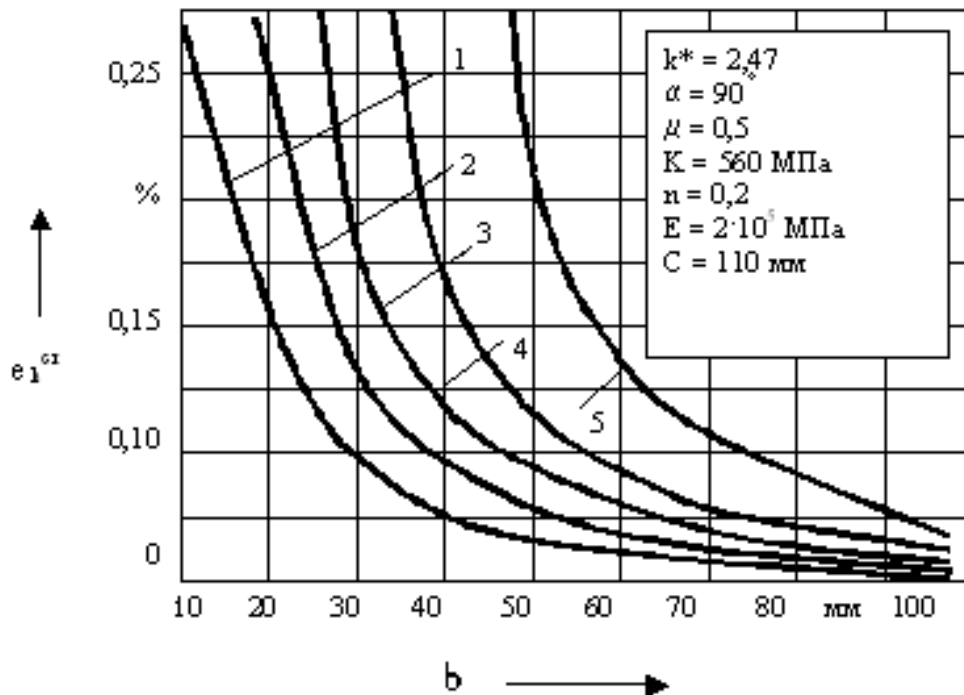


Рис. 4. Зависимость критической деформации от ширины полки и толщины стенок профиля: 1 – $s_0 = 0,6 \text{ мм}$; 2 – $s_0 = 0,8 \text{ мм}$; 3 – $s_0 = 1,0 \text{ мм}$; 4 – $s_0 = 1,2 \text{ мм}$; 5 – $s_0 = 1,5 \text{ мм}$

По графику рис. 6 можно определить и предельно допустимые углы подгибки полки профиля в первом переходе. Аналогичные графики могут быть построены и для других переходов. Например, для последнего перехода условия потери устойчивости представлены на рис. 7. Из сравнения рис. 6 и рис. 7 видно, что предельные деформации во втором случае существенно ниже.

ентировочно заданном числе переходов назначают углы подгибки в соответствии с рис. 6, 7 (для промежуточных переходов возможна интерполяция) или на основе аналитического решения соответствующей системы уравнений, проверяя затем по значению индикаторной функции (13) приемлемость назначенного угла подгибки для каждого из переходов.

При значении индикаторной функции, равном единице хотя бы в одном из переходов, число переходов увеличивают на единицу и итерационную процедуру, ведут до достижения такого результата, когда значения индикаторной функции для всех переходов равны нулю. Результат расчета гарантирует равномерность распределения деформаций полок по переходам и отсутствие кромковой волнистости в процессе формообразования профиля. При этом снижаются издержки этапов проектирования и отладки технологического оснащения во временном и стоимостном выражении.

На практике иногда оказывается, что критерий потери устойчивости не может быть выполнен для всех переходов. Этому случаю соответствуют ситуация, когда на станке с заведомо недостаточным числом клеток (для принятой процедуры проектирования и заданного типа профиля) необходимо, тем не менее, изготовить данный профиль. В этом случае процесс нуждается в корректировке: с переходов, где возможна кромковая волнистость, снимают по $(1 - 1,5)^\circ$ с углов подгибки и добавляют их в один из переходов, после которого устанавливают межклетьевые проводки. Применение межклетьевых проводок хотя и решает проблему, однако осложняет процесс настройки станка и отладки технологии, делает технологию менее стабильной и, следовательно, менее надежной.

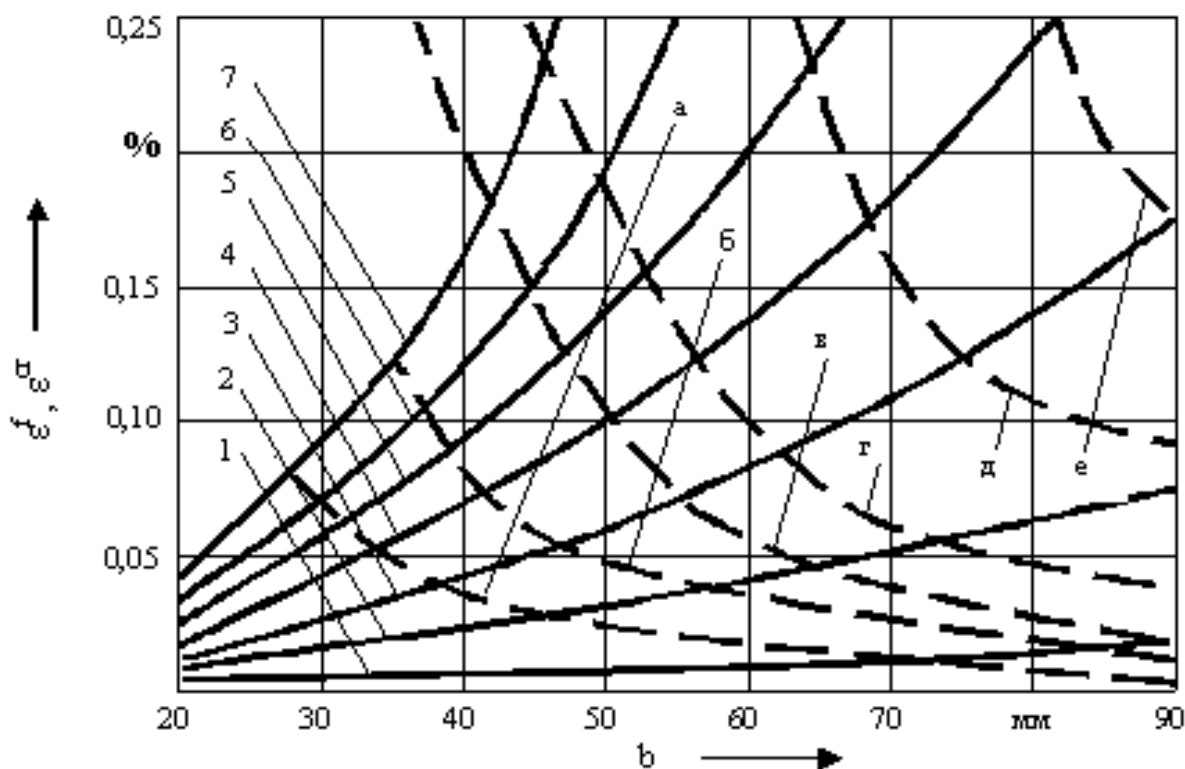


Рис. 7. Деформации на последнем переходе: — — — — — приобретенные:
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 — $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ соответственно;

— — — — — критические: а, б, в, г, д, е — $S = 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5$ мм
соответственно

Таким образом, деформации подгибаемых полок профиля приобретаются в трех зонах деформирования и зависят не только от размеров элементов и углов подгибки, но и от характеристик жесткости сечения на каждом из переходов. Суммарную логарифмическую деформацию можно определять апостериори экспериментально-расчетным путем по характеристикам кромковой волнистости элементов профиля. Введение индикаторной функции, используемой в качестве критерия потери устойчивости элемента профиля в виде кромковой волнистости, позволяет оптимизировать схемы формообразования профилей с одновременным снижением временных и материальных затрат на технологическую подготовку производства.

Библиографический список

1. Филимонов, С. В. Разработка технологии интенсивного формообразования гнутых тонкостенных профилей в роликах: Дис. канд. техн. наук: 05.03.05 / Ульяновский гос. технический ун-т. – Ульяновск, 2003. – 223 с.
2. Берлет, Ю. Н. Деформационные характеристики подгибаемых полок и оптимизация углов подгибки при профилировании / Ю. Н. Берлет, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. – №6. – С. 8-12.
3. Филимонов, С. В. Зависимость деформационных параметров подгибаемой кромки профиля от применяемого способа предотвращения волнистости ее кромки / С. В. Филимонов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Научно-технический калейдоскоп. – Ульяновск : УлГТУ, 2002. – №1. – С. 53-58.
4. Лысов, М. Н. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки / М. Н. Лысов. – М. : Машиностроение, 1966. – 236 с.
6. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1988. – 712 с.
5. Блейх, Ф. Устойчивость металлических конструкций / Ф. Блейх. – М. : Физматгиз, 1959. – 544 с.
7. Потеря устойчивости и выпучивание конструкций / под ред. Дж. Томсона и Дж. Ханта. – М. : Наука, 1991. – 424 с.
8. Филимонов, С. В. Возникновение кромковой волнистости при профилировании / С. В. Филимонов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Вестник УлГТУ. – 2002. – №1. – С. 32-38.
9. Тришевский, И. С. Теоретические основы процесса профилирования / И. С. Тришевский, М. Е. Докторов. – М. : Металлургия, 1980. – 288 с.
10. Судзуки, Х. Изучение формы изделия, имеющего дугообразное сечение / Х. Судзуки, М. Киути, К. Такада // Сосэй то како. – Т. 15. – №165. – С. 820-828. – Перевод с яп. № 11802/7Б. – Харьков : УкрНИИмет, 1976. – 22 с.
11. Кокадо, Д. О возникновении кромковой волнистости при холодном профилировании дуговых желобчатых сечений с боковыми фланцами / Д. Кокадо, Е. Онода // Труды ун-та г. Киото. Инженерный факультет. – 1977. – Т. 39. – №2. – С. 225-244. – Перевод с яп. № А – 67428. – М. : ВЦП НТЛД, 1978. – 31 с.



- **Филимонов Сергей Вячеславович**, канд. техн. наук, генеральный директор НПО «ИДМ»
- **Лапин Вячеслав Викторович**, генеральный директор ОАО «Ульяновский механический завод»
- **Лапшин Владимир Иванович**, технический директор ООО «Спецтехнология» (г. Ульяновск)

2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОФИЛИРОВАНИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ И КАЧЕСТВА ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

УДК 621.981

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГОФРИРОВАННЫХ ТРУБ БОЛЬШИХ ДИАМЕТРОВ

канд. техн. наук Марковцев В. А., д-р техн. наук,
профессор Филимонов В. И., Волков А. А.

Одним из современных способов строительства переходов и мостов железных и автомобильных дорог является строительство с применением металлических гофрированных труб (МГТ), которое характеризуется минимальными затратами на материалы, небольшими расходами при встраивании труб в сооружения, сокращением сроков строительства и незначительными издержками транспортировки труб к месту сборки и установки.

Опыт строительства водопропускных сооружений и путепроводов в Японии, Франции, Канаде и США показывает, что их стоимость на 30 – 70% ниже, чем стоимость традиционных сооружений аналогичного типа (гладких толстостенных стальных труб, прямоугольных железобетонных труб, круглых железобетонных труб) [1].

В отечественном дорожном строительстве с 70-х и до конца 90-х годов прошлого столетия традиционно применялись МГТ, изготовленные из стальных панелей 130x32,5 мм из материала толщиной до 3 мм. Однако впоследствии было показано [2], что весовая отдача (отношение момента сопротивления гофра к погонной массе) существенно выше для гофра 150x50 мм по сравнению с той же характеристикой гофра 130x32,5 мм (рис. 1). Кроме того, потребности широкого применения МГТ способствует тот факт, что около 80% вновь строящихся водотоков имеют высоту насыпи до 5 м, а ежегодная потребность в новых переходах превышает 800. В последние годы возникла потребность в гофрированных трубах различных диаметров с толщиной стенки профиля до 7 мм.

Существенным ограничением применения таких труб являлось отсутствие технологий и оборудования для их производства, что связано в первую очередь с мелкосерийным характером производства элементов МГТ и большими капитальными затратами на разработку технологии и оборудования, а также на изготовление последнего. Окупаемость капитальных затрат может иметь место лишь в случае создания комплекса с единым составом оборудования, позволяющего изготавливать элементы МГТ с размерами гофра 150x50 мм из листов толщиной от 2,5 до 7,0 мм и радиусами продольной кривизны панелей от 1 до 4 м и более.

ОАО «Алексинстройконструкция» заключило договор на разработку, изготовление и внедрение такого комплекса с ОАО «Ульяновский НИАТ». Тре-

бования к элементам МГТ согласно ТЗ на разработку представлены в табл. 1. Категорическим требованием Заказчика было единообразное выполнение технологических операций для любой толщины материала из заданного диапазона на одном и том же оборудовании по линейному технологическому маршруту без ветвлений (кроме покрытия).

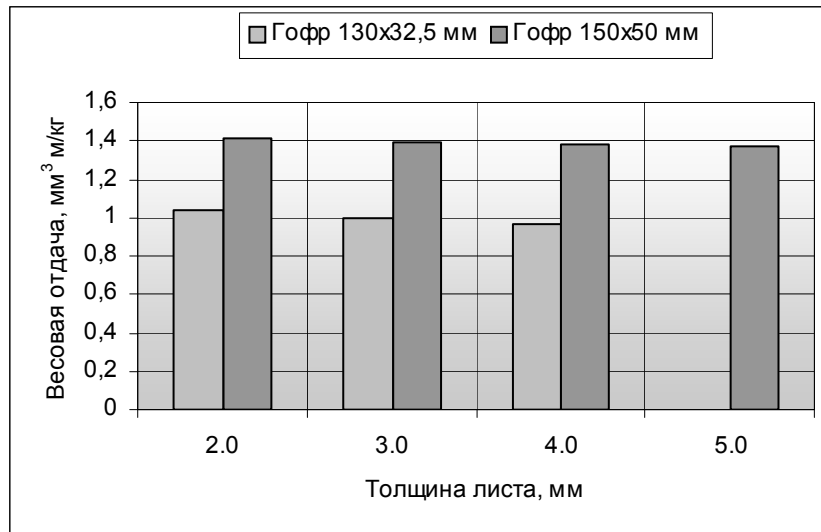


Рис. 1. Сравнительная характеристика гофрированных панелей

Технологический маршрут производства МГТ должен включать следующие операции: раскрой металла, формообразование волнистых панелей, их перфорацию, гибку волнистых панелей по контуру, покрытие и сборочные операции. Последовательность ряда указанных операций может быть различной в зависимости от вида поставляемого материала и построения технологии.

Рассмотрим последовательно указанные операции с целью выработки технологического маршрута производства МГТ и определения состава оборудования.

Раскрой металла во многом зависит от выбранного способа формовки гофрированных панелей: на гибочном прессе или на профилировочном агрегате. При формовке на прессе речь идет о двух видах раскроя: а) для материала толщиной до 3 мм из бухты; б) для материала толщиной более 3 мм. В первом случае потребуется линия продольного раскроя с многороликовой правильной машиной на выходе и, по крайней мере, агрегат поперечного раскроя. Во втором случае достаточно использовать гильотинные ножницы для осуществления подрезки заготовки по длине и ширине, поскольку материал поставляется обычно в листах.

При формовке гофр из бухты на профилировочных агрегатах возможен вариант непрерывного профилирования с отрезкой панели летучими гидравлическими ножницами. В этом случае также потребуется линия продольного раскроя с правильной машиной. В случае поштучного профилирования из тонкого листа (до 3 мм) существуют те же проблемы, что и для формовки на прессе. Для раскроя листов толщиной свыше 3 мм достаточно использовать только гильотинные ножницы или пресс для раскроя. Во всяком случае, применение гильотинных ножниц не исключается ни в случае формовки панелей на прессе, ни в случае их профилирования на парнороликовых машинах. Кроме того, по-

ставка материала любой толщины может осуществляться в листах. В этом случае надобность в линии продольного раскроя и правки отпадает. Другие рассмотренные варианты противоречат к тому же требованию отсутствия ветвления технологической цепочки. Таким образом, наиболее целесообразным можно считать раскрой заготовок на гильотинных ножницах при поставке исходного материала в форме листов.

Таблица 1

Основные данные по объекту разработки

№	Наименование показателей	Значение показателя	Допускаемые отклонения
1.	Материал – сталь 09Г2-4 ГОСТ 19281-73; ств, МПа	< 450	По ГОСТ
2.	Толщина металла, мм	2,5 – 7	По ГОСТ
3.	Максимальная ширина заготовки, мм	1420	+10
4.	Максимальная длина заготовки, мм	2498	±2
5.	Полезная ширина элемента, мм	1050	±2
6.	Профиль гофрированного листа	Шаг волны, мм	±0,7
		Внутренний радиус волны, мм	±2,5
		Высота волны, мм	±2
7.	Расстояние между отверстиями продольного шва	262	±0,7
	- смежных в ряду, мм	1050	±1,0
	- крайних в ряду, мм		
8.	Расстояние от центра поперечного стыка до края элемента, мм	47	±2
9.	Расстояние между центрами отверстий смежных рядов продольного стыка, мм	60	±0,5
10.	Расстояние от центра отверстий крайнего ряда продольного стыка до края элемента, мм	40	±0,7
11.	Точность размеров отверстий, мм	–	±1,5
12.	Радиус гибки элементов, мм	876	–
	Точность по просвету между шаблоном, длиной по дуге и поверхностью готового МГТ, мм:	...3503*	
	- в средней части	–	2
	- по концевым участкам	–	6
13.	Производительность комплекса, деталей/час	15	
14.	Суммарная мощность агрегатов линии, кВт	160	
* 24 размера с шагом 100...200 мм			

Формообразование волнистых панелей может осуществляться поштучным профилированием (возможность непрерывного профилирования исключается в связи с выводами по раскрою материала) или гибкой в штампе. Реализация поштучного профилирования могла бы показаться достаточно привлекательной, особенно при совмещении формообразования панелей с их гибкой по контуру. Однако существует ряд аргументов в пользу выбора второго способа формообразования панелей. Во-первых, для формовки листов толщиной от 5 до 7 мм потребовалось бы до 30 клеток профилировочного стана для обеспечения возможности задания профиля в валки и реализации последовательного принципа формовки во избежание утяжек и отклонения размеров профиля; во-вторых, даже при универсальной оснастке на любую толщину заготовке пришлось бы производить регулировку стана, что чревато значительными простоями оборудования и издержками по качеству продукции. В-третьих, поштучное профилирование обычно сопровождается наличием концевых эффектов, ухудшающих геометрию сечения панели и приводящих к отклонениям продольной кривизны на ее концевых участках. В-четвертых, профилирование заготовок толщиной 2,5 мм и 7,0 мм на одном и том же агрегате было бы связано с необоснованными затратами энергоносителей в случае формовки панелей небольшой толщины. В-пятых, формовка коротких панелей (для труб диаметром 1,0 – 1,5 м) сопряжена с необходимостью введения межклетьевых проводок и соответствующего увеличения длины профилировочного агрегата. В-шестых, возникают проблемы и с перфорацией в случае совмещения формообразования панели и ее гибки по контуру. Так, для пробивки отверстий на готовом элементе МГТ с продольной кривизной потребовалось бы множество штампов под каждую кривизну панели. Если же пробивку осуществлять в исходных листах, то потребовался бы весьма большой объем экспериментальных работ и набор статистики по исходной топологии отверстий, их форме и размерам. Это, в свою очередь, связано с большими финансовыми издержками и значительным временным периодом освоения технологии. Поэтому было принято решение о необходимости формообразования гофрированных панелей из листов различной толщины в одном и том же штампе. Учитывая возможные отклонения размеров сечения, необходимо было предусмотреть устройство для **калибровки** волнистых панелей.

Перфорация листов/панелей предусматривает выполнение отверстий под сборку по нескольким возможным вариантам: а) перфорация исходных листов; б) перфорация гофрированных листов перед их калибровкой; в) перфорация гофрированных листов после их калибровки; г) перфорация панелей с продольной кривизной.

Перфорацию исходных листов следует исключить в связи с выводами вышеизложенного обсуждения.

Перфорация гофрированных листов перед их калибровкой представляется более реалистичной, чем первый случай, однако и здесь будет лишняя операция формовки (калибровка), которая может влиять на форму и размеры отверстий, а также на шаг отверстий под поперечные швы трубы.

Перфорация гофрированных панелей после их калибровки позволяет избежать промежуточной операции, связанной с деформированием, и остается учесть лишь особенности гибки панели по контуру, где отверстия подвержены деформированию. Это, пожалуй, наиболее подходящий вариант последовательности технологических операций, хотя и он не является идеальным.

Перфорация панелей с продольной кривизной представляется весьма трудно реализуемой для элементов МГТ с различной толщиной стенки и с различными радиусами продольной кривизны в одном и том же инструменте. Кроме того, наличие продольной кривизны потребовало бы особых конструктивных и технологических решений даже при использовании нескольких штампов.

В этой связи оптимальным можно считать вариант пробивки отверстий после калибровки панелей, для которого следует учесть деформацию отверстий при операции придания продольной кривизны панели. Очевидно, профиль пуансонов следует выбирать исходя из условий деформации панелей при их изгибе на заданный радиус.

Гибка волнистых панелей по контуру может осуществляться в штампах и в роликовых машинах. Гибка в штампах представляется менее привлекательной из-за наличия двух негативных обстоятельств: различное пружинение для панелей различной толщины и больших габаритов гибочных штампов. Гибка в роликовых машинах может осуществляться по условной трехточечной схеме в трехвалковой или четырехвалковой машине с симметричным расположением подгибающих валков. Трехвалковая машина менее предпочтительна в силу двух соображений: а) трудность задания панели в машину и большие концевые эффекты; б) возможен недостаток тянущей силы за счет сил трения в связи со значительной толщиной листа. Более надежным технологическим решением является применение четырехвалковой машины, устраняющей указанные недостатки. Кроме того, вероятно, необходимо вводить дополнительную операцию для выравнивания условий формирования концевых участков панели: последовательную прокатку с одного и другого конца.

Покрытие панелей может осуществляться перед гибкой по контуру или после нее. Этот этап обработки представляет собой отдельную операцию, однако производительность линии гальваники должна быть не меньше производительности комплекса, осуществляющего формообразующие операции и перфорацию.

Сборочные операции обычно осуществляются на месте установки труб. В цехе сборка труб осуществляется преимущественно в целях контроля. Болтовое соединение элементов МГТ предполагает высокую точность расположения, формы и размеров отверстий, как, впрочем, высокую точность панелей в отношении их продольной кривизны. Натяг при сборке труб не допускается ввиду двух обстоятельств. Напряжения натяга снижают уровень допустимых рабочих напряжений трубы, а кроме того, уменьшают коррозионную стойкость конструкции. Для контроля геометрических размеров элементов МГТ разрабатываются контрольные шаблоны.

Исходя из анализа операций, условий базового предприятия под внедрение технологии и оборудования, технологических и экономических расчетов,

был разработан технологический маршрут и общая компоновка оборудования комплекса для производства элементов МГТ, представленные на рис. 2. Перечень вновь разрабатываемого и покупного оборудования дан в табл. 2. Комплекс включает пять линий согласно табл. 2. Все линии (кроме линии гибки) связаны между собой единой системой управления, причем каждая линия имеет и свою собственную систему управления (обычно шкаф и пульт). Рассмотрим кратко назначение, характеристики и работу каждой линии.

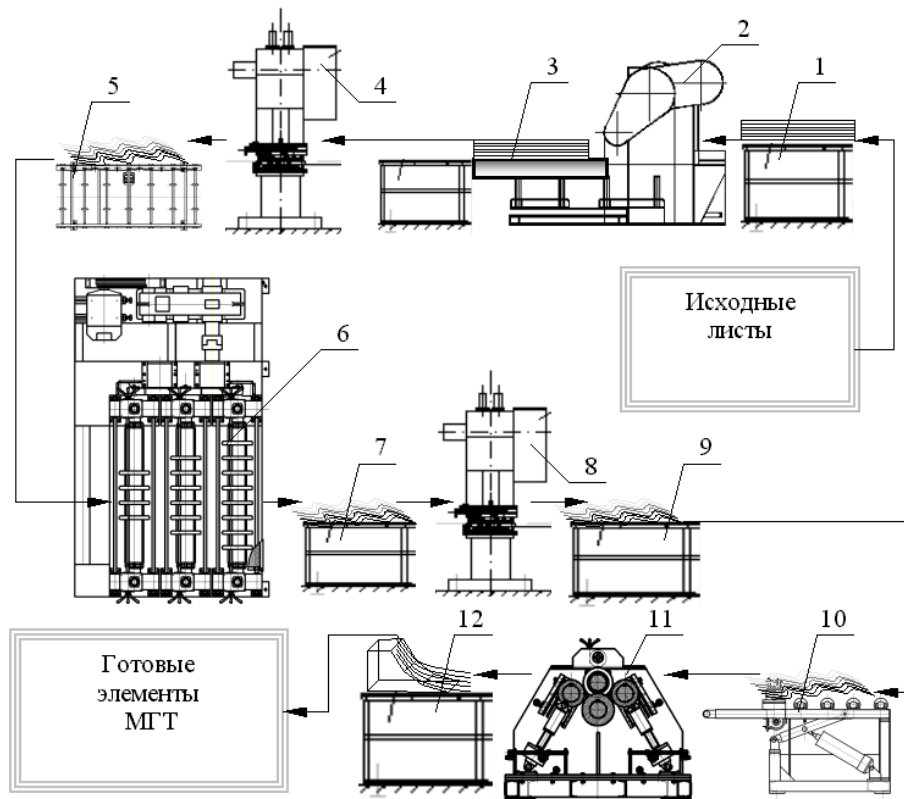


Рис. 2. Технологический маршрут и общая компоновка оборудования

Линия раскроя предназначена для поперечного раскроя металлического листа на заготовки требуемого размера. Все компоненты линии (кроме листо-вых ножниц) спроектированы, изготовлены и внедрены на предприятии Заказчика.

Основные технические характеристики оборудования линии:

- максимальная ширина разрезаемого материала, мм 1420
- максимальная толщина разрезаемого металла, мм.....7,0
- средняя скорость раскроя, м/мин 8...10
- общая длина линии, мм 13800
- общая ширина линии, мм 4730
- суммарная установленная мощность электродвигателей, кВт..... 29,91.

Лист, подлежащий раскрою, с помощью грузоподъемного устройства укладывается на подающий рольганг, и после включения приводов роликов всех трех секций рольганга лист подается к базовым роликам, и выдвигается первый упор с датчиком слежения. По сигналу от датчика включаются листовые ножи, и происходит отделение переднего концевого отхода. Отход падает вниз, первый упор убирается, а лист подается до второго упора, определяющего дли-

ну отрезаемой полосы. Снова включаются листовые ножницы, происходит отрубка основной заготовки, после чего убирается второй упор, выключаются приводы подающего рольганга и основная заготовка подается до конца приемного рольганга, имеющего сталкиватель, который подает заготовку вбок на стол-накопитель. Упоры и сталкиватель приводятся в движение пневматически.

Таблица 2

Перечень разрабатываемого оборудования для производства элементов МГТ

№	Наименование оборудования или устройств	Линия	Примечание
1.	Рольганг подающий	Раскроя	
2.	Ножницы листовые НБ 478		Ножницы приобретает Заказчик
3.	Рольганг приемный		
4.	Пресс К 4537А с шаговой подачей (2 шт.), гибочным штампом и столом подающим	Штамповки	Пресс приобретает Заказчик
5.	Транспортер угловой		
6.	Машина калибровочная МК1140	Калибровки	
7.	Рольганг		
8.	Пресс К3039А с устройством шаговой подачи и перфорирующим штампом	Перфорации	Пресс приобретает Заказчик
9.	Рольганг		
10.	Устройство загрузочное с подающим столом	Гибки	
11.	Машина гибочная МГТЭ 1150-7		
12.	Стол приемный		

Линия штамповки предназначена для гофрирования металлического листа, поступающего с участка поперечного раскроя. Весь состав оборудования линии (кроме прессы) спроектирован, изготовлен и внедрен на площадях Заказчика.

Основные технические характеристики оборудования линии:

- ширина заготовки, мм 1420
- максимальная толщина металла заготовки, мм 7,0
- максимальная скорость гофрирования, м/мин 2,7
- общая длина линии, мм 6750
- общая ширина линии, мм 3100.

Характеристики штампа:

Толщина заготовки, мм 2.5; 3.0; 4.0; 5.0; 6.0; 7.0
 Ширина заготовки, мм 1420
 Длина заготовки, мм 1188; 1712; 2498

Закрытая высота штампа, мм	1040
Рабочая высота заготовки от основания штампа, мм	550
Габаритные размеры штампа:	
длина, мм	710
ширина, мм	2850
высота, мм	1040
масса, кг	11050.

Лист с подающего стола, включающего каркас, три ряда роликов и тяговый цепной механизм, поступает в зону пресса.

При разблокированном прессе по команде от датчика наличия листа и нажатием кнопки «ПУСК» металлический лист линейками шаговой подачи перемещается в рабочую зону гибочного штампа (рис. 3). При опускании ползуна пресса происходит гибка волны гофра, а при его подъеме продольные линейки шаговой подачи перемещают лист на шаг 150 мм. После 10 ходов пресс останавливается, а готовый гофр линейками шаговой подачи подается на угловой транспортер (рис. 4) для его перемещения до упора с датчиком положения, после чего происходит подъем подвижной части углового транспортера и гофрированный лист перемещается в поперечном направлении на линию калибровки.

Основным формирующим инструментом является гибочный штамп, состоящий из державки прижима, державки калибра, которые крепятся между собой через пуансон гибочный, а своими основаниями к плите верхней. В державках на скалках с возможностью вертикального перемещения в колонках установлены прижим и пуансон калибровочный, которые своими основаниями упираются в буфер прижима и буфер калибра. Прижим и оба пуансона заканчиваются соответственно основанием прижима и законцовками пуансонов из инструментальной углеродистой стали. Диаграмму обжатия буферов прижима и калибра можно изменять подгонкой толщины вкладыша.

Низ штампа состоит из плиты нижней, основания, к которому крепятся опора, матрицы гибочной и матрицы калибровочной. Верх и низ штампа связаны колонками и втулками, установленными в корпусах. Два штыря начального положения листа поднимаются и опускаются пневмоцилиндрами. Изменением толщины пластины штыря можно добиться одинаковой величины обреза по ширине гофра (при поставке различной ширины листа от 1400 мм до 1420 мм). Изгиб гофра парирует отбойник, установленный на державке калибра с возможностью регулировки прокладкой.

Линия калибровки предназначена для калибровки металлического листа, поступающего с линии гофрирования. Все единицы оборудования линии калибровки (см. табл. 2) разработаны, изготовлены и внедрены на площадях Заказчика.

Основные технические характеристики оборудования линии:

• ширина заготовки, мм	1140
• максимальная толщина металла заготовки, мм	7,0
• скорость калибровки, м/мин	4,9
• общая длина линии, мм	9360

- общая ширина линии, мм 3600
- суммарная установленная мощность электродвигателей, кВт..... 12,1.

Калибровочная машина МК1140 (рис. 5):

Высота профиля, мм	50
Регулировка верхних валов по вертикали, мм	5,0
Скорость перемещения заготовки, м/мин.....	4,9
Рабочее перемещение верхнего вала вертикально, мм	180
Распирающее усилие в роликах, Н.....	$3,0 \times 10^5$
Крутящий момент на валу, Н·м	$1,1 \times 10^4$
Установленная мощность, кВт	11.

Габаритные размеры калибровочной машины:

Длина, мм	3200
Ширина, мм.....	1960
Высота, мм	1440
Масса, кг.....	6600.

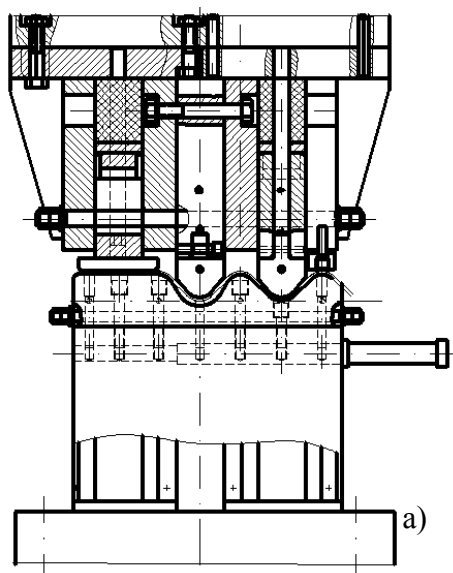


Рис. 3. Схема гибки заготовки в штампе (а) и размещение штампа с прижимом на прессе (б)

При поступлении на подающий рольганг листа с линии гофрирования нажать на панели пульта управления линии последовательно кнопки «ВПЕРЕД» подающего рольганга, приемного рольганга и калибровочной машины (включаются приводы подающего рольганга, приемного рольганга и калибровочной машины). Лист по направляющим роликам подающего рольганга поступает в калибровочную машину, откуда попадает на приемный рольганг для дальнейшего поступления на линию перфорации.

Линия перфорации предназначена для перфорации металлического листа, поступающего с линии калибровки. Все оборудование линии перфорации (кроме прессы) разработано, изготовлено и внедрено на площадях заказчика.

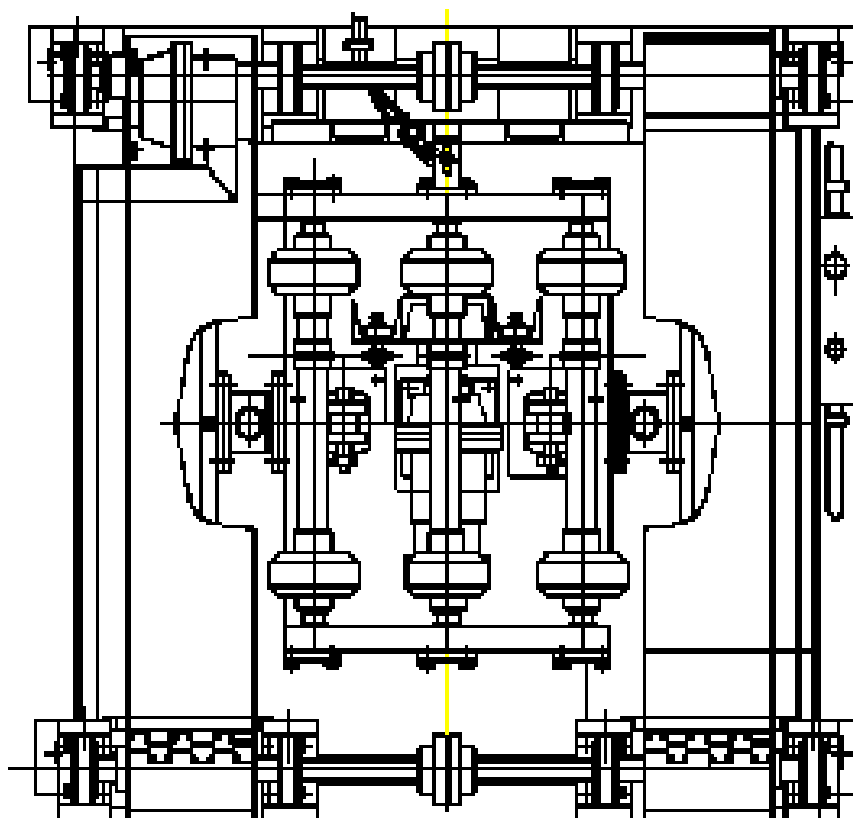
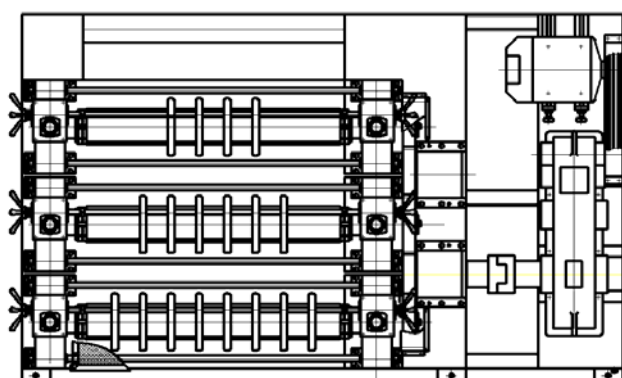


Рис. 4. Общий вид углового транспортера



а)



б)

Рис. 5. Калибровочная машина МК1140: а – схема (вид сверху); б – машина в сборе

Основные технические характеристики оборудования линии:

- ширина заготовки, мм 1140
- максимальная толщина металла заготовки, мм 7,0
- максимальная скорость перфорации, м/мин 5,0
- общая длина линии, мм 9600
- общая ширина линии, мм 4800
- суммарная мощность с учетом мощности прессы К3039А, кВт 98,25.

Размер гофрированного листа:

- шаг волны, мм 150
- высота, мм 50.

Длина гофрированного листа, мм 1188; 1712; 2498

Число шагов перфорации, шт	4; 6; 9
Закрытая высота штампа перфорирующего, мм	700
Габаритные размеры штампа:	
длина, мм	1050
ширина, мм	2100
высота, мм	700
масса, кг	3985.

При поступлении листа с линии гофрирования вращающиеся ролики подающего рольганга перемещают гофрированный лист до упоров начального положения на перфорирующем штампе. По команде с пульта управления гофрированный лист зажимается прижимами шаговой подачи (упоры начального положения убираются). Происходит перфорация группы отверстий по переднему краю листа. Одновременно прижимы устройства шаговой подачи освобождают лист и каретка перемещается из переднего в заднее положение с последующей фиксацией гофрированного листа.

По завершению рабочего хода пресса происходит подъем блока пуансонов с одновременным перемещением каретки в переднее положение (гофрированный лист перемещается на шаг подачи). Далее происходит перфорация только овальных боковых отверстий с поэтапным перемещением кареткой гофрированного листа на необходимое количество шагов. После чего происходит пробивка группы отверстий по заднему краю гофрированного листа с последующим перемещением листа за зону штампа.

После подъема прижимов гофрированный лист перемещается по приемному рольгангу на линию гибки. Одновременно подается команда на подъем упоров начального положения. Цикл повторяется для следующего гофрированного листа.

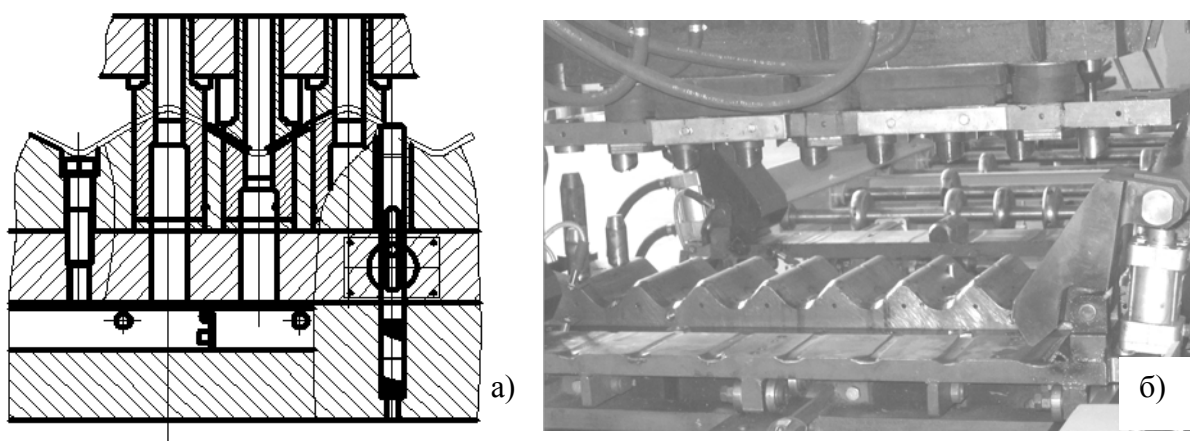


Рис. 6. Штамп перфорирующий: а – схема; б – штамп в сборе

Линия гибки предназначена для гибки гофрированного металлического листа на требуемый радиус. Все единицы оборудования линии гибки (см. табл. 2) разработаны, изготовлены и внедрены на площадях заказчика.

Основные технические характеристики оборудования линии:

- максимальная ширина заготовки, мм
- максимальная толщина металла заготовки, мм

1200

7,0

- скорость гибки, м/мин 5
- общая длина линии, мм 10100
- общая ширина линии, мм 3100
- суммарная мощность электродвигателей, кВт..... 19,17.

Машина гибочная МГГЭ 1150-7:

- Высота профиля, мм 50
- Скорость гибки, м/мин 5
- Минимальный радиус гибки, мм 500
- Максимальное перемещение боковых гибочных валов, мм..... 180
- Максимальное горизонтальное перемещение центральных валов, мм ±10
- Максимальное перемещение верхнего гибочного вала, мм +10
- Установленная мощность, кВт..... 18.

Габаритные размеры:

- Длина, мм 2200
- Ширина, мм..... 3100
- Высота, мм 1900
- Масса, кг..... 11000.

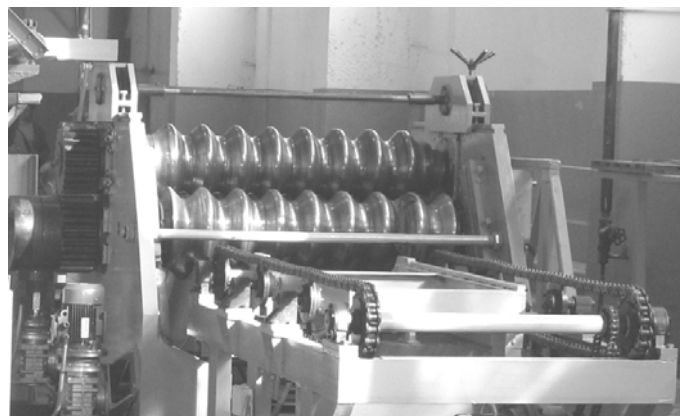
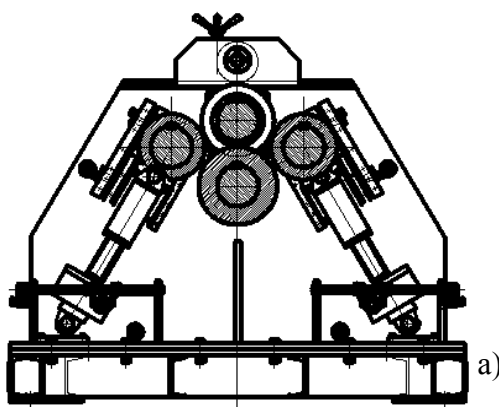


Рис. 7. Машина гибочная МГГЭ 1150-7: а – вид машины в разрезе; б – машина в металле

При работе пачку гофрированных листов на специальном поддоне с помощью грузоподъемного устройства устанавливают на стол загрузочного устройства. Далее перемещают отдельную заготовку на опорные ролики подающего стола, управляя с главного пульта нажатием соответствующих кнопок блока "МАНИПУЛЯТОР". При нажатии кнопки "ПОДАЧА ЛИСТА" включаются пневмоприводы подъема рамы подающего стола и прижима роликов. Рамы подающего и приемного столов подняты на определенный угол, обеспечивающий плавную подачу заготовки в ролики гибочной машины и прием из нее готового элемента МГТ. После получения из гибочной машины отформованного на определенный радиус гофрированного листа рамы приемного и подающего стола возвращаются в горизонтальное положение. Готовый элемент МГТ по цепному конвейеру приемного стола подается в тару. Гибка по контуру элементов МГТ производится двусторонней прогонкой с целью обеспечения эквивалентности концевых эффектов и удовлетворения тем самым условиям сборки: На рис. 8 показаны элементы МГТ и конечные изделия в сборе.



Рис. 8. Элементы МГТ и труба в сборе: а, б – перфорированный элемент без продольной кривизны; в – гофрированная панель с перфорацией и продольной кривизной; г – болтовое соединение элементов МГТ; д, е – гофрированные трубы в сборе

Изготавливаемые элементы МГТ полностью соответствуют требованиям технической документации и технического задания. Технологическое оборудование также соответствует техническому заданию по функциональному назначению, производительности, надежности, удобству обслуживания и т. д. Технология и оборудование успешно внедрены на площадях Заказчика и эксплуатируются в настоящее время.

Библиографический список

1. Low Profile Box Culvert // Engineering News Record. – 1982, V. 208, № 14. – Р. 14 – 15.
2. Исследование и разработка ТЗ на конструкцию МГТ с гофрами 150x50 мм и толщиной металла до 5 мм / Отчет Новосибирского филиала ВНИИТрансСтрой, 1988. – № НФ-88/89-3-28. – 143 с.



- **Марковцев Владимир Анатольевич**, канд. техн. наук, генеральный директор ОАО «Ульяновский НИАТ»
- **Филимонов Вячеслав Иванович**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета
- **Волков Александр Александрович**, аспирант кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

УДК 621.981

ОЦЕНКА ДЛИНЫ ЗОНЫ ПЛАВНОГО ПЕРЕХОДА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРОФИЛЕЙ С ОТБОРТОВКАМИ

канд. техн. наук, доцент Мищенко О. В., Лисин И. О.

Гнутые профили проката – высокоэкономичный вид металлопродукции, изготавливаемой методом непрерывного профилирования листового материала на профилегибочных агрегатах различных типов.

Метод интенсивного деформирования (МИД) в настоящее время широко применяется для производства гнутых профилей. Основной особенностью этого метода формообразования является одновременная формовка всех элементов профиля, что позволяет существенно уменьшить число переходов, использовать компактное оборудование и тем самым снизить затраты на изготовление профилей, особенно в условиях мелкосерийного производства [1].

При разработке технологии производства многоэлементных профилей приходится осуществлять оценку протяженности зон плавного перехода (ЗПП) для назначения оптимальных углов подгибки и во избежание переформовки заготовки в роликах предшествующего перехода.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований формовки С-образного профиля в сравнении с математической моделью зоны плавного перехода [2], построенной на основе локальных жесткостей.

При рассмотрении подгибаемой полки приведенных размеров, смежной с дном профиля (рис. 1, а), опустили индексацию переходов. Считали, что в данном переходе (скажем, k -м) угол подгибки равен θ_k , а в межклетьевом пространстве текущий угол подгибки является функцией $\theta(x_2)$. При этом имели в виду, что k ($k-1$)-му переходу суммарный угол подгибки будет составлять α_{k-1} , а к k -му переходу – $\alpha_k = \alpha_{k-1} + \theta_k$.

Уравнение срединной поверхности полки в выбранной системе координат имеет следующий вид:

$$x_1 - \frac{C}{2} = v \cdot \cos \theta(u) ; \quad x_2 = u ; \quad x_3 = v \cdot \sin \theta(u) , \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3 – декартовы координаты; C – ширина донной части профиля; v, u – криволинейные координаты.

Для определения деформаций полки при подгибке вычисляли коэффициенты первой квадратичной формы ее срединной поверхности, задаваемой уравнениями (1):

$$E = \frac{\partial x_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial u} = 1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial u} \right)^2; F = \frac{\partial x_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial v} = 0; G = \frac{\partial x_i}{\partial v} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial v} = 1, \quad (2)$$

где E, F, G – коэффициенты первой квадратичной формы.

Длина дуги dS в криволинейной системе координат определяется выражением:

$$dS = \sqrt{E \cdot (du)^2 + 2F \cdot du \cdot dv + G \cdot (dv)^2}. \quad (3)$$

Продольная логарифмическая деформация e_u для точек, равноудаленных от зоны изгиба, с учетом формул (2 – 3) определим соотношением ($dv = 0$):

$$e_u = \ln \left(\frac{dS|_{dv=0}}{du} \right) = \ln(\sqrt{E}) = \frac{1}{2} \cdot \ln E. \quad (4)$$

Логарифмическую деформацию e_v в направлении координаты v с учетом соотношений (2 – 3) вычислим по формуле:

$$e_v = \ln \left(\frac{dS|_{du=0}}{dv} \right) = \ln(\sqrt{G}) = 0. \quad (5)$$

Учитывая допущение о несжимаемости материала, на основании формул (4) и (5) получим формулу для определения деформации по толщине полки:

$$e_n = -e_u - e_v = -e_u. \quad (6)$$

Интенсивность деформаций e_i с учетом формулы (6) имеет следующий вид:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \left(1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial \theta(u)}{\partial u} \right)^2 \right). \quad (7)$$

Протяженность зоны плавного перехода определим, установив на основании формул (6) и (7) предварительно работу пластической деформации полки, угловой зоны и дна профиля [2]:

$$L = \left(\frac{\theta_k}{D} \right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{1}{\zeta}, \quad (8)$$

$$\text{где } D = \frac{2m+1}{\zeta \cdot (2m+2)}; \quad \zeta = \frac{Y+Z}{W \cdot (2m+2)}; \quad B = \frac{2m+2}{2m+1};$$

$$W = \frac{A \cdot S \cdot b^{2m+3}}{(m+1)(2m+3)} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1}; \quad Z = \frac{A \cdot S \cdot C}{(m+1) \cdot 4 \cdot \theta_k} \cdot e_{np}^{m+1};$$

$$Y = \frac{2A}{1-m^2} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1} \cdot \left(\frac{S}{2} \right)^{m+2}; \quad A, m - \text{параметры упрочнения}; S - \text{толщина заготовки, мм}; b - \text{длина полки, мм}.$$

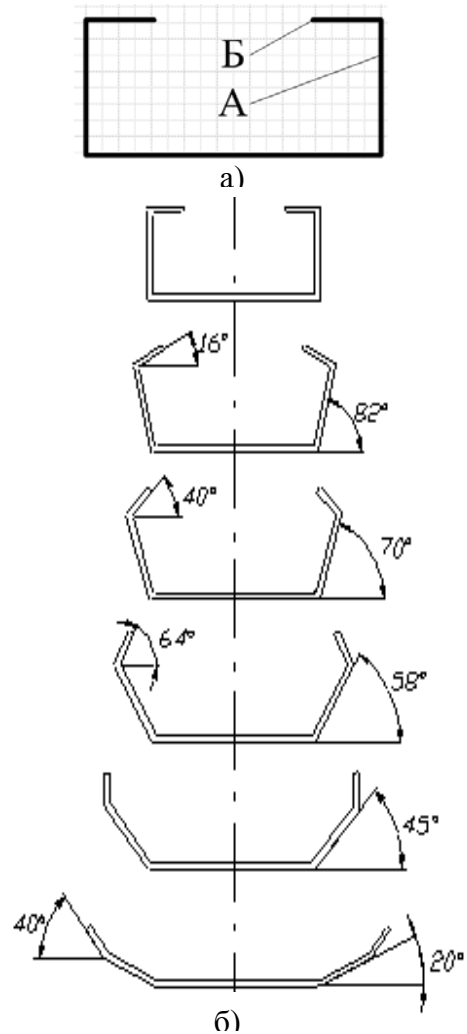


Рис. 1. С-образный профиль 34,6x13,2x1,8 мм:
а – исследуемые элементы;
б – схема формообразования

Рассмотрим предельные случаи для модели (8). Если положить $C = 0$ ($Z = 0$), то получим модель Гуна-Полухина для формовки уголка из упрочняющейся полосы [3]. Полагая $m = 0$ (неупрочняющийся материал заготовки), предлагаемая модель в точности совпадает с моделью ЗПП при стесненном изгибе для случая формовки изотропной полосы с постоянным радиусомгиба и одинаковым средним диаметром формующих роликов смежных переходов.

Для проверки зависимости (8) и с целью иллюстрации применения данной модели провели исследование С-образного профиля 34,6x13,2x1,8 мм (рис. 1, б).

Для расчета протяженности зон плавного перехода на основе модели (8) использовали программу MathCAD-200Pro. Результаты расчетов и экспериментальные данные представлены на рис. 2.

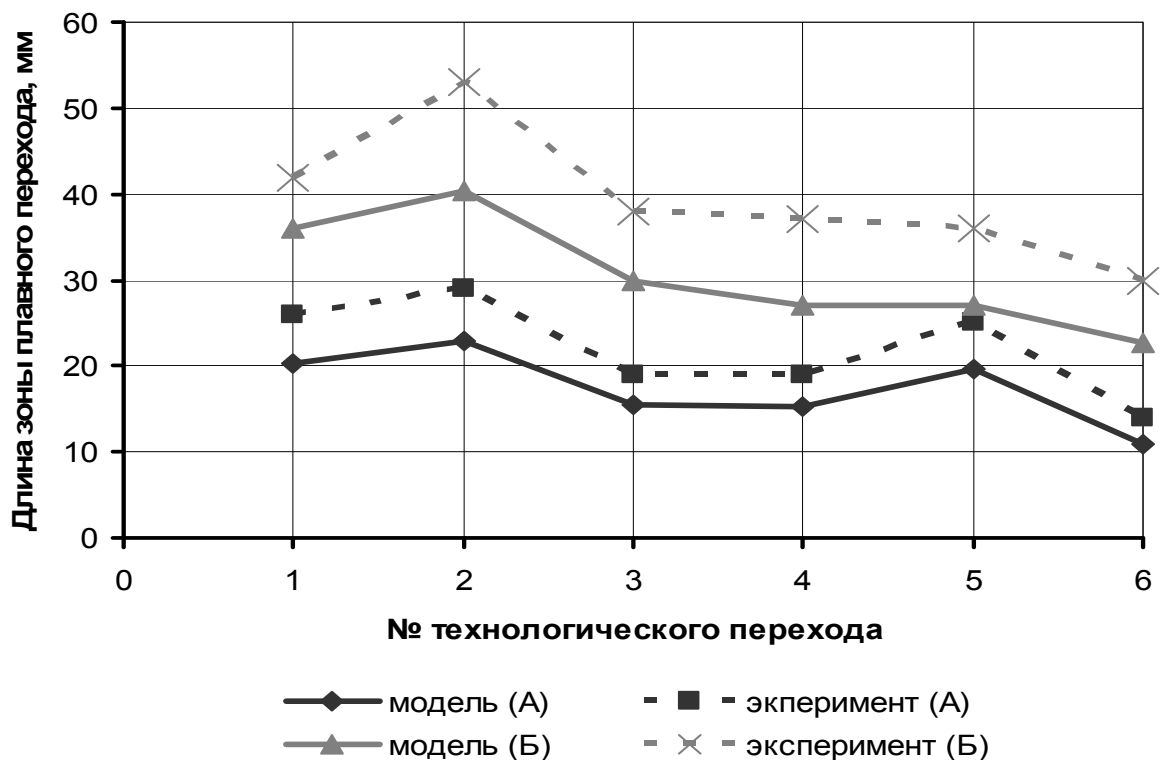


Рис. 2. Изменение протяженности ЗПП С-образного профиля 34,6x13,2x1,8 мм

Разработанная модель позволяет прогнозировать изменения ЗПП заготовки по переходам в зависимости от выбранной схемы формообразования и производить уточненный расчет углов подгибки для выравнивания продольной деформации подгибаемых полок по переходам. Эту модель можно также использовать на стадии разработки технологии для предотвращения переформовки заготовки профиля с широкими полками при соблюдении условия: $L_k \leq L_M$, где L_M — межклетьеовое расстояние профилировочного станка.

Библиографический список

1. Филимонов, С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. — Ульяновск : Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. — 246 с.
2. Лапин, В. В. Ослабление углов подгибки полок при формообразовании профиля из упрочняющегося материала / В. В. Лапин, С. В. Филимонов // Фор-

мообразование гнутых профилей: теория и практика. Выпуск 1 (2011 г.): Сборник научных трудов УлГТУ. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2011. – С. 9-19.

3. Пластическое формоизменение металлов / Г. Я. Гунн, П. И. Полухин, В. П. Полухин, Б. А. Прудковский. – М. : Металлургия, 1968. – 416 с.



- **Мищенко Ольга Владимировна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета
- **Лисин Игорь Олегович**, аспирант кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

УДК 621.981

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ШИРОКОПОЛОЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ

Баранов А. С., канд. техн. наук Филимонов А. В., Карпов С. А.

Гнутые широкополочные профили (с отношением основной подгибаемой полки к толщине заготовки более 30) находят широкое применение в автомобильной промышленности (несущие элементы кузова, направляющие дверей, сидений и т. п.), строительной индустрии (подпорки, элементы сборных панелей) и электротехнической промышленности (ребра жесткости трансформаторов, шкафов низковольтной аппаратуры, электрощитов). Основными проблемами, возникающими при изготовлении широкополочных профилей методом интенсивного деформирования [1], являются минимизация числа технологических переходов при производстве небольших партий профильных изделий и сопутствующая потеря устойчивости периферийных элементов из-за «жестких» схем формообразования. Широкополочные профили, несущие периферийные элементы жесткости (рис. 1), меньше подвержены потери устойчивости, в то время как швеллерные профили являются весьма уязвимыми в этом отношении. За редким исключением режимы формообразования широкополочного швеллерного профиля (по углам подгибки основных полок) обладают преимущественностью для производства широкополочных профилей с периферийными элементами жесткости [1].

Цель работы – рассмотрение расчетных процедур при разработке технологии формообразования широкополочного профиля преимущественно швеллерного типа с минимизацией числа технологических переходов.

Алгоритм разработки технологии формообразования широкополочного швеллерного профиля методом интенсивного деформирования включает следующие этапы [2]: 1) определение числа переходов, предварительный выбор схем и режимов формообразования; 2) выбор подходящего оборудования; 3) определение углов подгибки элементов профиля по переходам; 4) определение протяженности зоны плавного перехода в межклетьевом пространстве; 5) анализ схемы формообразования на предмет отсутствия кромковой волнистости.

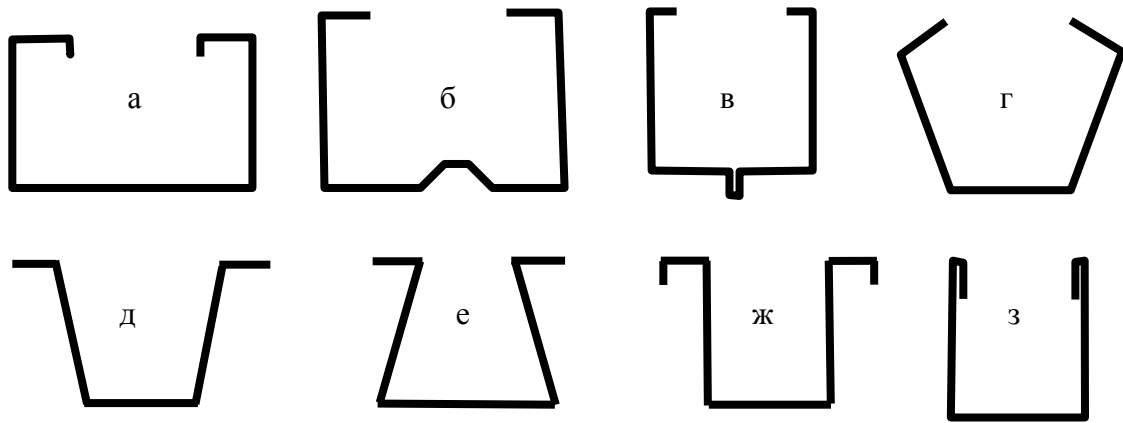


Рис. 1. Широкополочные профили с периферийными элементами жесткости, изготавливаемые по схемам, близким к схемам формообразования широкополочного швеллерного профиля: а – С-образный профиль с отбортовками на горизонтальных полках; б – С-образный профиль с рифтом в донной части; в – С-образный профиль с петельным элементом в донной части; г – С-образный профиль с наклонными полками; д – корытный профиль; е – корытный профиль с поднутрением основных подгибаемых полок; ж – корытный профиль с отбортовками на горизонтальных полках; з – швеллерный профиль с периферийными элементами двойной толщины

Рассмотрим теоретические основы для реализации каждого из этих этапов согласно работе [2].

Число переходов определяют на основе полуэмпирической модели:

$$N = F \cdot \left[\sqrt{\frac{L_M}{C}} \cdot \frac{2 \cdot b \cdot (1 - \cos \alpha)}{L_M \cdot n} \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{r_b \cdot s}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где F – функция формы; L_M – межклетьеовое расстояние предполагаемого к использованию профилировочного станка, мм; b – ширина подгибаемой полки, мм; α – суммарный угол подгибки боковых полок, град; C – ширина дна профиля, мм; R – радиус зоны изгиба, соответствующий 98% уровню охвата зоны изгиба пластическими деформациями, мм; r_b – внутренний радиус зоны сгиба, мм; s – толщина заготовки, мм; n – число зон изгиба профиля.

В формуле (1) первый сомножитель в квадратных скобках отражает влияние формы дна заготовки профиля, второй – степень «стеснения» заготовки, третий – жесткость угловой зоны. Функция формы F определяется соотношением:

$$F = 3,2 \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{A}{A'}, \quad (2)$$

где A – площадь фигуры, охватываемой контуром сечения профиля и линией соединения кромок, мм²; A' – площадь фигуры, построенной на отрезке дна профиля и отрезке, соединяющем кромки профиля, мм².

Предполагаемое к использованию профилировочное оборудование выбирается на основе рассчитанного числа переходов и характеристик профиля и заготовки. Обычно в паспорте станка указывается предельная высота формируемого профиля, ширина, толщина и предел текучести или прочности материала используемой заготовки.

Определение углов подгибки элементов профиля по переходам в значительной степени влияет на качество гнутого профиля, потребное количество формирующих клеток, а следовательно, на себестоимость готовой продукции. Углы подгибки по переходам для швеллеров можно найти по формуле:

$$\alpha_k = \arcsin \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[\sin \left(\frac{k \cdot \alpha}{N} \right) + \frac{k}{N} \cdot \sin \alpha \right] \right\}, \quad (3)$$

где k – номер текущего перехода; α – суммарный угол подгибки, град; n – число переходов.

Проверку правильности выбора углов подгибки следует проверять и корректировать в соответствии с упрощенной моделью зоны плавного перехода:

$$L_k = \sqrt{\frac{8 \cdot \Theta_k \cdot b^3}{3s}}, \quad (4)$$

где L_k – протяженность зоны плавного перехода на k -м переходе, мм; Θ_k – угол подгибки в текущем переходе, рад.

При этом должно выполняться условие:

$$0,2L_M \leq L_k \leq L_M \quad (5)$$

где L_M – межклетьеовое расстояние станка по паспорту, мм; L_k – протяженность зоны плавного перехода, мм.

В принципе, можно получить значение угла подгибки из формулы (4) и непосредственно сравнивать его со значением угла, рассчитанного по формуле (3). Несоблюдение условия (5) приводит к переформовке профиля, необоснованным энергетическим затратам и возникновению дефектов профиля.

Однако выбор углов, удовлетворяющих условию (5), еще не гарантирует отсутствие такого дефекта, как кромковая волнистость, возникающая вследствие различия продольной деформации периферийных участков подгибаемых элементов профиля и продольными деформациями его донной части. Возможность появления кромковой волнистости можно прогнозировать, сопоставляя приобретенную деформацию полки e_k^f и критическую деформацию e_k^{cr} на основе индикаторной функции:

$$I(\xi) = \begin{cases} 0, & \text{при } \xi < 1 \\ 1, & \text{при } \xi \geq 1 \end{cases}, \quad (6)$$

где $I(\xi)$ – индикаторная функция; ξ – отношение остаточной (приобретенной) деформации полки к критической деформации, приводящей к локальной потере устойчивости полки по выходу профиля из роликового калибра.

Продольную деформацию полки на переходе k определяют по формуле:

$$e_k^f = \ln \sqrt{1 + \left[\frac{2 \cdot b \cdot \sin \frac{\theta_k}{2}}{L_k - (R_k^0 + b \cdot \sin \theta_k) \cdot \sin \gamma(L_M)} \right]^2}, \quad (7)$$

где R_k^0 – радиус катающих валков под стенкой в k -м переходе, мм; $\theta_k = \alpha_k - \alpha_{k-1}$; α_k, α_{k-1} – углы подгибки на k -м и $(k-1)$ -м переходах соответ-

ственно; $\gamma(L_M)$ – угол контакта заготовки и роликов k -го перехода, определяемый соотношением:

$$\gamma(L_M) = \arccos \left(\frac{L_M^2 - (b \cdot \sin \theta_k)^2}{L_M^2 + (b \cdot \sin \theta_k)^2} \right). \quad (8)$$

Для установления критических деформаций полок применяют уравнение:

$$e_k^{cr} = \left[(k^* \cdot \lambda)^2 \cdot \frac{n \cdot E}{K} \cdot \left(\frac{s}{H_k - h_k^{cg}} \right)^4 \right]^{\frac{1}{n+1}}, \quad \lambda = \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \mu^2)}, \quad (9)$$

где k^* – коэффициент, учитывающий условия закрепления краев полки; E , μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно; H_k , h_k^{cg} – высота профиля и координата центра тяжести сечения профиля на k -м переходе соответственно, мм; K , n – параметры упрочнения материала заготовки.

Соотношение (9) дает выражение предельной деформации в закритической области, а потому $\mu = 0,5$. Коэффициент k^* , учитывающий условия закрепления краев пластин-полок (один край зашпелен, другой – свободен), принято брать равным 2,47.

В формуле (9) $H_k - h_k^{cg}$ определяется зависимостью:

$$H_k - h_k^{cg} \approx \frac{b + c}{2 \cdot b + c} \cdot b \cdot \sin \alpha_k. \quad (10)$$

При формообразовании тонкостенных профилей с широким дном (например, при $C/s > 100$) возникает «эффект желобчатости» – прогиб донной части профиля, позволяющий назначать более жесткие режимы подгибки (на $2 - 7^\circ$) для таких профилей по сравнению с профилями, имеющими узкую донную часть. Тем самым обеспечивается возможность сокращения числа переходов для таких профилей.

При проектировании роликовой оснастки следует назначать размеры калибра последней формующей пары роликов с учетом изменения размера профиля на величину ΔL вследствие пружинения так, чтобы размер профиля соответствовал нижней границе допускаемого размера. Это позволяет выдержать допуски на линейные размеры поперечного профиля, а кроме того, создается запас (в пределах величины поля допуска на профиль) на будущий износ роликов, что позволяет повысить срок их службы.

Величину изменения линейного размера элемента профиля вследствие пружинения определяют на основе теоремы Ильюшина о разгрузке с учетом особенностей интенсивного деформирования:

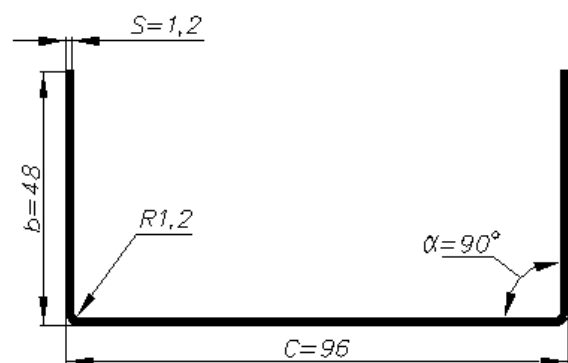


Рис. 2. Сечение изготавливаемого швеллерного профиля

$$\Delta L = \frac{3 \cdot k \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot (r + 1/2)^2}{1 + 6 \cdot \frac{\sigma_T}{E} \cdot (r + 1/2)} \cdot s, \quad (11)$$

где k – коэффициент; σ_T – предел текучести материала, МПа.

Рассмотрим применение вышеприведенного алгоритма создания технологии производства широкополочных профилей на примере швеллерного профиля (рис. 2), изготавливаемого из стали 10.

Число переходов. Количество клеток, необходимое для реализации технологии, определяем на основе модели (1) – (2) при значениях параметров согласно рис. 2. При этом ориентируемся на доступный парк разработанного технологического оборудования, производимого ООО «Спецтехнология» (г. Ульяновск) и подходящего для изготовления данного профиля по габаритным характеристикам его сечения и механическим свойствам заготовки. Выпускаемые станки в зависимости от назначения имеют межклетьевое расстояние 240, 300 и 400 мм, хотя другими компаниями выпускаются станки с межклетьевым расстоянием 600 мм и более (преимущественно для изготовления крупногабаритных профилей). Исходя из габаритных размеров сечения, возьмем предварительно $L_M = 400$ мм. Для более наглядной иллюстрации модель (1) – (2) представим в графическом виде с использованием прикладной программы MathCAD – 2001 Pro (рис. 3). На рис. 3 стрелками указана процедура определения числа переходов. Окончательно, с учетом значения функции Integer, выделяющей целую часть числа, получаем искомое число переходов:

$$N = \text{Integer}(N) + 1 = 5.$$

Возьмем схему формообразования профиля в закрытых калибрах, характерную для метода интенсивного деформирования (монотонная подгибка полок по отношению к базовому элементу – дну профиля), при режиме формовки зон изгиба с постоянным радиусом на всех переходах.

Выбор профилировочного станка. В качестве основного формообразующего оборудования для исследуемого швеллерного профиля (по высоте профиля, ширине развертки заготовки и числу переходов) был определен станок профилировочный универсальный СПУ-400К6х65 с характеристиками, указанными в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики станка СПУ-400К6х65

№ п/п	Наименование параметра и его размерность	Значение параметра
1.	Число клеток, шт.	6
2.	Межклетьевое расстояние, мм	400
3.	Высота поверхности станины над полом, мм	800
4.	Высота нижнего вала клетки над столом, мм	200
5.	Максимальная глубина профилирования, мм	60
6.	Скорость профилирования, м/мин	8 – 10
7.	Толщина обрабатываемой заготовки, мм	0,5 – 2,0
8.	Максимальная ширина заготовки, мм	360

№ п/п	Наименование параметра и его размерность	Значение параметра
	Клеть профилирующая:	
9.	Диаметр рабочих валов, мм	65
10.	Длина рабочей части валов, мм	400
11.	Регулировка верхнего вала по вертикали, мм	50
12.	Межосевое расстояние (min – max)	130 – 190
13.	Мощность электродвигателя стана, кВт	11

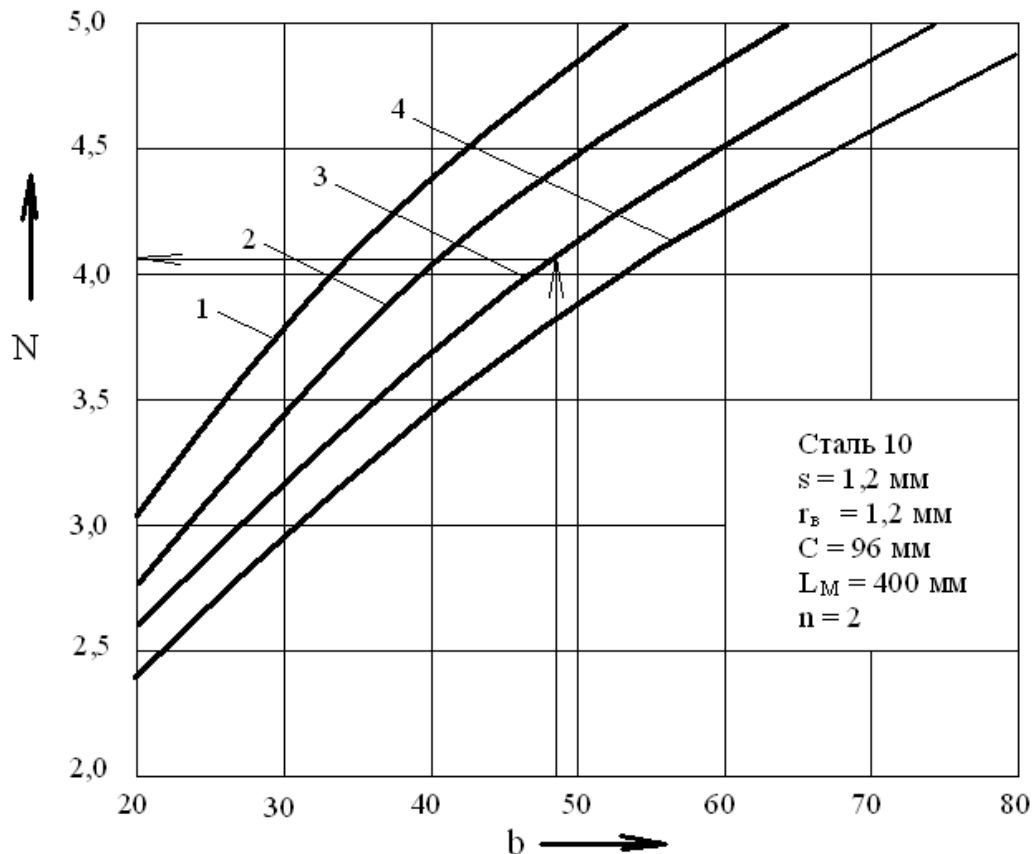


Рис. 3. Диаграмма определения числа переходов:
 1, 2, 4 – $L_M = 200; 300, 400$ и 500 мм соответственно

Определение углов подгибки. Результирующие углы подгибки для каждого перехода рассчитываем по формуле (4) и строим схему формообразования, приведенную на рис. 4, где также указаны результирующие углы подгибки для каждого перехода.

Протяженность зоны плавного перехода. Протяженность зоны плавного перехода в каждом из переходов вычисляется по формуле (4), а затем по критерию (5) проверяется допустимость расчетных углов подгибки. Приведенные в табл. 2 значения протяженности зоны плавного перехода, полученные на основе формулы (4), удовлетворяют критерию формулы (5), однако следует выполнить проверку схемы формообразования по критерию отсутствия кромковой волнистости.

Протяженность зоны плавного перехода

Номер перехода	1	2	3	4	5
$L_k, \text{мм}$	251,32	252,29	255,20	264,65	351,94
$\Theta_k, ^\circ$	14,75	14,85	15,19	16,32	28,89

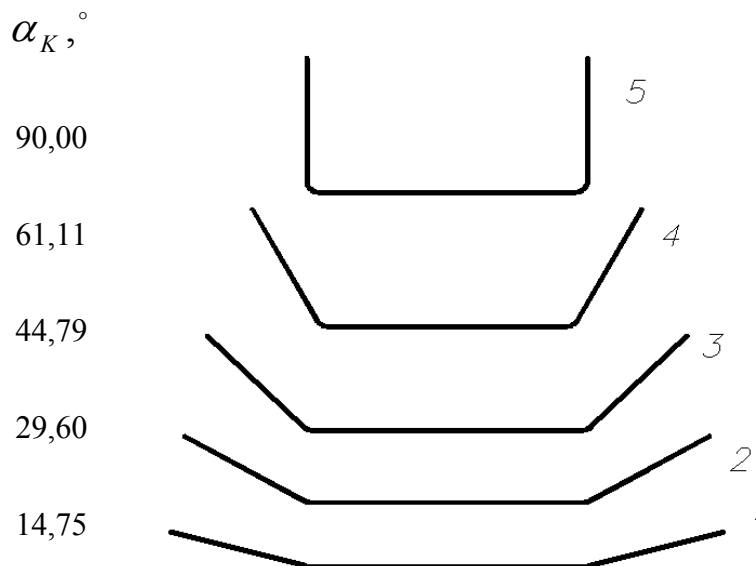


Рис. 4. Схема формообразования и углы подгибки профиля

Отсутствие кромковой волнистости. Анализ схемы формообразования на предмет отсутствия кромковой волнистости предусматривает использование зависимостей (6) – (10) для расчета значения индикаторной функции (6). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Выбранная схема формообразования не приводит при ее осуществлении к кромковой волнистости, в чем можно убедиться по значениям индикаторной функции в табл. 3. Эффект «желобчатости» учитывать не обязательно, поскольку его проявление становится заметным при $C/s > 100$, а в данном случае $C/s = 80$.

Прежде чем приступить к проектированию формующей оснастки, вычислим изменение линейного размера (на одну сторону) донной части профиля по формуле (11). Расчет дает значение $\Delta L = 0,026$ мм, следовательно, номинальную ширину калибра роликов последнего перехода можно увеличить на 0,05 мм. Теперь можно приступить к проектированию технологического оснащения и технологической подготовке производства (ТПП). Рис. 5, а иллюстрирует реализацию технологии производства швеллерных профилей; на рис. 5, б приведены швеллерные профили, освоенные в ООО «Спецтехнология».

Отметим, что в отличие от метода интенсивного деформирования изготовление швеллерных широкополочных профилей с $b/s > 40$ традиционным профилированием предусматривает использование 6–8 и более переходов.

Проверка отсутствия кромковой волнистости

Параметр, размерность	Номер перехода				
	1	2	3	4	5
H_k , мм	12,221	23,709	33,817	42,026	48,000
h_k^{cg} , мм	3,055	5,927	8,455	10,506	12,000
$\gamma_K(L_M)$	0,063	0,063	0,063	0,063	0,118
e_k^f	$4,806 \cdot 10^{-4}$	$4,881 \cdot 10^{-4}$	$5,108 \cdot 10^{-4}$	$5,904 \cdot 10^{-4}$	$1,856 \cdot 10^{-4}$
e_k^{cr}	0,2101	0,0231	0,0071	0,0034	0,0022
ξ_k	0,00229	0,02113	0,07225	0,17213	0,84364
$I(\xi_k)$	0	0	0	0	0

Что касается выбора технологического оборудования (в особенности вновь приобретаемого), то следует адресоваться к рекомендациям работы [3], где дана классификация существующих отечественных и зарубежных профилировочных станков, указаны их преимущества и недостатки, а также преимущественные сферы использования.

Приведенные расчетные процедуры для швеллерного профиля могут быть обобщены на более широкий класс широкополочных профилей с периферийными элементами жесткости, сечения которых приведены на рис. 1. При этом следует учитывать то обстоятельство, что при формовке широкополочных профилей с периферийными элементами жесткости подгибаемая полка обладает большей жесткостью за счет «надстройки», чем гладкая полка. В этом случае необходимо учитывать жесткость элементов, которые несет основная подгибаемая полка. Учет изменения жесткости полки можно производить согласно следующей процедуре. Первоначально подсчитывается момент сопротивления полки на кручение на уровне предшествующего перехода, а затем определяется толщина эквивалентной гладкой полки той же ширины. Дальнейшие технологические расчеты с использованием приведенных моделей не отличаются от описанной выше процедуры.

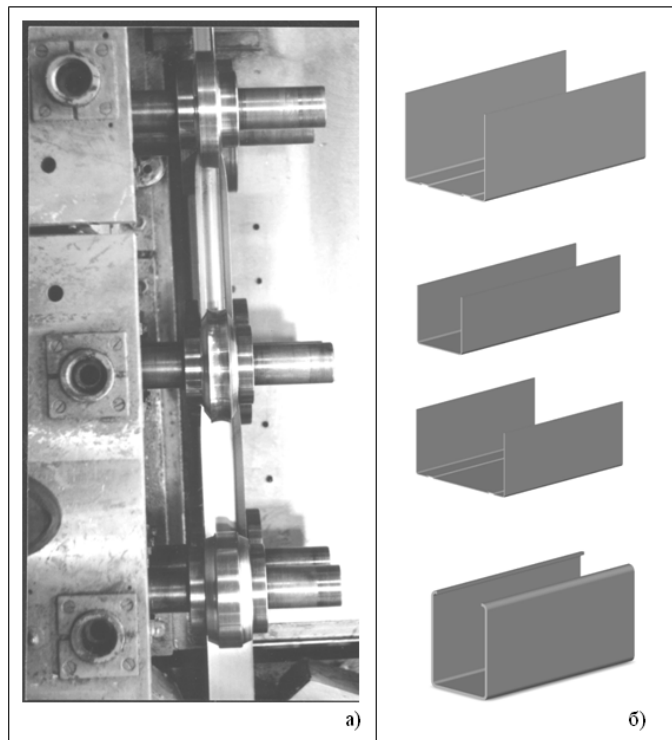


Рис. 5. Производство швеллерных профилей:

а – профилирование ленты в швеллер;

б – виды освоенных профилей

Выводы:

1. Применение метода интенсивного деформирования для производства широкополочных профилей взамен традиционного профилирования позволяет сократить до 30% число технологических переходов.
2. Формализация расчетных и проектных процедур уменьшает трудоемкость и сокращает время ТПП гнутых широкополочных профилей.
3. Расчетные процедуры для швеллерного профиля могут быть обобщены на более широкий класс широкополочных профилей с периферийными элементами жесткости путем приведения конфигурации профиля к типовой конфигурации швеллерного профиля с приведенной толщиной подгибаемой полки по критерию эквивалентности моментов сопротивления на кручение.

Библиографический список

1. Филимонов, С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2008. – 447 с.
2. Филимонов, С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 246 с.
3. Филимонова, В. И. Классификация и тенденции развития профилировочного оборудования / В. И. Филимонов // Производство проката. – 2008. – №4. – С. 37-43.



- **Баранов Александр Сергеевич**, аспирант кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета; начальник НИС ОАО «Ульяновский НИАТ»
- **Филимонов Андрей Вячеславович**, канд. техн. наук, главный технолог ООО «Нижегородский промышленный альянс»
- **Карпов Сергей Александрович**, аспирант кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

УДК 621.981

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ФОРМОВКИ В РОЛИКАХ ПРОФИЛЯ «СТОЙКА»

канд. техн. наук Марковцев В. А., канд. техн. наук Илюшкин М. В., Дементьев К. С.

В последние годы в обрабатывающей промышленности сохраняется устойчивая тенденция к автоматизации производственных процессов, требующей автоматизированного разветвленного складского хозяйства на основе модульных стеллажных конструкций. Основными элементами таких конструкций являются перфорированные стойки 110x77x2 мм из оцинкованной стали (рис. 1, а). Профиль стойки изготавливают по зарубежной технологии не менее чем за 22 – 24 перехода, в то время как методом интенсивного деформирования

он может быть изготовлен за менее чем 18 переходов при использовании менее энергоемкого оборудования [1].

Однако конструкция профиля (рис. 1, б, в) содержит проблемные участки для формовки (рифты – поз. 1, 2; отверстия прямоугольной формы в донной части профиля – поз. 3; отбортовки – поз. 4). Цинковое покрытие исходных заготовок также вызывает определенные сложности при изготовлении профиля. Формовка малого и большого рифтов в донной части профиля, а также отбортовки на периферии сечения профиля представляют существенные трудности в части обеспечения размерной точности элементов и отсутствия утонения. Утонение по условиям технического задания не должно превышать 0,1 мм. Столь жесткие значения связаны с эксплуатационной нагрузкой профиля в стеллажной конструкции, которая приходится на угловые зоны рифтов. Формовку элементов профиля осложняет наличие перфорации.

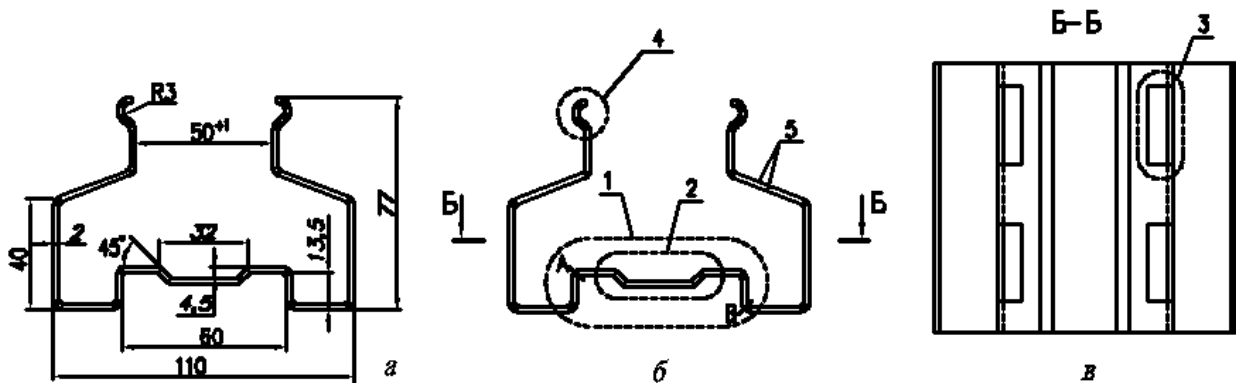


Рис. 1. Профиль стойка «110x77x2 мм»: а – чертеж сечения профиля; б, в – участки профиля, вызывающие проблемы при их формовке: 1 – прямоугольный рифт 30S-7S; 2 – трапециевидный рифт 16S-2S; 3 – перфорационные отверстия 28x9 мм с шагом 50 мм; 4 – полукруглая отбортовка R3; 5 – цинковое покрытие 1 класса по ГОСТ 14918-80

В этой связи была разработана программа экспериментальных исследований процесса формообразования упомянутого профиля, которая предусматривала изучение вопросов: 1. формовки прямоугольного рифта 30S-7S и трапециевидного рифта 16S-2S; 2. формовки полукруглой отбортовки R3; 3. влияния перфорационных отверстий на качество профиля; 4. поведения цинкового покрытия при формообразовании. Применяемое в исследованиях оборудование и приборы приведены в табл. 1.

В сечении профиля имеются три основных элемента, влияющих на процесс формообразования: **рифт 30S-7S**; **рифт 16S-2S**; **полукруглая отбортовка R3**. Формовка указанных элементов профиля может проводиться по ряду схем, дающих различные результаты. Табл. 2 дает варианты очередности формовки указанных элементов и соответствующий им номер схемы.

При одновременной формовке всех трех указанных элементов (схемы 1 и 2) было установлено, что отбортовка должна формоваться по возможности в конце процесса, поскольку при ее формовке в начале процесса увеличивается жесткость полки, что требует дополнительных сил подтяжки краевых элементов для обеспечения формовки рифта [2]. Поэтому в других схемах отбортовка формируется только в конце, после формовки остальных элементов профиля.

Применяемое оборудование и приборы

№	Оснащение, прибор	Назначение
1.	Станок ГПС–350 М8	Профилирование заготовок
	Технологическое оснащение (формующие ролики)	Формовка профиля
2.	Наборы щупов	Настройка роликов
3.	Наборы радиусометров	Замеры радиусов на заготовке и профиле
4.	Стенкомер индикаторный типа С-10А 0-10 мм, ГОСТ 11951-82	Измерение толщины металла в угловых зонах профиля
5.	Фотоаппарат Samsung digimax i5,	Фотографии и изображения образцов
6.	Сканер Mustek 12000	Сканирование шлифов, образцов

Таблица 2

Очередность формовки элементов профиля

№	Очередность формовки*			Особенности и номер схемы формообразования
	1 очередь	2 очередь	3 очередь	
1	Рифт 30S-7S- рифт 16S-2S- отбортовка	–	–	Схемы 1 и 2: одновременная формовка всех элементов
2	Рифт 30S-7S- рифт 16S-2S	Отбортовка	–	5 схема
3	Рифт 30S-7S	Рифт 16S-2S	Отбортовка	4 схема
4	Рифт 16S-2S	Рифт 30S-7S	Отбортовка	3 схема
* формовка отбортовки осуществляется в начале или в конце процесса				

В **схеме 1** за первый переход формуется рифт 16S-2S и начинается формовка рифта 30S-7S. Полная формовка рифта 30S-7S осуществляется за четыре перехода постепенной подгибкой соответствующих полок. Утонение металла в схеме 1 в зоне изгиба «А» достигает 0,5 мм.

Для предотвращения утонения в зонахгиба «А» и «В» на четвертом переходе совмещали подгибку с обжимом – **схема 2**. Осадка заготовки в последнем переходе вместо предполагаемого утолщения вызвала утонение металла. Как показали исследования, одновременный обжим и подгибка полки вызывают значительную переформовку заготовку перед площадкой осаживания, что приводит к утонению заготовки на 0,9 мм. При этом наблюдались трещины в зонегиба по толщине металла в местах перфорации. Как вариант, можно было бы разделить операции подгибки и осадки с включением еще одного перехода, однако утонение, набранное до этого перехода, не может быть компенсировано набором металла до необходимой толщины при осадке.

Третья схема (рис. 2, б) представляет собой «разгруженную» первую схему, в которой уменьшены углы подгибки в каждом из переходов, а формовка рифта 16S-2S осуществляется за первый переход с последующей формовкой рифта 30S-7S за восемь переходов постепенной подгибкой полок. Утонение в исследуемых зонах изгиба достигает 0,3 мм, что в 3 раза превышает допустимое утонение. Приобретаемое утонение по переходам в трех первых схемах представлено на рис. 3, показывающем многократное превышение допустимого утонения во всех изученных схемах.

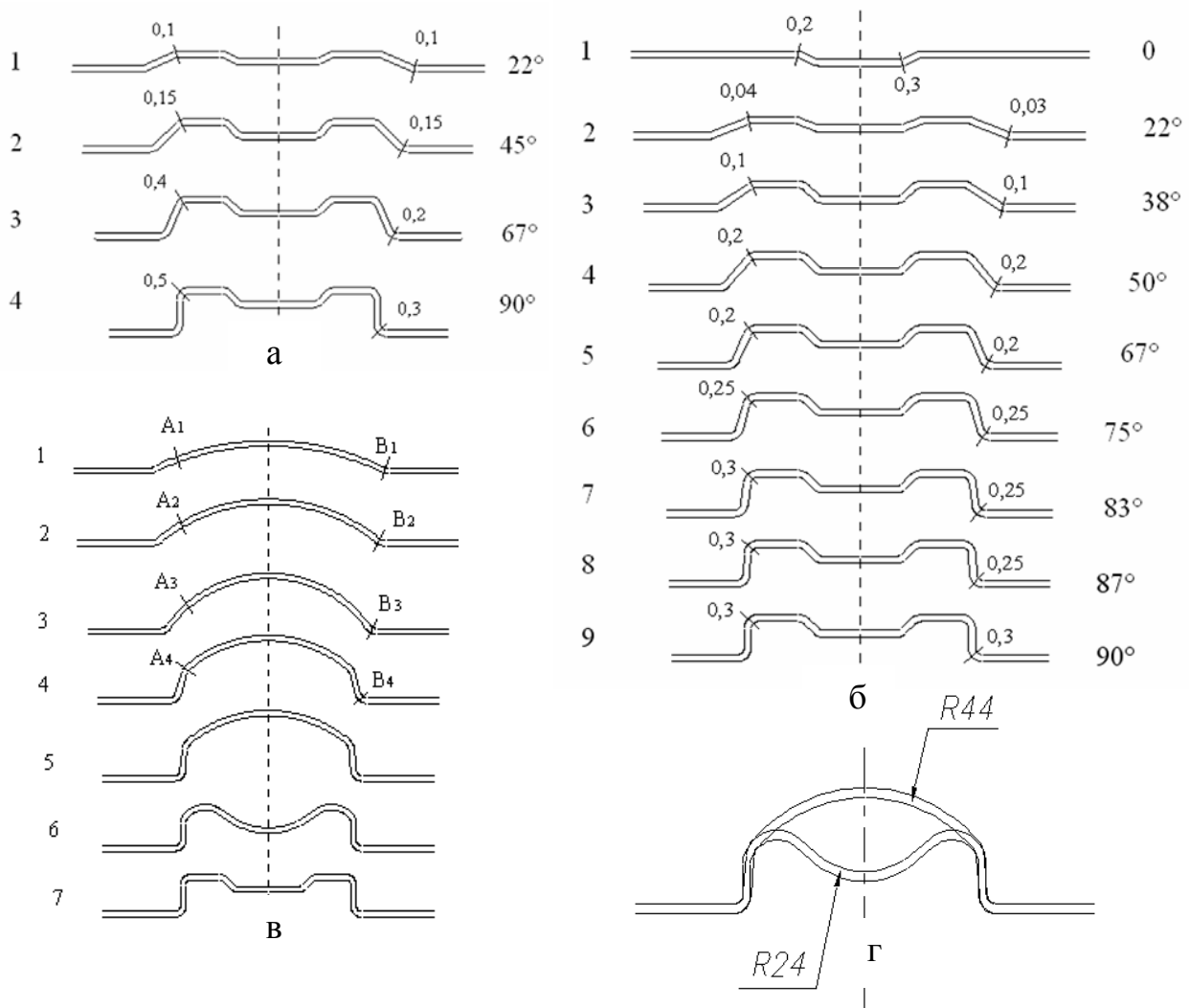


Рис. 2. Формовка рифтов донной части: а – по схемам 1, 2; б – по схеме 3; в – по схеме 4; г – параметры перехода при формовке двугорбого рифта

В **четвертой схеме** формообразования для обеспечения минимального утонения в зоне изгиба предложено выполнять формовку рифта 30S-7S из дугообразной заготовки, сформованной за первые 3 перехода. На последующих двух переходах происходит формовка заготовки с боковой утяжкой вертикальных полок, а на следующих двух переходах формируется рифт 16S-2S обжимом участка заготовки с поперечной кривизной. На рис. 2, в приведена схема формообразования донной части профиля для семи переходов, а на рис. 2, г указаны радиусы кривизны заготовки на пятом и шестом переходах. Расположение

примыкающих к рифту полок, направленных в обратную сторону от формовки рифта (рис. 4, а), обеспечивает меньшее утонение в зонах изгиба.

В рамках данной схемы предварительно изучали на первых четырех переходах формовку рифта по различным технологическим вариантам. Ниже представлены четыре технологических варианта осуществления четвертой схемы формообразования: вариант №1 – ширина заготовки 140 мм, радиус скругления инструмента на первых четырех переходах 7-5-3-2 мм соответственно; вариант №2 – аналогично варианту №1 при увеличении радиусов инструмента до 30-20-6-4 мм соответственно; вариант №3 – аналогично варианту №2 при увеличении высоты рифта на 3 мм для обеспечения набора металла и изменении радиусов скругления инструмента до 30-20-10-6 мм соответственно; вариант №4 – аналогично варианту №3 при одновременном поджатии в торцы заготовки между переходами.

Для **первого** варианта при малых радиусах скругления инструмента (7-5-3-2 мм соответственно) характерно наибольшее утонение, поскольку участки инструмента с малыми радиусами ($R_{инст}$) внедряются в заготовку и препятствуют перетеканию металла при формовке рифта. Увеличение радиусов скругления инструмента по переходам до значений 30-20-6-4 мм позволяет на 35–40% уменьшить утонение в угловых зонахгиба (**второй**

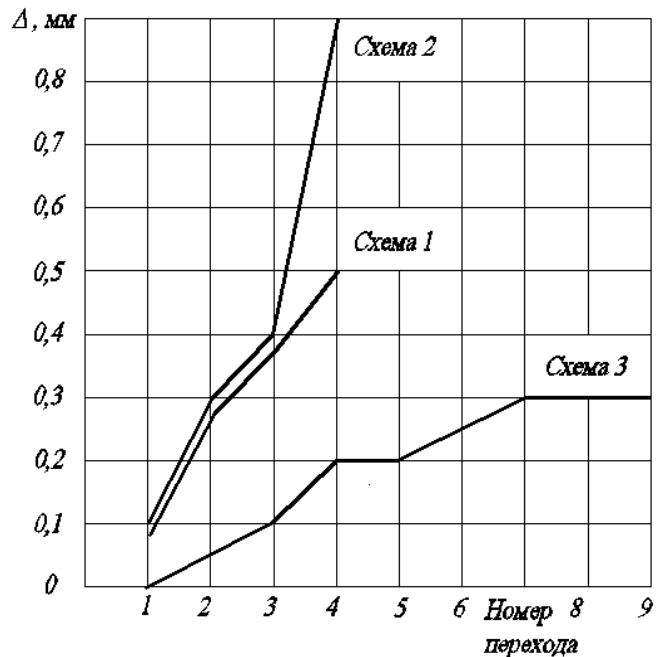


Рис. 3. Утонение металла Δ в исследуемой зоне изгиба «А» для трех схем формовки рифтов по переходам

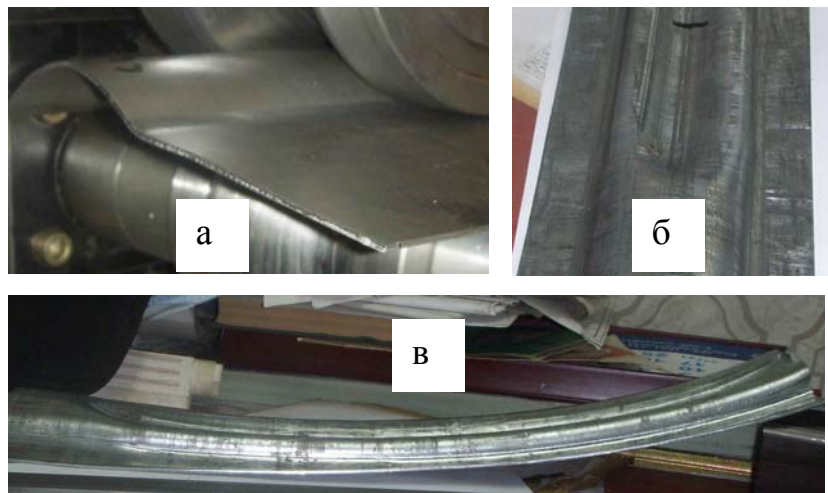


Рис. 4. Отработка технологии формовки рифтов цельной заготовки: а – снижение утонения за счет отгибки полок вниз; б – зона плавного перехода перед шестым переходом; в – появление продольной кривизны с $R=900$ мм при формовке в шестом переходе

варианте). В плоском листе и по центру рифта утонение не выявлено. В зоне «В» утонение начинается при формовке рифта. В зоне «А» наибольшее утонение имеет место в четвертом переходе, когда из дугообразной заготовки начинают

формоваться будущие вертикальные участки при контакте этой зоны с участком инструмента значительной кривизны. При формовке рифта из дугообразной заготовки между пятым и шестым переходом (рис. 4, б) возникает продольный прогиб заготовки вверх с радиусом кривизны 900 мм после шестого перехода (рис. 4, в).

В **третьем** варианте радиусы скругления увеличены до 30-20-10-6 мм, при этом величина утонения на последнем переходе уменьшилась относительно предыдущего варианта на 30%. Увеличение высоты рифта на 3 мм практически не отразилось на величине утонения.

В **четвертом** варианте введено дополнительное торцевое поджатие заготовки между переходами. Утонение уменьшилось относительно предыдущего варианта на (25-30)% и составило в зоне «А» – 0,06 мм, в зоне «В» – 0,1 мм. Однако создание торцевых давлений на плоских горизонтальных участках шириной более 40S является технически трудновыполнимой задачей, поскольку приложение давления к торцу вызывает смятие торца заготовки без дальнейшей передачи давления к срединной части заготовки. К тому же в следующих трех переходах (переходы 5 – 7) происходит утонение металла еще на 0,04-0,06 мм, так что толщина металла в угловой зоне становится больше допустимой.

Параметры инструмента и заготовки (см. рис. 1 и 2), а также утонение последней по реализации всех четырех вариантов технологии приведены в табл. 3.

Таблица 3

Утонение металла в угловых зонах рифта для четырех вариантов технологии

		Технологические параметры			Величина утонения		Технологические параметры			Величина утонения	
		Н, мм	R _{рифт} , мм	R _{инст} , мм	А, мм	В, мм	Н, мм	R _{рифт} , мм	R _{инст} , мм	А, мм	В, мм
		Вариант 1					Вариант 2				
переход	1	10	94	7	0	0,07	10	94	30	0	0,05
	2	15	61	5	0	0,11	15	61	20	0	0,06
	3	20	44	3	0	0,21	20	44	6	0,02	0,12
	4	20	-	2	0,14	0,27	20	-	4	0,09	0,19
		Вариант 3					Вариант 4				
переход	1	13	73	30	0,01	0,05	13	73	25	0,01	0,05
	2	18	54	20	0,01	0,06	18	54	20	0,01	0,05
	3	23	40	10	0,01	0,12	10	40	10	0,02	0,08
	4	23	37	6	0,11	0,13	6	37	6	0,06	0,1

Отсюда видно, что приемлемым с точки зрения утонения является только четвертый вариант технологии, на основе которого предложена новая схема формообразования профиля (**схема № 5**, см. табл. 2). В этом случае формовка «двугорбого» рифта осуществляется постепенной подтяжкой металла по большим радиусам за четыре перехода с последующим удержанием криволинейных участков той же ширины и осадкой «двугорбого» рифта [3] с постепенным уменьшением радиусов за три перехода до получения рифтов 30S-7S и 16S-2S.

Данная схема предусматривает два этапа формовки рифта (табл. 4).

Схема формовки рифтов в донной части профиля

Этап формовки	Описание процесса	Режим формовки
Формовка «двугорбого» рифта за четыре перехода	Линейное увеличение высоты «двугорбого» рифта	Высота рифта: 7-14-21-28 мм
	Переменный радиус скругления инструмента для обеспечения плавной перетяжки металла	Радиусы скругления: 80-40-20-14 мм
	Формовка участка под рифт 16S-2S за три перехода	Высота участка: 2-4-6-6 мм
	Излишек металла под формовку вертикальных стенок	Излишек металла: 3,4 мм на сторону
Формовка рифтов 30S-7S и 16S-2S за три перехода постепенной осадкой «двугорбого» рифта	Постепенное уменьшение высоты «двугорбого» рифта	Высота рифта: 22-18-13,5 мм
	Осадка с оформлением угловых зоны рифта 30S-7S	Радиус инструмента: 8-5-2 мм
	Формовка рифта 16S-2S в одном шестом переходе. Седьмой переход – калибрующий (окончательный обжим рифта 16S-2S)	Формовка в окончательный размер по чертежу
	Обжим по высоте на шестом и седьмом переходах	Величина обжима: шестой переход – 1,4 мм; седьмой переход – 2 мм

Изменение толщины заготовки по зонам:

- Зоны «А» и «В» – в первых четырех переходах при плавной перетяжке металла по большим радиусам происходит постепенное утонение металла на 0,03 и 0,04 мм соответственно. В следующих двух переходах при постепенной осадке имеет место дополнительное утонение на 0,02 мм, а в седьмом переходе при осадке участка с излишком металла происходит некоторый набор металла в угловой зоне профиля. Суммарное утонение не превышает 0,1 мм;
- Зона «D» (центр рифта) – на первых пяти переходах происходит постепенное утонение от 0,01 до 0,07 мм. Осадка в шестом и седьмом переходах не меняет величины утонения;
- Зона «С» – утонение до 0,16 мм на первых четырех переходах (обусловленное наличием дугообразной зоны в сопряжении радиусов будущих рифтов 30S-7S и 16S-2S). Осадка в следующих переходах позволяет в этой зоне незначительно набрать металл. Окончательное утонение по зоне «С» составляет 0,1 мм.

Формовка рифтов в донной части профиля по пятой схеме не испытывает влияния полукруглой отбортовки с радиусом R3, которая формируется на последующих трех переходах.

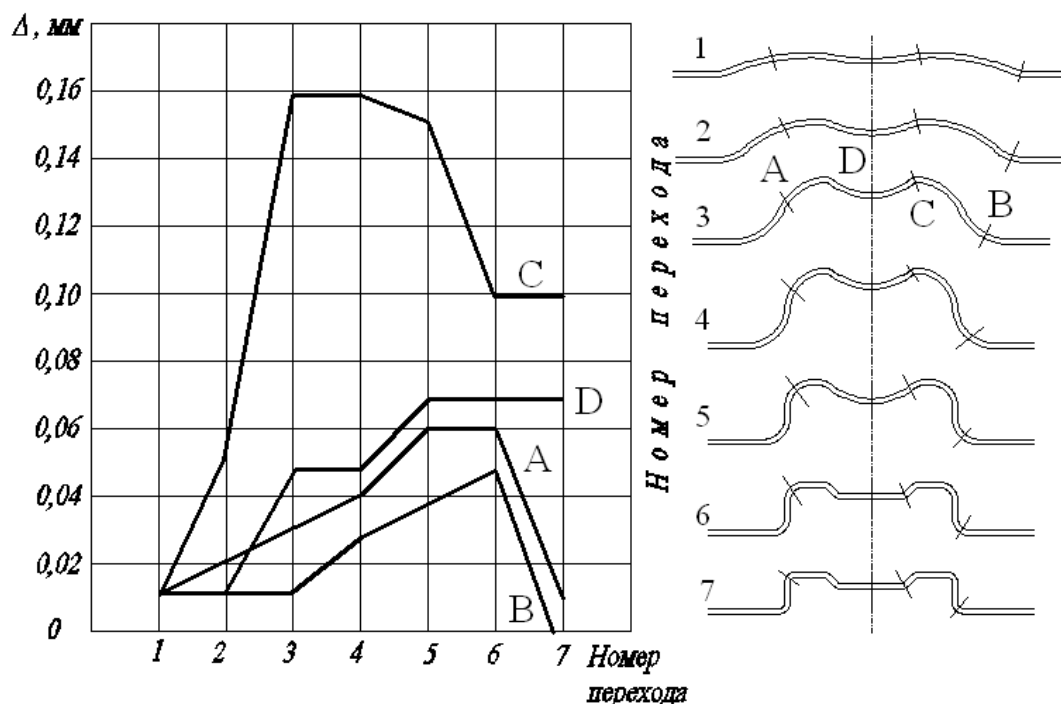


Рис. 5. Схема формообразования № 5 и утонение элементов профиля Δ по переходам

В принципе, формовка данного элемента может осуществляться и за меньшее число переходов (один-два), однако размерные параметры отбортовки существенно ухудшаются, хотя и происходит утолщение материала при наличии торцевого поджатия [3]. Однако отформованная отбортовка должна быть свободно пропущена через остальные переходы. В противном случае возможно нарушение форм и размеров данного элемента. Например, продольная осадка полки приводит к искривлению отбортовки и самой несущей полки (рис. 6, а). Наличие участков высвобождения в роликовых калибрах позволяет получить отбортовку удовлетворительного качества (рис. 6, б). Исполнение участков высвобождения следует согласовывать с надлежащим замыканием калибров (рис. 6, в).

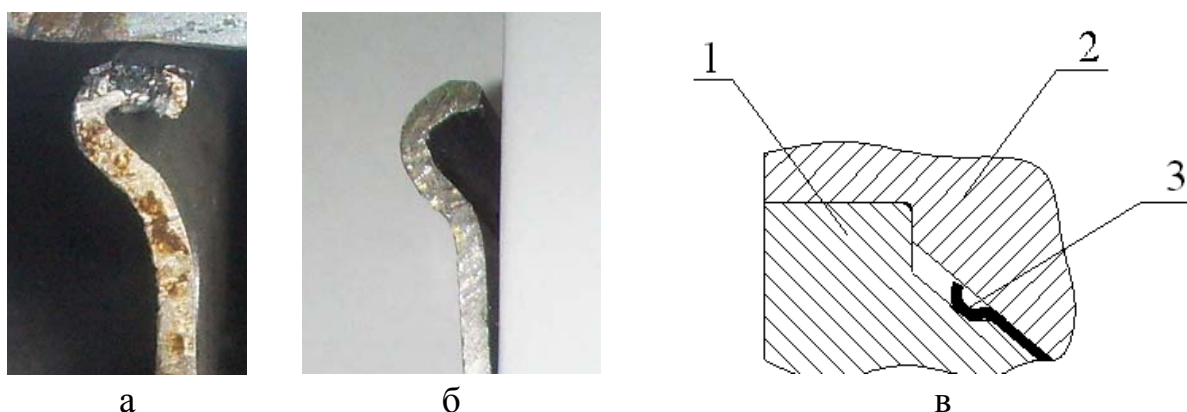


Рис. 6. Формовка отбортовки: а – потеря формы отбортовки вследствие давления со стороны верхнего ролика; б – отбортовка, полученная при высвобождении участков калибра с вертикальным замыканием роликов; в – высвобождение в калибре для предотвращения переформовки отбортовки: 1 – нижний ролик; 2 – верхний ролик; 3 – отбортовка с несущей полкой профиля

Еще одним фактором, осложняющим формообразование профиля, является наличие **перфорации** в донной части профиля. Технология предусматривает пробивку отверстий в плоской заготовке и ее последующую формовку в

роликах до окончательной конфигурации сечения. При формовке рифтов меняется топология отверстий [4], что требует корректировки шага отверстий при их пробивке. С другой стороны, во всех схемах формообразования, кроме пятой, происходит деформация самого отверстия (рис. 7, а). Выбор относительно «мягкого» режима формовки рифтов в пятой схеме позволяет получить удовлетворительное качество отверстий (рис. 7, б). Следует также отметить существенную закономерность: в зонах изгиба рифтов на уровне отверстий утонение заготовки практически отсутствует, в то время как на сплошных участках в направлении профилирования утонение заготовки может достигать уровня 40% при жестких схемах формообразования со значительной боковой утяжкой материала.

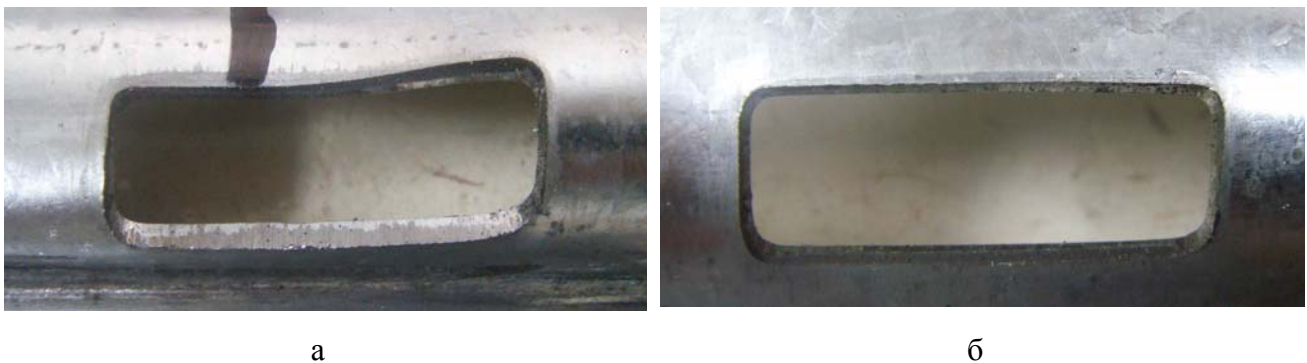


Рис. 7. Прямоугольное отверстие 28х9 мм после формовки по жесткому режиму (а) и после формовки по схеме № 5 (б)

Надлежит также отметить еще один важный фактор, влияющий на выбор схемы формообразования профиля, каковым является наличие **цинкового покрытия** исходной заготовки. По возможности следует применять достаточно «мягкие» схемы формовки, как, например, в способе изготовления профилей [5]. При жестких схемах формообразования в отсутствие смазки может происходить снятие покрытия и налипание материала на формирующие ролики (рис. 8). Это особенно характерно для зон, примыкающих к угловым зонам и расположенным у основания вертикальных полок.

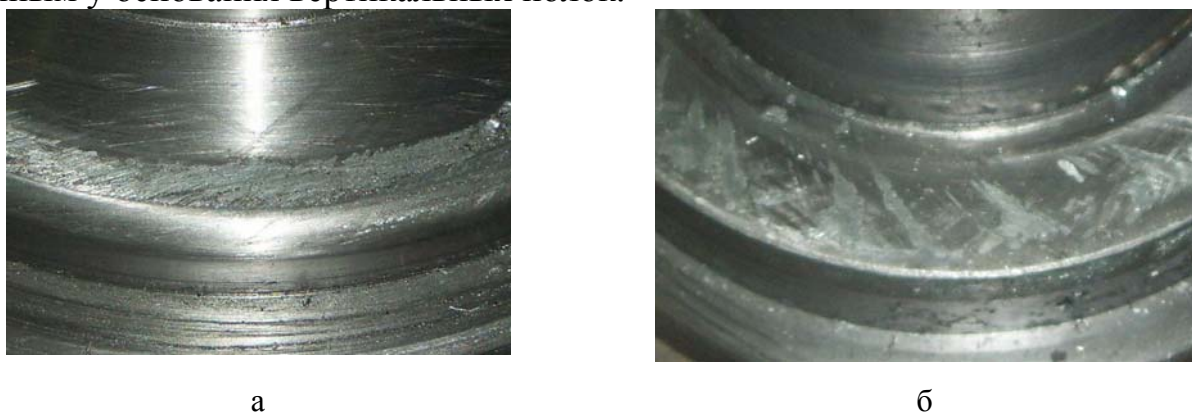


Рис. 8. Налипание цинкового покрытия на вертикальные боковые рабочие поверхности ролика в одном направлении (а) и в разных направлениях (б)

Из-за налипания материала покрытия на формирующие ролики происходит уменьшение зазора в калибре, что приводит к значительному увеличению энергетических параметров формовки, аксиальной вытяжке (раскатке) профиля или

даже перетиранию и скручиванию рабочих валов профилировочного станка.

Негативным следствием снятия покрытия заготовки (более 80%) является уменьшение коррозионной стойкости профиля [1] при эксплуатации (исследовали в естественных климатических условиях в течение 8 месяцев, в том числе 4 месяца на снегу). Коррозии подвержены и торцы профиля, но здесь появление следов коррозии обусловлено отсутствием защитного покрытия.

На рис. 9 представлен готовый профиль и сборочный узел стеллажной конструкции на основе профиля «Стойка», изготавливаемого за 16 переходов. Данный профиль может применяться не только для стеллажных конструкций, но и для возведения навесов, пристроев, укрытий, конструкций под рекламные щиты и т. п.

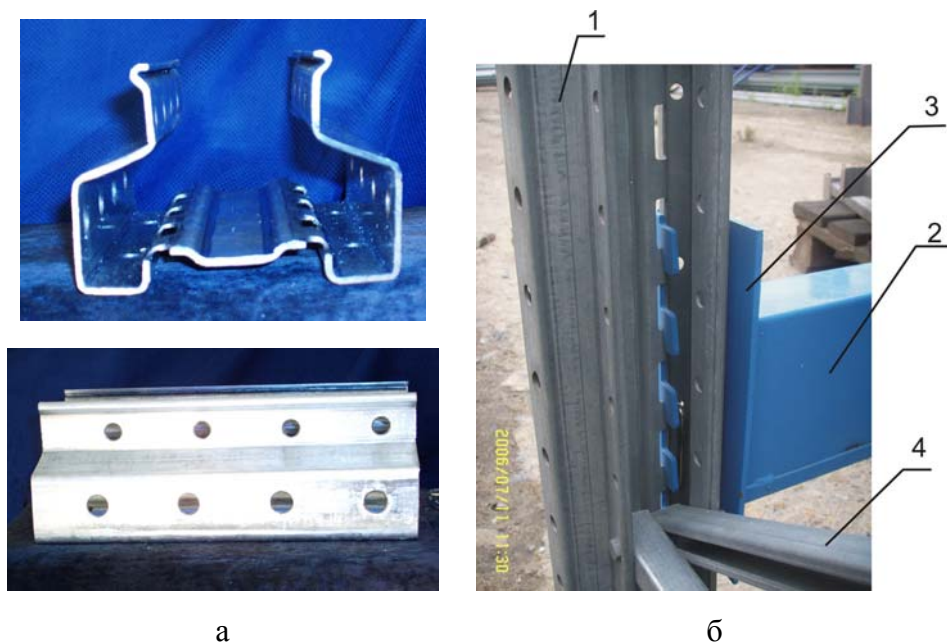


Рис. 9. Готовый профиль (вид с торца и сбоку) (а) и сборочный узел (б) на основе профиля «Стойка»: 1 – стойка 110x77x2 мм, 2 – балка, 3 – зацеп, 4 – распорка

Выводы:

1. Формообразование многоэлементных профилей с элементами жесткости должно осуществляться в следующей последовательности: формовка рифтов в донной части, формовка периферийных элементов жесткости, подгибка элементов до окончательной конфигурации.

2. С целью предотвращения утонения, деформации отверстий и нарушения покрытия следует использовать «мягкий» режим формовки:

- формовку рифтов донной части профиля следует производить по схемам, сочетающим формовку плавных форм заготовки на первых переходах с постепенной осадкой ее в последующих переходах с удержанием металла от бокового смещения при осадке;
- углы подгибки не должны превышать их допустимых значений;
- радиусы скругления инструмента в калибре не должны быть меньше 2 – 3 мм, а радиусы скругления буртов не должны быть менее 3 – 5 мм;

- отформованные в окончательный размер элементы жесткости профиля должны свободно проходить в зоны высвобождения калибров последующих переходов;
- обязательным является применение смазочной жидкости (мыльный раствор, СОЖ), а также наличие смазочных ванн под нижними роликами.

Библиографический список

1. Илюшкин, М. В. Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах / М. В. Илюшкин, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2006. – 200 с.
2. Филимонов, В. И. Особенности технологии производства в роликах полузакрытых профилей с элементами жесткости / В. И. Филимонов, М. В. Илюшкин, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2004. – №11. – С. 12-17.
3. Марковцев, В. А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2006. – 244 с.
4. Филимонов, В. И. Особенности изготовления в роликах перфорированных уголкового профиля / В. И. Филимонов, И. Н. Гудков, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Производство проката. – 2004. – №12. – С. 29-34.
5. Патент РФ № 2296025 МПК⁷ B21D5/06 Способ изготовления швеллеров, преимущественно из материалов с покрытием // Филимонов В.И., Марковцев В.А., Илюшкин М.В., Филимонов С.В. – Оpubл. 27.03.2007. Бюл. № 9.



- **Марковцев Владимир Анатольевич**, канд. техн. наук, генеральный директор ОАО «Ульяновский НИАТ»
- **Илюшкин Максим Валерьевич**, канд. техн. наук, начальник отдела ОАО «Ульяновский НИАТ»
- **Дементьев Кирилл Сергеевич**, аспирант кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

УДК 621.981

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТОНКОСТЕННОГО ПРОФИЛЯ

Баранов А. С., канд. техн. наук Илюшкин М. В., Марковцева В. В.

В современном строительстве для выполнения ограждения территорий, прилегающих к зданиям, автостоянок и других охраняемых площадей применяют полузакрытые профили из материалов с покрытием. Такие профили имеют небольшую металлоемкость, значительную долговечность, хороший внешний вид, высокую технологичность изготовления из них деталей мерных длин и сборки. Производство указанных профилей осуществляют традиционным про-

филированием за 14 – 16 переходов в крупных компаниях-производителях. При этом существуют проблемы: высокая стоимость транспортировки профилей, ограниченная гамма материалов, цветовых оттенков покрытий и размеров сечений профилей.

Данные проблемы могут быть решены путем организации производства профилей из материалов требуемого цвета в отдаленных районах с применением технологии интенсивного деформирования [1], реализация которой не требует значительных капитальных затрат. В этом случае применяют малогабаритное оборудование с уменьшением числа переходов практически в два раза. Однако снижение числа переходов требует проведения исследований, позволяющих предотвратить сопутствующее негативное явление интенсификации – кромковую волнистость, которой чаще всего подвержены профили с периферийными элементами шириной более $15S$ при толщине заготовки $S = 0,3 \dots 0,6$ мм. В рассматриваемой ниже конструкции профиля относительная ширина периферийного элемента составляет значение 42.

Рассмотрим особенности разработки технологии производства профиля $70 \times 21 \times 0,5$ мм типа «штакетник» (рис. 1, а). На рис. 1, б представлена сборная конструкция ограждения с применением указанного профиля. Исходный материал заготовки – сталь 08кп с декоративным лакокрасочным покрытием. Размеры элементов профиля: $A = 21$ мм; $B = 12$ мм; $D = 52$ мм, а элемент С имеет наклон под углом 45° по отношению к донной части профиля, имеющей три продольных рифта (см. рис. 1, а).

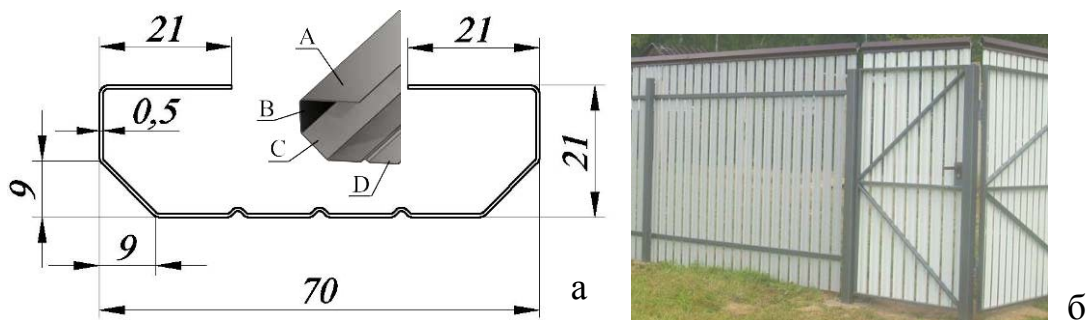


Рис. 1. Сечение профиля и обозначение его элементов (а); конструкция ограждения (б)

Анализ технологичности изготовления профиля [2] позволил выбрать в качестве основного формующего оборудования станок СПУ-500М8, имеющий характеристики, приведенные в табл. 1.

Рассматривались три варианта схем формообразования, приведенных на рис. 2. Во всех вариантах формовка рифтов в донной части профиля осуществлялась на первом переходе, где боковая утяжка несущественно влияет на деформации подгибаемых полок по двум причинам: 1) рифты имеют незначительную высоту; 2) формовка рифтов происходит в основном за счет местной вытяжки. Однако наличие рифтов делает схему подгибки полок на последующих переходах достаточно «жесткой» [3].

В первом варианте схемы формообразования (рис. 2, а) применена последовательная подгибка элементов от периферийных – к серединному, причем, подгибка каждого элемента происходит до достижения заданного угла на гото-

вом профиле. Так, на первых четырех переходах формируется полка А, а на пятом и шестом переходах – полка В, а на двух последних переходах – полка С. Эта схема обладает тем недостатком, что формовка угловой зоны между элементами С и D должна осуществляться практически по свободной схеме без доступа верхнего ролика в угловую зону, что может приводить к отклонению размеров сечения профиля от размеров, заданных по чертежу.

Таблица 1

№ п/п	Наименование параметра и его размерность	Значение параметра
1.	Число клеток, шт.	8
2.	Межклетьеовое расстояние, мм	350
3.	Межосевое расстояние, мм	120...160
4.	Диаметр рабочих валов, мм	50
5.	Базовые диаметры роликов, мм	90
6.	Скорость профилирования, м/мин	12
7.	Вспомогательные устройства, шт.:	
	– направляющее	1
	– правильное	1

При использовании схемы формообразования с параллельной подгибкой элементов (рис. 2, б) все угловые зоны формируются одновременно в каждом из первых четырех переходах с двусторонним доступом инструмента. На пятом переходе двусторонний доступ инструмента возможен только в угловых зонах между элементами В и С и между элементами С и D, а на шестом переходе двусторонний доступ инструмента имеет место только в угловой зоне между элементами С и В. Углы подгибки элементов назначены с учетом условия равномерного смещения кромок заготовки в вертикальной и горизонтальной плоскостях, что обеспечивает относительно равномерную продольную деформацию подгибаемых полок в направлении оси профилирования. Равномерная по переходам продольная деформация подгибаемых полок создает предпосылки отсутствия кромковой волнистости. Однако данная схема формообразования нуждается в некотором уточнении в связи с учетом пружинения, влияющего на распределение углов подгибки по переходам, и степени

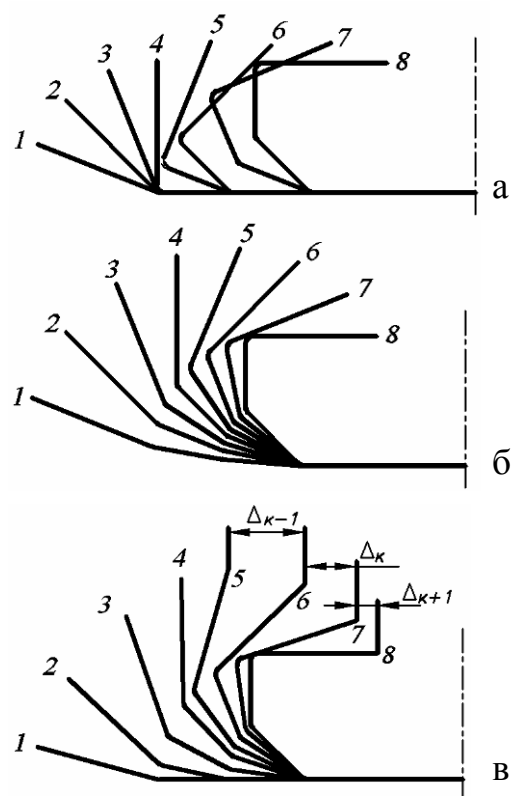


Рис. 2. Варианты технологических схем: а – схема последовательной формовки, б – схема параллельной формовки, в – схема параллельной формовки с введением технологических элементов жесткости

«стеснения» заготовки в каждом переходе, что важно для разработки технологического оснащения (формующих роликов). Величина «стеснения» заготовки определяется зависимостью [4]:

$$\Delta_k = 2 \cdot b \cdot \sin\left(\alpha_k - \frac{\Delta\alpha_k}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\Delta\alpha_k}{2}\right),$$

где k – номер текущего перехода; b – высота подгибаемой полки, α_k – суммарный угол подгибки на k -м переходе ($k = 2, 3 \dots N$), $\Delta\alpha_k$ – угол подгибки полки в k -м переходе.

Отсюда следует, что величина «стеснения» зависит не только от текущего угла подгибки (в данном переходе), но и от суммарного угла подгибки. Причем, в схеме рис. 2, в в последнем переходе достигается наименьшая величина «стеснения» заготовки (3,4 мм) по сравнению со схемами «а» и «б» (где данный параметр составляет значения 8,7 мм и 4,7 мм соответственно).

Кроме того, необходимо учитывать возможность введения технологических элементов жесткости на случай невозможности предотвращения кромковой волнистости выбором углов подгибки. После корректировки схемы формообразования с параллельной подгибкой элементов, учитывающей данные обстоятельства, суммарные углы подгибки для новой схемы (рис. 2, в) распределяются в соответствии с графиками рис. 3, откуда видно, что изменение углов подгибки имеет монотонный характер, а следовательно, проявление кромковой волнистости периферийных элементов будет сведено к минимуму.

До проектирования формующего инструмента процесс профилирования по схеме «в» был смоделирован в модуле LS-DYNA программы конечно-элементного моделирования ANSYS. Параметры моделирования следующие: тип элемента – Shell 163 с одноточечной редуцированной схемой интегрирования по плоскости с контролем Hourglass 4, модель материала: для профиля – билинейная изотропная модель (*MAT_PLASTIC_KINEMATIC), для роликов – инструментальная сталь У8.

Ролики задавались как абсолютно жесткие тела, конечно-элементная сетка задавалась только на их поверхности. Вид контакта заготовки и формующих роликов задавался в форме ASTS (Forming surface-to-surface contact), а заготовки и направляющих устройств – в форме ASTS (Automatic surface-to-surface contact).

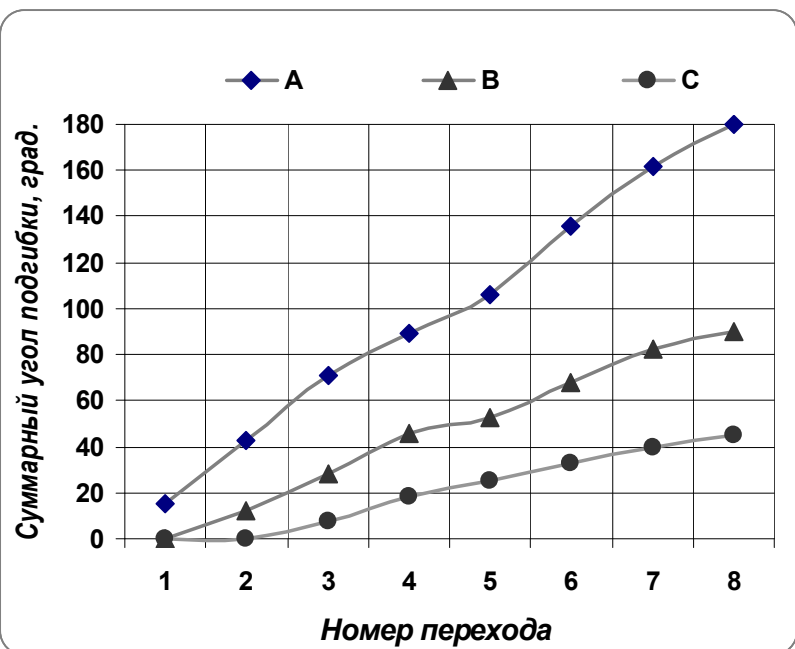


Рис. 3. Распределение по переходам суммарных углов подгибки элементов А, В и С в схеме рис. 2, в

По результатам моделирования построены сечения профиля по переходам, изображенные на рис. 4 и показывающие распределение продольных деформаций подгибаемых полок в направлении профилирования. Даже при визуальном анализе деформаций ясно, что возникновение кромковой волнистости возможно после второго, шестого, седьмого и восьмого переходов.

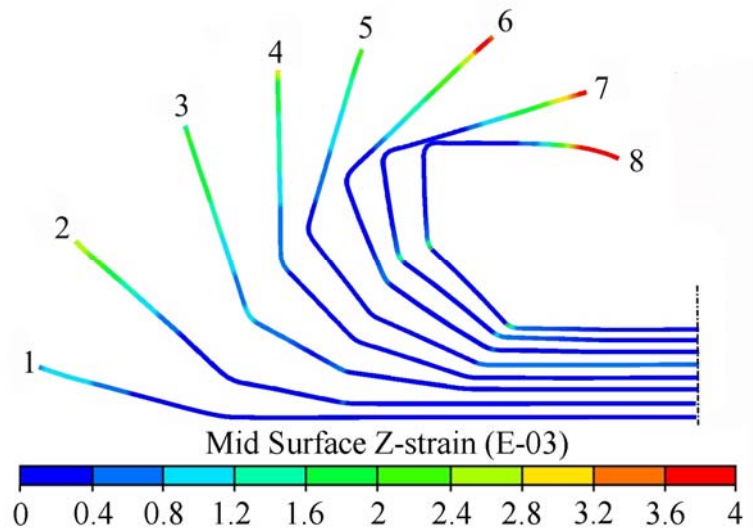


Рис. 4. Распределение продольных деформаций в сечениях профиля по переходам

Учитывая возможность применения технологических элементов жесткости и межклетьевых проводок для предотвращения кромковой волнистости в рамках схемы формообразования «в», был спроектирован и изготовлен комплект роликовой оснастки для изготовления рассматриваемого профиля. В результате пробной прокатки выяснилось, что кромковая волнистость с незначительной амплитудой возникает перед третьим переходом, а в последних трех переходах увеличивается, совпадая с тем же явлением, предсказанным в результате моделирования (ср. рис. 5, а и рис. 5, б). Моделирование процесса формообразования профиля показывает, что даже при использовании оптимальной схемы (рис. 1, в), обеспечивающей минимальную величину продольных деформаций, за восемь технологических переходов не удастся получить профиль без дефекта кромковой волнистости.

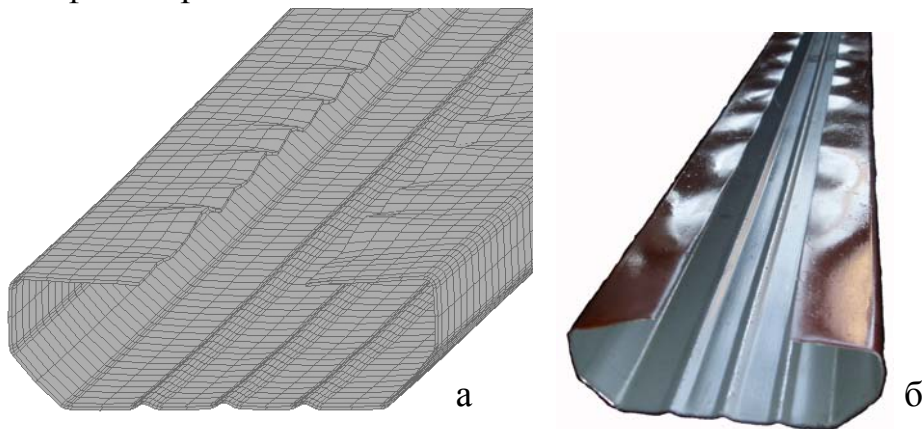


Рис. 5. Возникновение кромковой волнистости на профиле: а – модель; б – натурный образец

Одним из путей предотвращения кромкой волнистости является повышение жесткости периферийных элементов за счет введения дополнительных элементов жесткости типа пуклевок или рифтов. Эта мера позволила полностью устранить кромковую волнистость между вторым и третьим переходом, однако между седьмым и восьмым переходом происходил локальный излом периферийного элемента (рис. 6), являющийся неисправимым дефектом профиля. Кроме того, пуклевка существенно ухудшает внешний вид профиля, хотя и не

снижает его функциональных свойств. Результаты проведенных экспериментов сведены в табл. 2, где также представлены продольные деформации периферийных элементов жесткости, подсчитанные по методике работы [2].

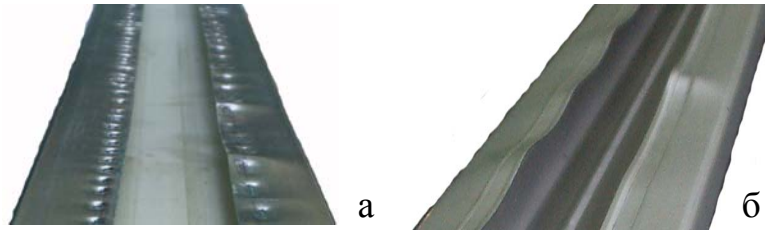


Рис. 6. Потеря устойчивости деформирования в форме излома полки: а – профиль с пуклевками; б – профиль с продольными рифтами

Таблица 2

Параметры дефектов профиля «Штакетник»

Тип ПЭ и номер образца профиля		Период, мм	Амплитуда, мм	Продольные деформации, %	Вид потери устойчивости
Гладкий	1	55	2,5	0,51	КВ
	2	52	2,3	0,48	КВ
	3	56	2,6	0,53	КВ
С рифтами	4	99,5	4	0,36	ЛИ
	5	85	3	0,31	ЛИ
	6	81,5	3,5	0,46	ЛИ
С насечками (пуклевкой)	7	56	2	0,31	ЛИ
	8	52	1,5	0,21	ЛИ
	9	54	1,5	0,19	ЛИ
ПЭ – периферийный элемент; КВ – кромковая волнистость; ЛИ – локальный излом					

Дальнейшие поиски приемлемых путей решения данной технологической проблемы были связаны с устранением приобретенной на предварительных переходах кромковой волнистости путем введения продольного рифта между седьмым и восьмым переходом и отбортовки под углом 45° в восьмом переходе. С этой целью выполнено моделирование (модуль LS-Dyna) процесса формообразования с использованием виртуальной межклетьевой проводки. Результаты моделирования представлены на рис. 7, показывающем, что на предварительных переходах наличие межклетьевой проводки не влияет на распределение продольных деформаций подгибаемых полок, а после седьмого перехода ситуация резко изменяется. Происходит продольная осадка поперечных волн кромковой волнистости, продольные деформации становятся сжимающими, а на уровне восьмого перехода продольная деформация периферийного участка заготовки близка к нулю. Такой режим формовки должен приводить к получению бездефектного профиля.

С целью реализации выработанного режима формообразования профиля выполнено проектирование и изготовление межклетьевой проводки (рис. 7, а)

для формовки рифтов на горизонтальных полках профиля. Данное устройство позволяет выполнять рифты без нарушения покрытия за счет местной боковой вытяжки заготовки, что исключает изменение ширины развертки заготовки, являющейся важным технологическим фактором. Область применения устройства – производство гнутых профилей с толщиной стенок от 0,45 до 1,5 мм.

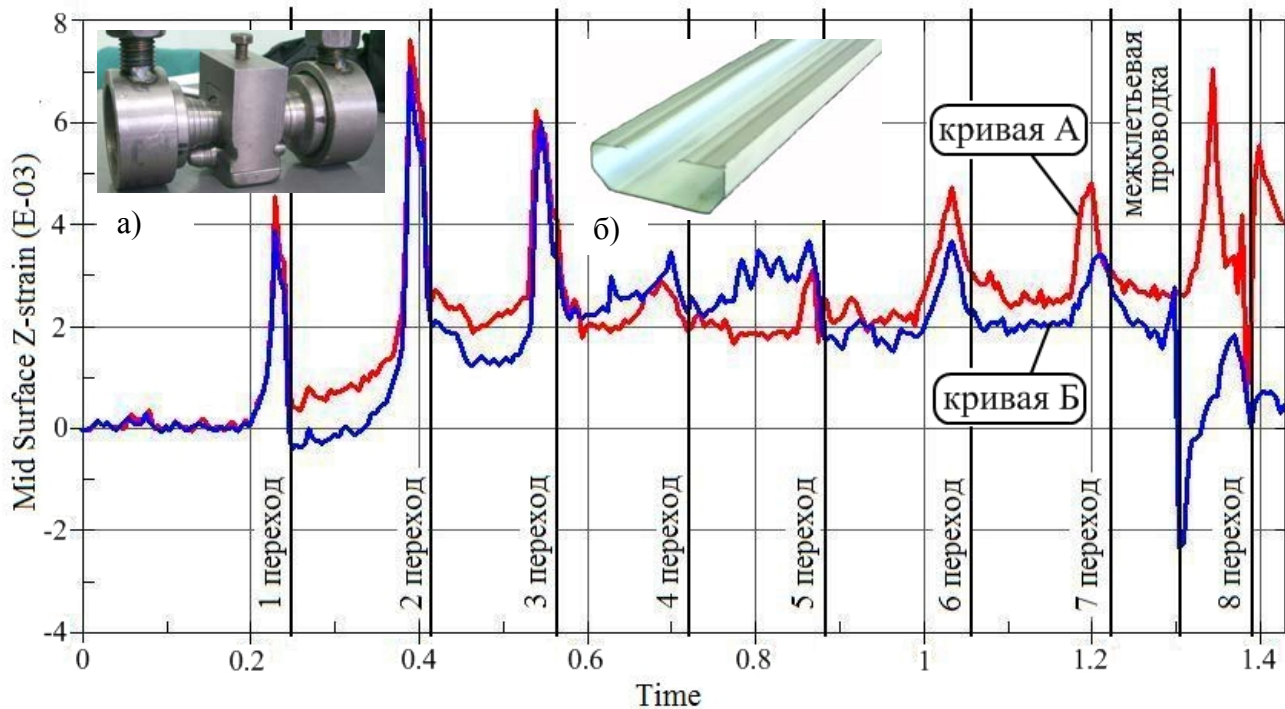


Рис. 7. График распределения продольных деформаций кромки заготовки по переходам при формообразовании без применения межклетевой проводки (кривая А) и с применением межклетевой проводки (кривая Б): а – межклетевая проводка; б – полученный кондиционный профиль

Принцип работы данной межклетевой проводки заключается в следующем. Заготовка, выходящая из роликового калибра седьмого перехода, попадает в калибр межклетевой проводки, причем ее нижний ролик располагается внутри профиля, а верхний ролик – снаружи. Боковые поверхности верхнего ролика производят предварительную подгибку полок на угол 10° для обеспечения лучшего попадания заготовки в калибр восьмого перехода, а в калибре, образованном нижним и верхним роликом проводки, происходит формовка продольных рифтов.

Выполненные технологические мероприятия позволили получить кондиционный профиль (рис. 7, б), удовлетворяющий эксплуатационным требованиям. Использование моделирования при разработке схем формообразования и оценке эффективности применения межклетевой проводки позволило в среднем сократить на 14 – 17% затраты на освоение технологии.

Технология и оборудование сданы «под ключ» заказчику и успешно эксплуатируются. В результате реализации проекта инвестиционные вложения заказчика были уменьшены на 63% по сравнению с первоначальным проектом, ориентированным на применение технологии традиционного профилирования,

а транспортные издержки по доставке профилей конечным пользователям сократились на 12%.

Выводы

1. При разработке схем формообразования режимы подгибки элементов должны минимизировать приобретаемые продольные деформации периферийных элементов во избежание кромковой волнистости.
2. Формовку технологических элементов жесткости целесообразно осуществлять на последних переходах во избежание изломов полок вследствие повышения жесткости подгибаемых элементов.
3. Применение конечноэлементного моделирования позволяет на 14 – 17% сократить затраты на освоение технологии.
4. Применение метода интенсивного деформирования в роликах вместо традиционного профилирования позволяет сократить примерно в два раза число технологических переходов и на более чем 60% инвестиционные вложения при реализации проектов, связанных с производством гнутых профилей.

Библиографический список

1. Филимонов, С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2008. – 444 с.
2. Илюшкин, М. В. Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах профилировании / М. В. Илюшкин, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – 200 с.
3. Филимонов, А. В. Совершенствование технологии производства полузакрытых профилей в роликах методом интенсивного деформирования: Дис. канд. техн. наук: 05.03.05. – Нижний Новгород : НГТУ, 2009. – 206 с.
4. Патент РФ на полезную модель № 81109, МПК⁷ В 21 D 5/06. Роликовая пара для изготовления профилей из листовых заготовок с покрытием / А. С. Баранов, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов, О. В. Мищенко. – Опубл. 10.03.2009. – Бюл. № 7.



- **Баранов Александр Сергеевич**, начальник сектора ОАО «Ульяновский НИАТ», аспирант УлГТУ
- **Илюшкин Максим Валерьевич**, канд. техн. наук, начальник отдела ОАО «Ульяновский НИАТ»
- **Марковцева Валерия Владимировна**, студентка пятого курса, специализирующаяся по кафедре «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

УДК 621.981

ИЗМЕНЕНИЕ РАДИУСОВ ФОРМОВКИ НА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПЕРЕХОДАХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОФИЛЯ

канд. техн. наук Марковцев В. А., Волков А. А.

В производстве летательных аппаратов находят сравнительно широкое применение гнутые профили корытного типа. Указанные профили применяются преимущественно в качестве стоек пола и реже, преимущественно в конструкциях самолетов компании Boeing, в качестве элементов стрингерного набора [1]. Ввиду высокой концентрации фюзеляжного конденсата в нижней части планера обычно используют алюминиевые сплавы с плакированным покрытием. Авиационные профили с толщиной стенки до 1,5 мм и небольших габаритных размеров изготавливают обычно стесненным изгибом (СИ) [1]. Однако производство профилей с толщиной стенок более 2 мм вызывает нарушение плакирующего слоя из-за больших контактных давлений при осадке заготовки, что характерно для стесненного изгиба. При данных обстоятельствах целесообразным является применение метода интенсивного деформирования (МИД) [2], в котором формообразование профиля осуществляется с постоянными радиусами изгиба на всех технологических переходах. Схема формообразования профиля при использовании МИД является также достаточно «жесткой» из-за больших углов подгибки на первых переходах и также приводит к утонению заготовки и значительным контактным напряжениям. Гипотетически, уменьшение углов подгибки в первых клетях станка и переход к плавно изменяющемуся радиусу изгиба угловых зон при формообразовании могли бы уменьшить уровень контактных напряжений и деформационных характеристик заготовки. Вместе с тем, для условий эксплуатации весьма важными являются две характеристики авиационных профилей: минимальное утонение угловых зон профиля для обеспечения проектной несущей способности и коррозионные характеристики, связанные с утонением плакирующего слоя из-за значительных контактных давлений при формообразовании.

Цель работы: изучение возможностей уменьшения указанных негативных факторов формообразования, влияющих на служебные свойства гнутых профилей корытного типа, с использованием теоретического и конечноэлементного анализа, а также экспериментального метода исследования.

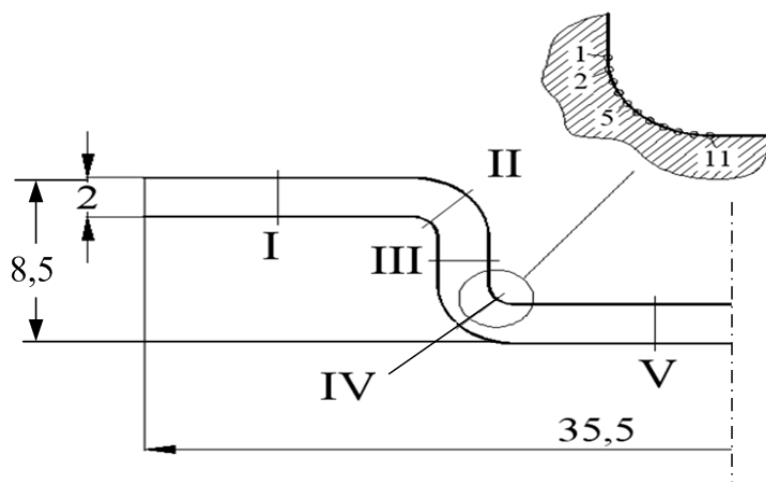


Рис. 1. Чертеж симметричного профиля корытного типа 35,5х8,5х2 мм: I – горизонтальная полка, II, IV – угловые зоны, III – вертикальная полка, V – дно профиля

Рассмотрим формовку профиля корытного типа 30,5x8,5x2 мм (рис. 1), реализуемую согласно техническому решению по полезной модели [3], где углы подгибки по переходам определяются формулой:

$$\alpha_k = \arcsin \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[\sin \left(\frac{k \cdot \alpha}{N} \right) + \frac{k}{N} \cdot \sin \alpha \right] \right\},$$

где k – номер текущего перехода; α – суммарный угол подгибки (угол на готовом профиле); N – число переходов, а высота вертикального бурта замкнутого калибра составляет величину $3S$, причем скругление бурта задается формулой:

$$\Delta_k = 2 \cdot b \cdot \sin \left(\alpha_k - \frac{\Delta \alpha_k}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\Delta \alpha_k}{2} \right),$$

где b – высота подгибаемой полки; α_k – суммарный угол подгибки на k -м переходе ($k = 2, 3 \dots N$); $\Delta \alpha_k$ – угол подгибки полки в k -м переходе.

Указанное техническое решение определяет схему формообразования, оптимизирующую число переходов и исключаящую продольный прогиб профиля. В данной схеме формообразования формовка угловых зон на первых переходах соответствует изгибу с растяжением (рис. 2), в то время как на последнем переходе, при необходимости, может осуществляться подсадка заготовки. В первом случае заготовка, как правило, получает утонение, а во втором – утолщение.

Теоретический анализ. Допущения, используемые при разработке модели: 1) материал заготовки – жестко-пластичный, изотропный, несжимаемый; 2) ввиду низкого уровня деформаций пренебрегаем упрочнением; 3) нейтральный слой напряжений совпадает с нейтральным слоем деформаций; 4) нагрузка при посадке внутреннего контура криволинейного участка заготовки на инструмент распределяется равномерно; 5) имеют место изменения внутреннего и наружного радиусов зоны изгиба даже в условиях посадки контуров зоны сгиба на инструмент; 6) в пределах криволинейного участка заготовки утонение или утолщение распределяется равномерно.

Пусть на скругленном участке верхнего ролика нагрузка от действия растягивающих сил распределена равномерно с интенсивностью p . Величину интенсивности нагрузки (давление на инструмент) можно связать с действующей растягивающей погонной силой N . Действительно, в проекции на биссектрису угла действие растягивающих сил составляет величину $2N \cos [(\pi - \alpha)/2]$, а проекция распределенной нагрузки определяется интегралом:

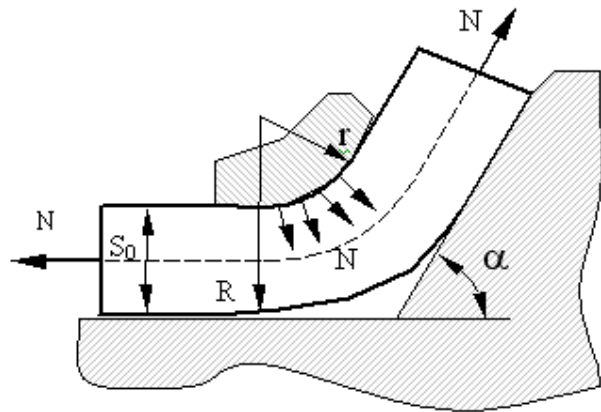


Рис. 2. Схема приложения сил на предварительных переходах при высвобождении наружного контура зоны изгиба за счет конструкции роликового калибра

$$\int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} pr \cos \theta \cdot d\theta,$$

где α – уголгиба; θ – угол между вектором распределенной погонной силы и биссектрисой угла; r – радиус кривизны внутреннего контура зоны сгиба.

Приравнивая эти силы, получим:

$$-2N \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}\right) = \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} p \cdot r \cdot \cos \theta d\theta. \quad (1)$$

Проводя преобразования обеих частей уравнения (1), получим:

$$N = -p \cdot r. \quad (2)$$

Для вычисления смещения нейтрального слоя и последующего определения изменения толщины заготовки в угловой зоне следует рассмотреть ее напряженно-деформированное состояние. Применим инженерный метод [4] для определения напряжений и положения нейтрального слоя по напряжениям. Уравнение равновесия угловой зоны имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0, \quad (3)$$

где $\sigma_\rho, \sigma_\theta$ – радиальное и окружное напряжение соответственно; ρ – текущее значение радиуса.

Упрощенное условие пластичности можно записать в виде:

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_T^* \text{ (зона сжатия)}, \quad (4)$$

$$\sigma_\rho - \sigma_\theta = -\sigma_T^* \text{ (зона растяжения)}, \quad (5)$$

где σ_T^* – модифицированный предел текучести материала заготовки.

Граничные условия имеют вид:

$$\sigma_\rho(\rho = r) = -p \text{ (зона сжатия)}, \quad (6)$$

$$\sigma_\rho(\rho = R) = 0 \text{ (зона растяжения)}, \quad (7)$$

где R – радиус кривизны наружного контура зоны изгиба.

Используя соотношения (3), (4) и (6), получим распределение радиальных напряжений в сжатой зоне:

$$\sigma_\rho^{pc} = \sigma_T^* \cdot \ln \frac{r}{\rho} - p. \quad (8)$$

Интегрируя уравнение (3) с использованием условий (5) и (7), получим решение для зоны растяжения:

$$\sigma_\rho^{pp} = \sigma_T^* \cdot \ln \frac{\rho}{R}. \quad (9)$$

«Сшивая» решения (8) и (9), получим значение радиуса кривизны нейтрального слоя:

$$\rho_n = \sqrt{rR} \cdot \exp\left(-\frac{p}{2\sigma_T^*}\right). \quad (10)$$

Приближенное значение давления p можно получить из условий перетяжки материала через участок верхнего ролика. Погонная сила $|N|$, возникающая в зоне перетяжки, определяется соотношением:

$$|N| = \frac{\sigma_t^* \cdot s_0^2}{2(r_c + s_0/2)}, \quad (11)$$

где r_c – радиус скругления ролика в зоне изгиба, примыкающей к полке.

Из соотношений (2) и (11) получим приближенно:

$$p = \frac{\sigma_t^* \cdot s_0^2}{2r(r_c + s_0/2)}. \quad (12)$$

Из формулы (10) с учетом зависимости (12) получим значение радиуса кривизны нейтрального слоя:

$$\rho_n^p = \sqrt{rR} \cdot \exp\left(-\frac{s_0^2}{4r(r_c + s_0/2)}\right). \quad (13)$$

Положение нейтрального слоя определяется исключительно геометрическими характеристиками заготовки и не зависит от ее механических свойств. Следует иметь в виду, что входящие в формулу (13) радиусы r и r_c определяются выбранной схемой формообразования.

Для определения изменения толщины зоны сгиба необходимо обратиться к скоростям и деформациям, сопровождающим процесс формообразования заготовки. В работе [5] показано, что при условии плоской деформации для несжимаемого материала скорости перемещения материала в радиальном направлении могут быть представлены зависимостью:

$$\dot{\varepsilon}_\rho = -\frac{1}{2\alpha} \left(1 - \frac{\rho_n^2}{\rho^2}\right). \quad (14)$$

Радиальные скорости представляют собой приращения радиуса ρ за единицу времени, однако в случае деформирования заготовки в роликах целесообразнее взять в качестве параметра нагружения приращение угла подгибки $\Delta\alpha$. Поэтому приращение произвольного радиуса на основании (14) можно представить в виде:

$$\Delta\rho = -\frac{1}{2\alpha} \left(\rho + \frac{\rho_n^2}{\rho}\right) \cdot \Delta\alpha. \quad (15)$$

Взяв разность приращений наружного и внутреннего радиусов, отнеся ее к толщине заготовки, на основании зависимости (15) получим [5]:

$$\frac{\Delta s}{s_0} = -\frac{\Delta\alpha}{2\alpha} \left(1 - \exp\left(-\frac{s_0^2}{4r(r_c + s_0/2)}\right)\right), \quad (16)$$

Для расчета утонения, например, для k -го перехода, согласно формуле (16), надлежит вводить обозначения:

$$\alpha = \alpha_k, \quad \Delta\alpha = \alpha_k - \alpha_{k-1},$$

где α_{k-1} , α_k – углы подгибки на предшествующем и текущем переходах.

В работе [6] приведена аналогичная процедура расчета утолщения в угловой зоне при торцевом поджатии. Так что для комбинированных схем формооб-

разования, сочетающих боковую утяжку заготовки и подсадку полок в закрытом калибре, пригодна зависимость расчета относительного приращения ширины заготовки:

$$\Delta B = - \left[\sum_{k=1}^m \Delta s_k^p + \sum_{k=m+1}^n \Delta s_k^c \right] \frac{N(r + s_0 / 2)}{s_0}, \quad (17)$$

где m – число переходов, в которых происходит растяжение угловых зон; n – общее число переходов; N – число угловых зон профиля.

На рис. 3 представлена построенная на основе формулы (16) зависимость утонения от угла подгибки и радиуса изгиба, откуда видно, что радиус изгиба является весьма существенным фактором, влияющим на утонение заготовки в угловых зонах. Следовательно, переход от фиксированных конечных радиусов изгиба на всех технологических переходах к более мягкому режиму с плавно изменяющимися по переходам радиусами могло бы уменьшить утонение заготовки и снизить уровень контактных напряжений, влияющих на параметры плакирующего покрытия.

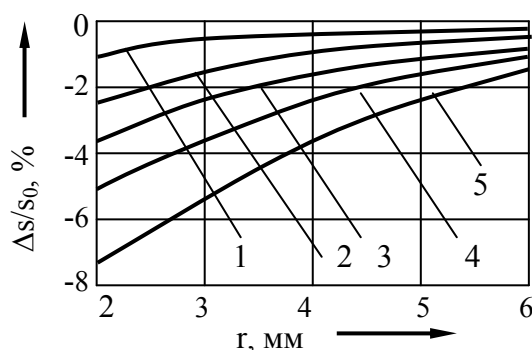


Рис. 3. Зависимость утонения от внутреннего радиуса и угла подгибки: 1, 2, 3, 4, 5 – $\Delta\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ соответственно

Экспериментальные исследования. Для сопоставления аналитической модели с результатами экспериментальных работ, проведено проектирование технологического оснащения и отработка технологии производства корытного профиля 30,5x8,5x2 мм (рис. 4). Изучали влияние на утонение профиля по зонам изгиба схемы формообразования, типичной для МИДа (схема № 1), и более мягкой схемы (схема №2). Характеристики этих схем формообразования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры схем формообразования для исследования

Параметр и его размерность	Изменение радиусов изгиба и углов подгибки по переходам						Примечание
	1	2	3	4	5	6	
R_i , мм	1	1	1	1	1	1	Схема №1 ($r = \text{const}$)
α_i , град.	15	30	45	60	75	90	
R_i , мм	7,1	3	1,8	1,3	1	1	Схема №2 ($r = \text{var}$)
α_i , град.	22	45	65	80	90	90*	

Результаты экспериментального исследования утонений в угловых зонах приведены на рис. 5, где представлены величины утонений для схемы №1 с постоянными радиусами ($r = \text{const}$) и для схемы №2 с переменными радиусами ($r = \text{var}$). Обозначения угловых зон соответствуют рис. 1. В зоне II схема формовки с постоянными радиусами на третьем и четвертом переходах дает утоне-

ние на 37% больше, чем схема формовки с переменными радиусами. На пятом и шестом переходах значения утонения сближаются вследствие использования торцевого поджатия на двух последних переходах за счет конструкции калибров. В зоне IV на переходах 4 – 6 отличие утонения для схем №1 и №2 достигает 50%.

Применение торцевого поджатия на параметры этой угловой зоны практически не оказывает никакого влияния. Такое поведение металла в рассматриваемых угловых зонах обусловлено особенностью роликовых калибров для создания поджатия в торец горизонтальных полок. Фактически, в этом случае имеет место «стеснение» профиля при выдерживании постоянной ширины донной части профиля. Для уменьшения утонения в угловой зоне IV следовало бы осуществлять осадку заготовки в вертикальной плоскости, однако для этого нужно увеличить высоту калибра, предшествующего переходу, с которого начинается осадка, на 0,7...1,2 мм.

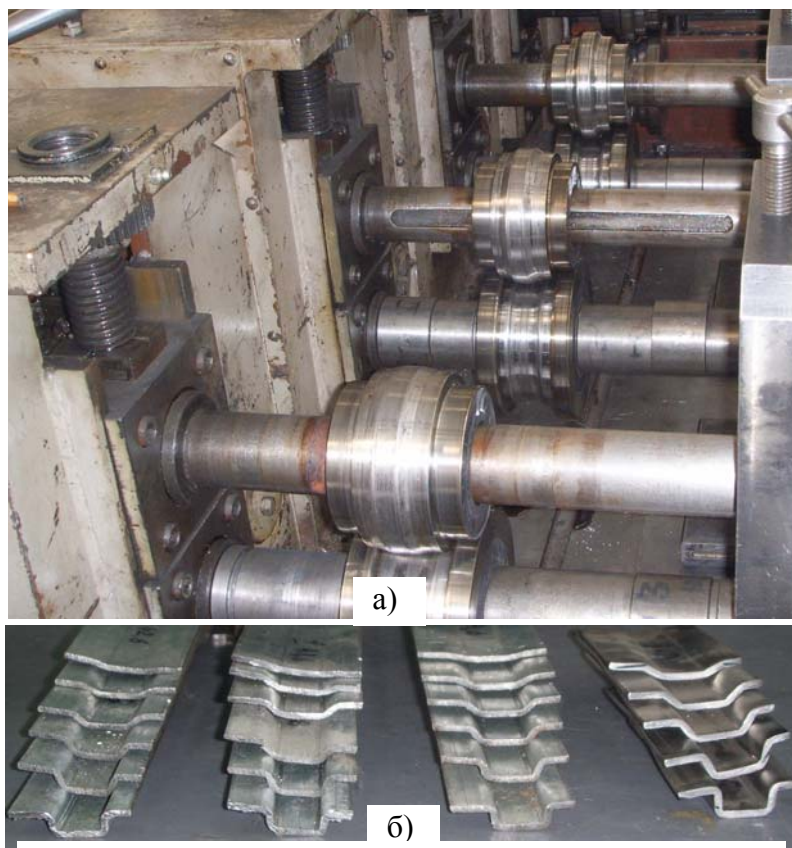


Рис. 4. Технологическое оснащение для изготовления профиля 30,5x12,8x2 мм, смонтированное на профилировочном станке ГПС-350 М6 (а) и образцы профилей после каждого технологического перехода (б): первые три комплекта (слева направо) выполнены по схеме № 1 ($r = \text{const}$) с избытком заготовки $\Delta B = 0$; 1,2; 2,1 мм соответственно; последний комплект выполнен по схеме №2 ($r = \text{var}$)

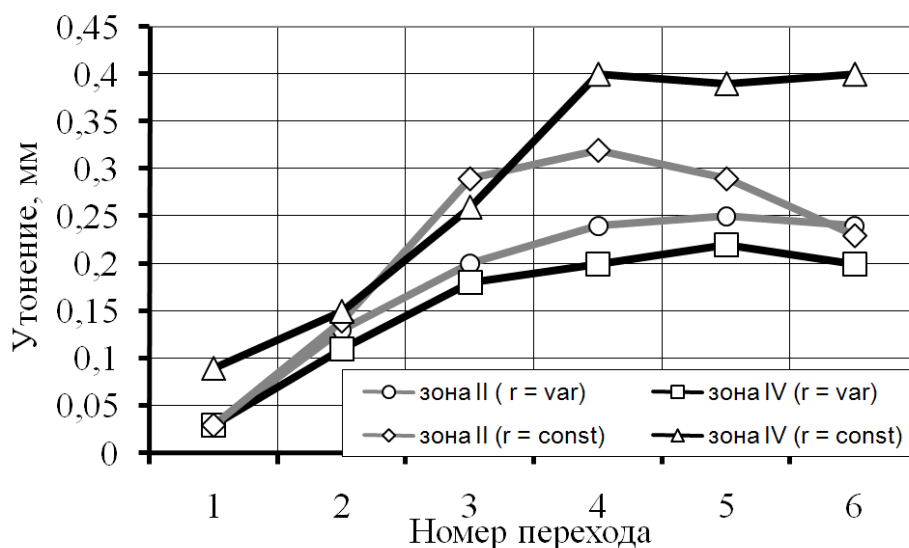


Рис. 5. Зависимость утонения в угловых зонах профиля (согласно рис. 1) от перехода по результатам эксперимента

Однако для широких профилей осадка в вертикальной плоскости приводит к поперечному изгибу (пластическому выпучиванию) донной части профиля, а потому является малоэффективным инструментом снижения утонения заготовки.

Конечно-элементное моделирование. Для конечно-элементного моделирования использовали модуль LS-DYNA интегрированного пакета ANSYS, с помощью которого моделировали обе схемы формообразования для выявления утонения в зонах изгиба профиля и величин контактных напряжений. Результаты моделирования, отражающие утонение заготовки в угловых зонах и представленные на рис. 6, показывают, что отличие утонений профилей, выполненных по схемам №1 (рис. 6, а) и №2 (рис. 6, б), в зоне II составляет около 20%, в то время как в зоне IV такое отличие лежит в пределах 35%. Отметим, что в конечно-элементных моделях не предусматривалось торцевое поджатие (ширина развертки заготовки не отличалась от ширины развертки калибра).

С использованием конечно-элементного моделирования исследовали также распределение контактных напряжений по внутреннему контуру угловой зоны IV (см. рис. 1 – маркировка точек 1...11), наименее подверженной действию торцевого поджатия. Дело в том, что при высвобождении угловой зоны со стороны наружного контура заготовки действие торцевого поджатия может приводить к «посадке» заготовки по наружному контуру на инструмент, а контактные напряжения на внутреннем контуре зоны изгиба становятся нулевыми.

На рис. 7, а представлено распределение контактных давлений (напряжений) по маркированным точкам внутреннего контура зоны изгиба и технологическим переходам, показывающее, что наибольшие давления имеют место на предпоследних переходах. Вероятнее всего, это обусловлено защемлением и натягом заготовки как в текущих (рассматриваемых) переходах, так и между переходами из-за скоростного режима профилирования и различия условий контактного взаимодействия инструмента и заготовки на локальных участках.

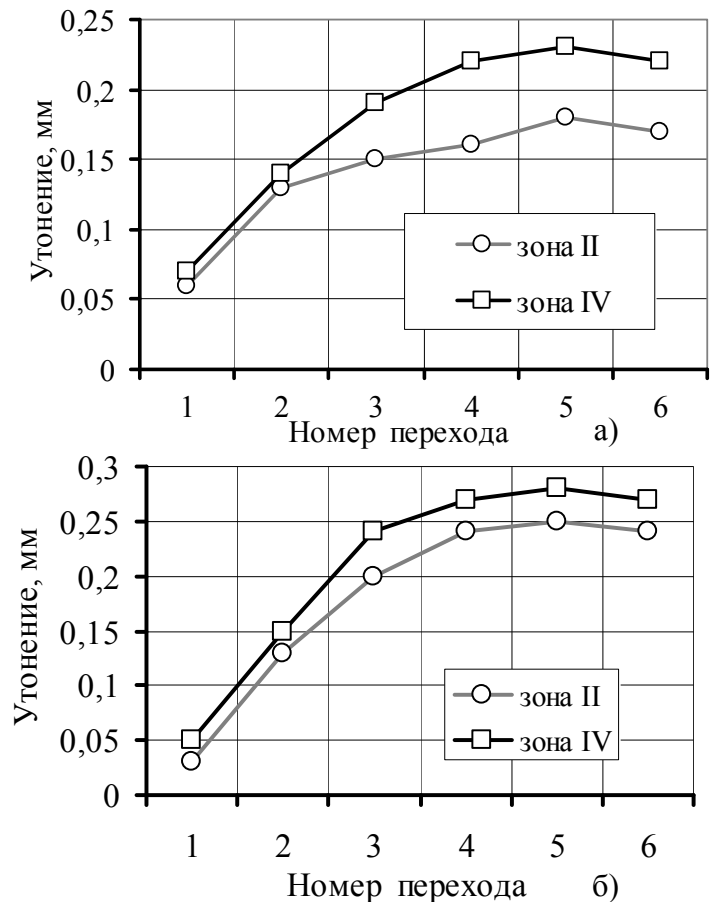


Рис. 6. Величина утонения в угловых зонах профиля (по результатам конечно-элементного моделирования) на различных технологических переходах: а – схема с переменными радиусами; б – схема с постоянными радиусами

Сравнение графиков распределения пиковых давлений на внутреннем контуре угловой зоны профиля по переходам для схем с переменными и постоянными радиусами показывает, что для схемы с постоянными радиусами характерно пиковое распределение контактных давлений, достигающих до 1500 МПа, а для схем с переменными радиусами характерно куполообразное распределение давлений со значениями до 800 МПа (рис. 7, б).

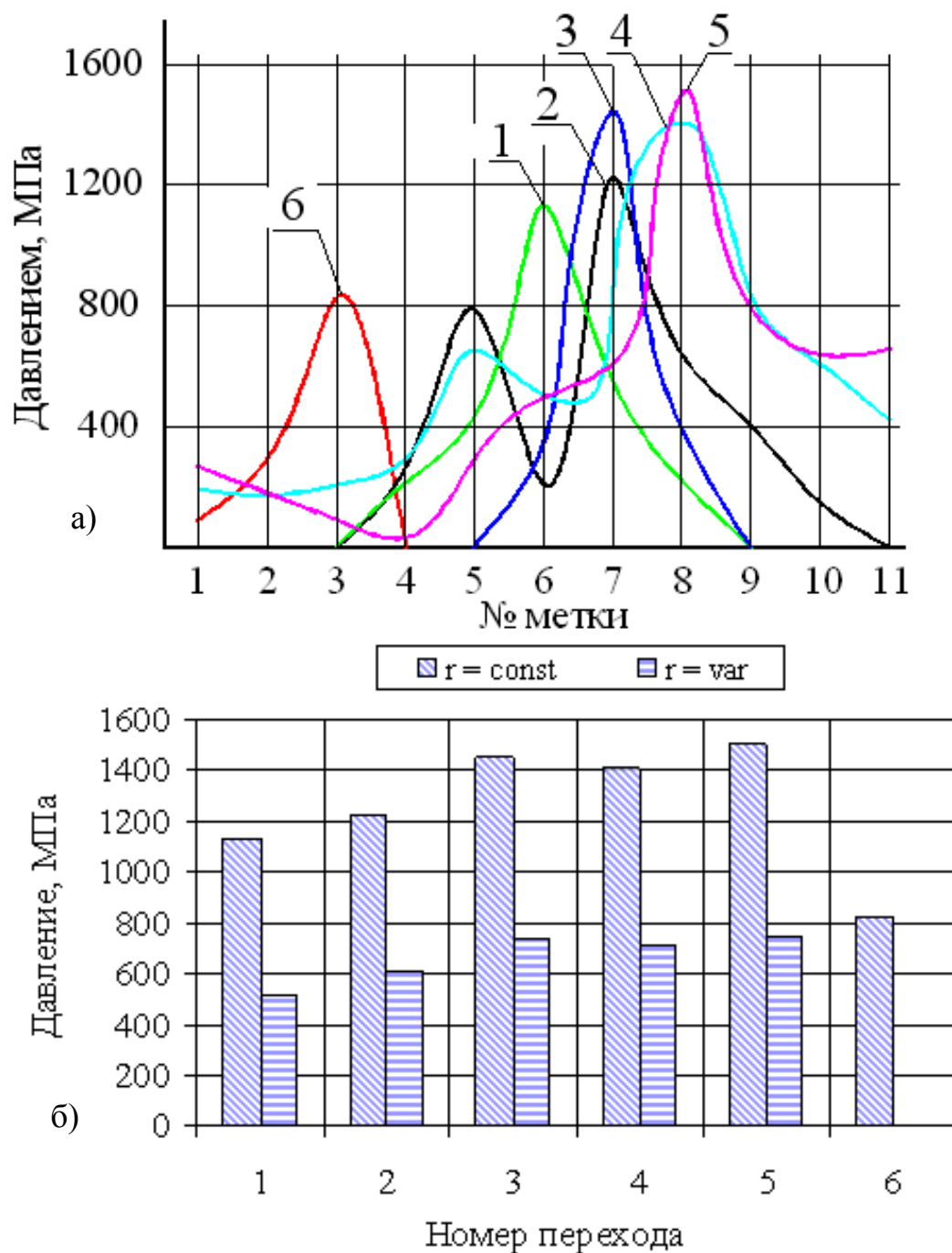


Рис. 7. Распределение контактных давлений в угловой зоне (согласно рис. 1) по переходам при формовке с постоянным радиусом (а) и пиковых давлений для случаев формовки с переменным и постоянным радиусом (б)

Снижение максимального давления обеспечивается за счет его более равномерного распределения по поверхности контакта. Характерно отсутствие давления в угловой зоне на шестом переходе, что связано с «подсадкой» полков профиля, приводящей к посадке наружного контура зоны изгиба на участок скругления инструмента.

Сравнение и обсуждение результатов. Сравнение экспериментальных величин утонения в угловых зонах (см. рис. 5) и результатов моделирования (см. рис. 6) показывает их достаточно хорошее соответствие как в отношении тенденций их изменения, так и в количественном соотношении. Ясно, что для получения близких по значениям утонения угловых зон профиля, примыкающих к горизонтальным полкам и дну профиля, необходимо сочетать «стеснение» и осадку заготовки на последних переходах. Приращение ширины заготовки в этом случае можно подсчитать по формуле (17), а входящие в нее значения приращений, приходящихся на одну угловую зону, вычисляются по формуле (16). Формула (16) также достаточно хорошо согласуется с результатами конечно-элементного моделирования и экспериментальными значениями для рассматриваемого профиля (см. рис. 3, 5 и 6). Для случая формовки зон изгиба с постоянным радиусом расхождение данных аналитической модели (при суммировании утонений нарастающим итогом) и экспериментальных данных не превышает 11%.

Основной результат исследования состоит в том, что применение плавно меняющихся по переходам радиусов зон изгиба позволяет в 1,5...2 раза уменьшить утонение в угловых зонах и величины контактных напряжений. При разработке технологии изготовления профилей из заготовок толщиной более 2 мм выявленные закономерности позволяют рекомендовать к использованию схему формообразования с переменными радиусами кривизны заготовки будущих зон изгиба.

Аналитическая модель определения утонения (16) в схемах формообразования с преимущественной вытяжкой заготовки в трансверсальной плоскости (по отношению к оси профилирования) является обобщенной закономерностью деформирования заготовки при интенсивном деформировании. Соответствующая зависимость включает в себя такие переменные, как толщину заготовки, радиус изгиба, суммарный и текущий угол подгибки. После разработки схемы формообразования можно произвести оценку суммарного утонения и сравнить ее с допустимыми значениями утонения, которые часто являются специальным требованием заказчика технологии. Что касается влияния контактных давлений на сохранность покрытия, то данный вопрос в полной мере пока не изучен. Однако в случае выбора схемы с плавно меняющимися радиусами зон изгиба по переходам контактные давления, как было показано выше, будут в 1,5...2 раза ниже, чем при использовании схемы формовки с постоянным радиусом, чем обеспечивается более высокое качество профиля. Металлографическое исследование зон изгиба образцов профилей, представленных на рис. 4, б, показывает, что в случае применения «мягкой» схемы формовки нарушения покрытия в угловых зонах отсутствуют. В других необходимых случаях требуется корректировка схем формообразования с учетом указанных ранее возможностей (из-

менение ширины заготовки, «стеснение» заготовки, осадка заготовки на ряде переходов) [7].

Таким образом, исследование процесса формообразования корытных профилей методом интенсивного деформирования с привлечением теоретического и конечноэлементного анализа, а также экспериментальных методов исследований позволило выявить общие закономерности процесса формовки профиля и резюмировать их в форме соответствующих зависимостей, позволяющих прогнозировать утонение заготовки на различных этапах деформирования и рассчитывать ширину заготовки. Расхождение данных по трем применяемым методам не превышает 11%. Применение схемы формовки заготовок толщиной более 2 мм с покрытием, предусматривающем плавное изменение радиусов изгиба по переходам, снижает утонение и уровень контактных напряжений в 1,5...2 раза, что повышает качество изготавливаемых профилей.

Библиографический список

1. Марковцев, В. А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2006. – 244 с.
2. Филимонов, С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 444 с.
3. Патент РФ на полезную модель № 81109, МПК В 21D 5/06. Роликовая оснастка для изготовления профилей из листовых заготовок с покрытием / А. С. Баранов, В. И. Филимонов, С. В. Филимонов, О. В. Мищенко. – Оpubл. 10.03.2009, Бюл. № 7.
4. Филимонов, В. И. Теория обработки металлов давлением. Курс лекций / В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 208 с.
5. Соколовский, В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.
6. Филимонов, А. В. Совершенствование технологии производства полузакрытых профилей в роликах методом интенсивного деформирования / Дис. на соискание степени канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2009. – 186 с.
7. Roll Forming Handbook / Edited by J.T. Halmos. Boca Raton: CRC Group, 2006. – 583 p.



- **Марковцев Владимир Анатольевич**, канд. техн. наук, генеральный директор ОАО «Ульяновский НИАТ»
- **Волков Александр Александрович**, начальник отдела ОАО «Ульяновский НИАТ», аспирант УлГТУ

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ НА ПРОФИЛИРОВОЧНЫХ СТАНКАХ

канд. техн. наук Марковцев В. А., канд. техн. наук Илюшкин М. В., Волков А. А.

В последние годы в строительной индустрии все чаще применяются гнутые профили несимметричного сечения, изготавливаемые на профилировочных станках методом интенсивного деформирования (МИД) [1]. Создание технологии производства профиля несимметричного сечения осложняется из-за обусловленных спецификой конструкции профиля и применяемой схемы формообразования дефектов: искажения радиусных зон, кромковой волнистости или излома полки, скрутки. Указанные дефекты часто являются предметом технологической отработки схем формообразования профилей с широкими полками при наличии глухих или открытых элементов двойной толщины [2].

Рассмотрим частный случай отработки технологии формообразования профиля армирования стеклопакетов $40,5 \times 27,5 \times 1,5$ мм (рис. 1, а), позволяющий обобщить результаты на достаточно широкий класс несимметричных гнутых профилей. Основными элементами профиля (рис. 1, б), влияющими на возникновение дефектов, являются:

- элемент А – элемент угловой зоны, участвующий в образовании незамкнутой двойной толщины и подверженный искажению формы;
- элемент Б – вертикальная полка (отбортовка) размером $16s$ (s – толщина заготовки), подгибаемая в совокупности на угол 270° и подверженная кромковой волнистости;
- элемент В – угловая зона, доступ к которой со стороны верхнего ролика отсутствует на последних переходах.

Кроме того, явная несимметричность профиля при традиционной схеме МИД, где дно профиля считается базовым элементом и располагается горизонтально в роликовых калибрах, неизбежно приводит к дефекту скрутки профиля.

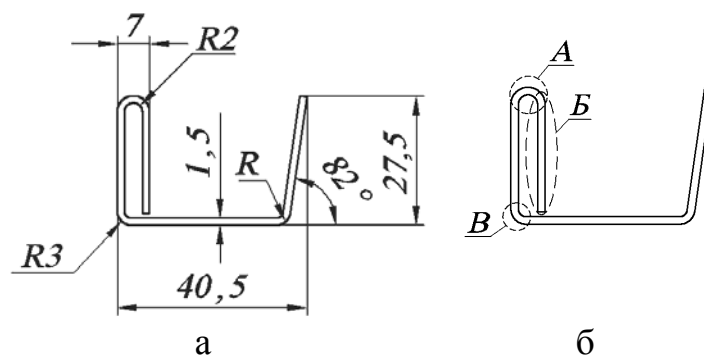


Рис. 1. Профиль армирующий – $40,5 \times 27,5 \times 1,5$: а – сечение профиля; б – основные элементы, влияющие на технологию изготовления профиля: А – радиус между вертикальной стенкой и отбортовкой $16s$; Б – отбортовка $16s$, В – радиус между незамкнутым элементом двойной толщины и дном

Армирующий профиль 40,5×27,5×1,5 мм подлежит изготовлению по схеме формообразования (рис. 2, а) на профилировочном станке ГПС – 350М8 (разработки ОАО «Ульяновский НИАТ») с техническими характеристиками, приведенными в табл. 1, с использованием комплекта технологического оснащения (рис. 2, б), отвечающего приведенной схеме формообразования. Станок ГПС входит в состав автоматизированной линии, включающей также рулонницу, отрезное устройство и приемный стол.

Отработка формовки угловых зон А и В. Предварительное профилирование заготовки по схеме рис. 2, а показало, что центр угловой зоны А (см. рис. 1, б) смещается относительно оси симметрии влево и не удовлетворяет требованию чертежа (рис. 3, а). Для схем профилирования с односторонним доступом инструмента наличие угловых зон с малыми радиусами и прилегающей полкой-консолью, вообще говоря, входит в противоречие с показателями технологичности. Для преодоления данной проблемы возможны два варианта: а) разработка и применение специальной проводки (оправки); б) некоторая модификация конфигурации профиля и корректировка схемы формообразования. Первый вариант связан с дополнительными затратами и дополнительными настройками, в то время как второй вариант представляется более привлекательным.

Таблица 1

Технические характеристики станка ГПС-350М8

№ п/п	Наименование параметра и его размерность	Значение параметра
1.	Число клеток, шт.	8
2.	Межклетьевое расстояние, мм	400
3.	Межосевое расстояние, мм	120...160
4.	Диаметр рабочих валов, мм	50
5.	Базовые диаметры роликов, мм	90
6.	Скорость профилирования, м/мин	12
7.	Вспомогательные устройства (направляющее и правильное), шт.	2

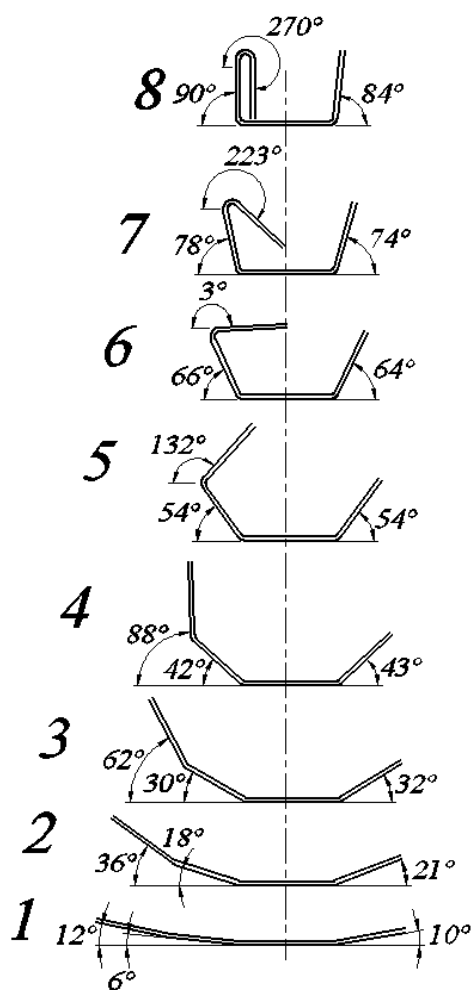


Рис. 2, а. Схема формообразования профиля армирующего



Рис. 2, б. Калибры 6, 7 и 8 переходов для изготовления профиля на начальной стадии испытания (станок ГПС-350М8)

Учитывая, что допуск на радиус обычно составляет $\pm 0,5$ мм, можно произвести замену участка профиля А на две зоны с некоторыми промежуточными радиусами и прямолинейным элементом (рис. 3, б). Тогда, второй и третий переходы схемы формообразования (рис. 2, а) могут быть скорректированы введением обратного прогиба, со стрелой прогиба 0,3 и 0,5 мм соответственно (рис. 3, в). Указанные величины обратного прогиба установлены экспериментально и являются оптимальными.

При входе в калибр четвертого перехода обратный прогиб выравнивается, а на последующих переходах зона А по своей конфигурации плавно приближается к окончательной форме, представленной на рис. 3, б.

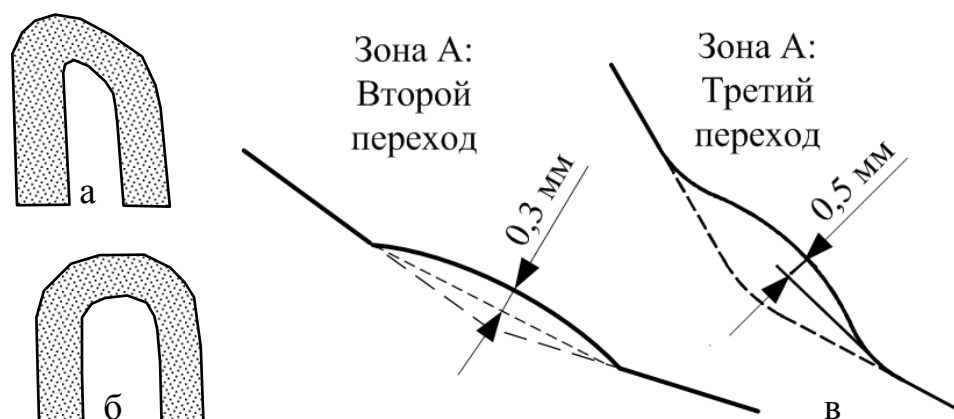


Рис. 3. Модификация схемы формовки угловой зоны А: а – конфигурация угловой зоны после формовки по исходной схеме; б – конфигурация угловой зоны после формовки по схеме с обратным прогибом; в – изменение исходной схемы формообразования в местах будущего элемента А профиля

Частный случай изменения радиусов угловых зон А и В при схеме формовки с обратным прогибом для номинальной ширины полки Б исследуемого профиля представлен на рис. 4.

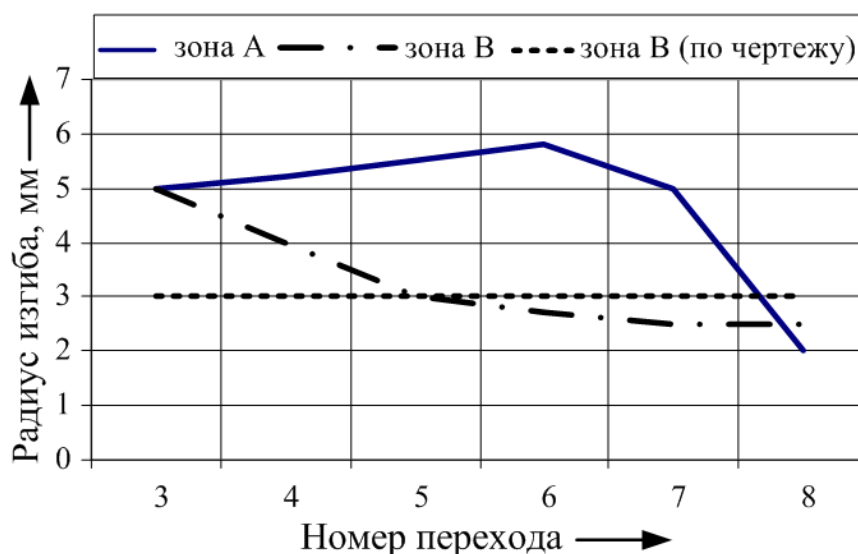


Рис. 4. Изменение радиусов изгиба зон А и В по переходам

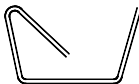
Эксперименты, связанные с установлением влияния на формовку угловых зон А и В ширины подгибаемой полки Б, показали, что радиусы изгиба указанных зон уменьшаются с увеличением ширины полки Б, причем при использовании исходной схемы формообразования происходит недопустимое изменение формы угловой зоны. На рис. 4 видно, что конечный радиус кривизны зоны составляет 2 мм, что в точности соответствует значению этого параметра по чертежу. Конечный радиус кривизны зоны В составляет 2,5 мм, что укладывается в пределы допуска на внутренний радиус (3 мм по чертежу – отклонение 0,5 мм).

Устранение кромковой волнистости. Применение жестких режимов формовки в МИД вызывает потерю устойчивости подгибаемых широких полок. В случае рассматриваемого профиля кромковая волнистость возникает на 6, 7 и

8 переходах по отбортовке 16s, образующей незамкнутый элемент двойной толщины (табл. 2). Смягчение режимов формовки за счет уменьшения углов подгибки периферийной полки на указанных переходах неизменно влечет за собой увеличение числа технологических переходов и применение профилировочного станка другой модификации с большим числом клеток. Однако возможны варианты доработки технологического оснащения и применения специально разработанных межклетьевых проводок.

Таблица 2

Потеря устойчивости подгибаемого периферийного элемента профиля

Номер перехода	Эскиз сечения заготовки	Изображение профиля с полкой, подверженной кромковой волнистости	Параметры кромковой волнистости
6			$T = 70 \text{ мм}$ $A = 2,5 \text{ мм}$
7			$T = 65 \text{ мм}$ $A = 1,3 \text{ мм}$
8			$T = 65 \text{ мм}$ $A = 1,2 \text{ мм}$
Т – период волны; А – амплитуда волны			

Предварительный анализ показал, что возможной причиной возникновения дефекта кромковой волнистости является чрезмерное давление в торец полки на шестом и седьмом переходах в совокупности со значительными углами подгибки, $\Delta\alpha \approx 50^\circ$ и $\Delta\alpha \approx 60^\circ$ соответственно. Апостериорное вычисление деформаций на кромке подгибаемой полки производили по модели работы [3]. На последних трех переходах (6 – 8) деформация превышала критическое значение для данной ширины подгибаемой полки, а на седьмом переходе она достигала максимальной величины – (0,38 – 0,40)%.

Для уменьшения торцевого давления были проведены доработки калибров шестого и седьмого переходов согласно рис. 5, а также на 1,5 мм уменьшена ширина заготовки.

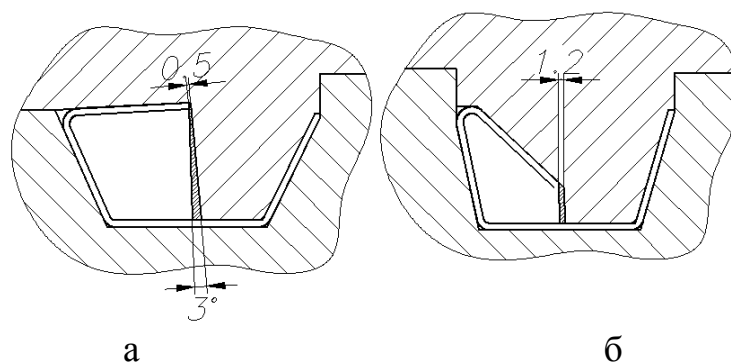


Рис. 5. Доработка роликовых калибров: а – шестой переход, б – седьмой переход

После доработки калибров величина деформации на шестом и седьмом переходах уменьшилась в 1,5 и 2,3 раза соответственно. Однако высвобождение кромки заготовки на седьмом переходе (см. рис. 5, б) ослабило натяг полки между седьмым и восьмым переходом и создало предпосылки для увеличения амплитуды волны области пластической неустойчивости полки.

Следует отметить взаимное влияние условий реализации формообразования заготовки на соседствующих переходах. Например, применение межклетевой проводки скольжения между седьмым и восьмым переходами не устраняет накопленные на предшествующих переходах деформации растяжения кромки заготовки. Особенность в данном случае заключается в том, что элемент двойной толщины не является глухим (смыкающимся), и к его плоскости нельзя прикладывать значительное силовое воздействие, но можно задавать геометрическое ограничение для бокового перемещения полки. В то же время предварительное уменьшение деформаций на двух предшествующих переходах с помощью специальной сконструированной и изготовленной межклетевой проводки качения, устанавливаемой между шестым и седьмым переходом, позволяет снизить продольные деформации кромки заготовки до уровня, близкого к критическому (рис. 6).

Межклетевая проводка качения (рис. 7, а) устанавливается на вертикальные валы промежуточной клетки станка ГПС – 350М8. Она содержит несущую плиту с двумя ввинченными в нее регулировочными винтами, несущими стопорные и упорные гайки регулировки положения ползунов. Ползуны через вилки удерживают вал с подшипником, выполняющим функцию формующего ролика. Подшипник устанавливается на валу с помощью регулировочных втулок и крепежных винтов. Смещением ползунов в вертикальной плоскости выбирают необходимый угол подгибки, а окончательную настройку проводки осуществляют после захода профиля в калибр последующего перехода путем поджатия подшипника с помощью регулировочных винтов.

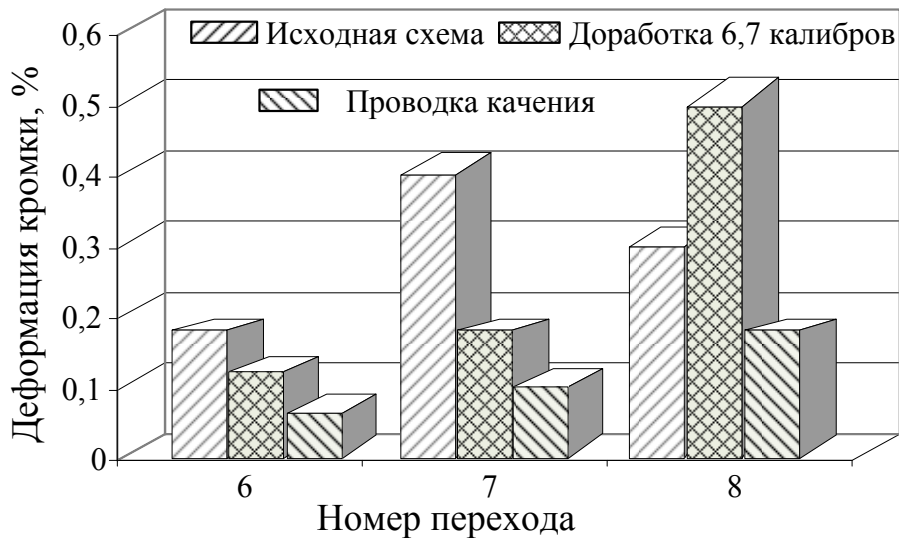


Рис. 6. Диаграмма распределения деформаций по кромке отбортовки 16s при различных условиях формообразования

Небольшое превышение остаточными продольными деформациями кромки заготовки значений критической деформации соответствует случаю кромковой волнистости с амплитудой до 1,5 мм/м. Для устранения этого дефекта использовали межклетьевую проводку скольжения (рис. 7, б), устанавливаемую между седьмым и восьмым переходом. Проводка скольжения состоит из двух основных элементов (обкатывающего ролика и прижимной пластины проводки), которые монтируются на валах промежуточной клетки станка. Обкатывающий ролик выполняет функцию упора.

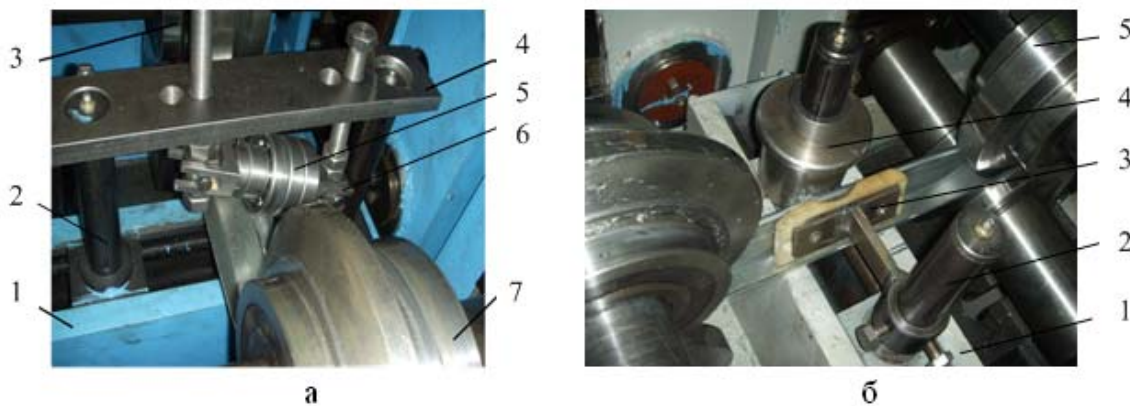


Рис. 7. Межклетьевые проводки: а – проводка качения: 1 – промежуточная клеть; 2 – вал промежуточной клетки; 3 – формующий ролик шестого перехода; 4 – несущая плита; 5 – формующий ролик (подшипник); 6 – вилка; 7 – формующий ролик седьмого перехода; б – проводка скольжения: 1 – промежуточная клеть; 2 – вал промежуточной клетки; 3 – пластина проводки скольжения (прижим); 4 – обкатывающий ролик

Проводка позволяет как бы разбить подгибку на два этапа и тем самым снизить уровень продольных деформаций в процессе деформирования. Применение межклетевых проводок позволило предотвратить появление дефекта кромковой волнистости и получить профиль заданной формы сечения и размерами по чертежу без кромковой волнистости. Однако по выходу из последней пары роликов профиль имел скрутку порядка 15°/м.

Устранение скрутки. Несимметричное сечение профиля создает предпосылки для возникновения скрутки, причиной которой является различие деформаций подгибаемых полок. В ряде случаев скрутку устраняют за счет специального расположения профиля в роликах, когда базовый элемент (обычно дно профиля) располагают в переходах под заданными углами, характерными для каждого перехода. Такая мера обычно вводится для ориентации выходного сечения профиля оптимальным образом для его отрезки в летучем штампе или на прессе. Однако эту меру следует считать вынужденной, поскольку она усложняет процесс проектирования, изготовления и настройки технологического оснащения; возможно возникновение необходимости увеличения базовых диаметров роликов и ширины последних, осложняется исполнение замыкающих элементов роликов.

В случае рассматриваемого профиля применяли схему компенсационной скрутки правильным устройством профилировочного станка на $17,5^\circ$ и разворот профиля в матрице отрезного устройства на тот же угол. На рис. 8, а показано положение профиля в матрице отрезного устройства, а на рис. 8, б – образец кондиционного профиля, изготовленного по предлагаемой технологии. Следует отметить, что по традиционной технологии [4] производство рассматриваемого профиля требует от 14 до 18 технологических переходов вместо восьми, принятых по технологии МИД.

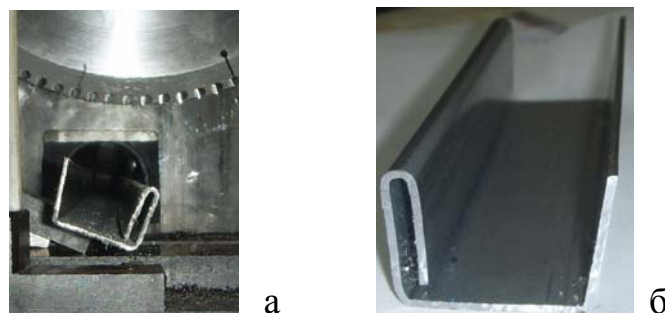


Рис. 8. Готовый профиль армирования стеклопакетов:

а – профиль в матрице отрезного устройства; б – образец кондиционного профиля

Таким образом, рассмотренные вопросы разработки технологии производства несимметричных профилей позволяют сформулировать рекомендации для разработчиков технологий изготовления аналогичных профилей методом интенсивного деформирования:

При анализе технологичности детали следует выявлять криволинейные элементы, формируемые по схеме работы консоли, и заменять их несколькими участками повышенной жесткости или же предусматривать конструктивные или технологические рифты в соответствующих местах профиля.

Во избежание появления кромковой волнистости надлежит выполнять участки высвобождения в роликовом калибре для снижения торцевого поджатия и/или же уменьшать ширину развертки заготовки. Назначаемые углы подгибки не должны приводить к критическим деформациям, определенным в работе [3]. В обоснованных случаях возможно применение межклетевых проводок качения или скольжения.

Для предотвращения значительной скрутки следует предусматривать поворот базового элемента профиля в каждом переходе на компенсирующий угол в соответствии с различием деформаций периферийных участков профиля, а отрезные устройства устанавливать на достаточном расстоянии от профилировочного станка во избежание пластического кручения профиля. Предпочтительнее устранение небольшого скручивания правильным устройством, что облегчает проектирование, изготовление технологического оснащения и отладку технологии производства профиля.

Библиографический список

1. Филимонов, С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2008. – 444 с.
2. Филимонов, А. В. Совершенствование технологии производства полужакрытых профилей в роликах методом интенсивного деформирования: Дис. канд. техн. наук: 05.03.05. – Нижний Новгород : НГТУ, 2009. – 206 с.
3. Филимонов, С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2004. – 246 с.
4. Roll Forming Handbook / Edited by J.T. Halmos. Boca Raton: CRC Group, 2006. – 583 p.



- **Марковцев Владимир Анатольевич**, канд. техн. наук, генеральный директор ОАО «Ульяновский НИАТ»
- **Илюшкин Максим Валерьевич**, канд. техн. наук, зам. генерального директора ОАО «Ульяновский НИАТ»
- **Волков Александр Александрович**, начальник отдела ОАО «Ульяновский НИАТ», аспирант УлГТУ

УДК 621.981

ФОРМОВКА НЕСУЩЕГО ПРОФИЛЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ ДВОЙНОЙ ТОЛЩИНЫ

канд. техн. наук Филимонов С. В., Лапшин В. И., Лапин В. В.

В последние годы развитие производства гнутых профилей имеет тенденцию к стремительному росту в связи с разработкой новых материалов с покрытием и широким применением гнутых профилей в строительстве и машиностроении.

Многоэлементные гнутые профили изготавливают на профилировочных станках традиционным многопереходным профилированием ленты, используя метод интенсивного деформирования (МИД) и в редких случаях – метод стесненного изгиба. МИД базируется на регулируемой знакопеременной продольной деформации подгибаемых элементов профиля во избежание потери их ус-

тойчивости, реализуется в закрытых роликовых калибрах и требует в 1,5 – 2 раза меньше переходов, чем традиционное профилирование [1]. Сокращение числа переходов является существенным преимуществом для условий мелкосерийного или разового выпуска партии профилей. Вместе с тем разработка технологии производства специальных, в частности, закрытых профилей с элементами двойной толщины, представляет собой далеко не тривиальную задачу.

В статье рассмотрены особенности разработки технологии производства закрытых профилей на примере замкнутого профиля для теплиц со стенками двойной толщины, изготавливаемого по полужакрытой схеме. Профиль, используемый в качестве дуг теплиц, имеет сечение, показанное на рис. 1.

Разработка технологии предполагает решение следующих задач: предварительное определение числа переходов; выбор базового элемента профиля (или оси профилирования) и расположение окончательного сечения профиля в роликах последней пары; определение принципа формовки; разработка схемы формообразования; расчет протяженности зоны плавного перехода; определение мер предотвращения потери устойчивости элементов профиля; уточнение числа переходов и выбор профилировочного оборудования; определение видов замыкания калибров; проектирование и изготовление технологического оснащения; отработка технологии и определение режимов формообразования профиля.

Число переходов. Для замкнутых многоэлементных профилей произвольного типоразмера модели числа переходов отсутствуют. Следует отметить, что в технологии традиционного профилирования для изготовления полужакрытого профиля окантовки гаражных дверей высотой около 20 мм из ленты толщиной 0,5 мм используют от 30 до 33 технологических переходов [2], причем уровень сложности этого профиля несколько ниже, чем уровень сложности профиля, приведенного на рис. 1. Даже для сравнительно простого полужакрытого профиля для автомобилестроения высотой 20 мм и толщиной стенок 0,5 мм с одним элементом двойной толщины, изготавливаемого традиционным профилированием, требуется 18 технологических переходов [2].

Предварительный выбор числа переходов для изготовления рассматриваемого профиля основан на анализе эквивалентной конфигурации С-образного профиля с локальными элементами жесткости, для формовки которого требуется семь – восемь переходов [1]. Последующие четыре – пять переходов необходимы для замыкания эквивалентной конфигурации и приведения ее к Н-образной форме. Последние три – четыре перехода требуются для формовки замкового элемента. По предварительной оценке, базовое число переходов должно составлять 16 переходов, что также соответствует имеющему-

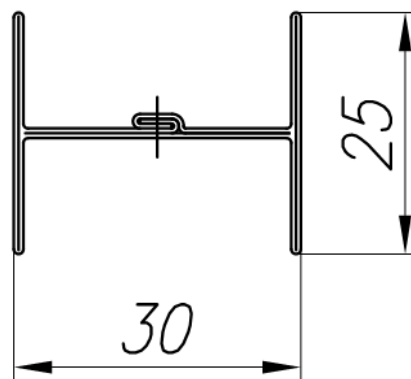


Рис. 1. Конфигурация замкнутого многоэлементного профиля с элементами двойной толщины из стали 08кп толщиной 0,5 мм

ся оборудованию (универсальному профилировочному модульному станку СПУ-400K16×50 разработки ООО «Спецтехнология» (г. Ульяновск)).

Выбор оси профилирования и расположение окончательного сечения профиля в роликах. В отличие от традиционного профилирования, где ось профилирования располагают обычно по центру тяжести сечения профиля в каждом из переходов, в МИД ось профилирования имеет привязку к точке, подверженной наименьшему перемещению. На рис. 2 видно, что срединный элемент профиля (элемент будущей горизонтальной стенки) не подвергается формовке ни в одном из переходов. Следовательно, данный элемент принимается в качестве базового элемента в схеме формообразования рис. 2. При этом ось профилирования должна проходить через срединную поверхность заготовки и лежать в вертикальной плоскости, проходящей через середину указанного элемента. Данный выбор оси профилирования и базового элемента позволяет вести формовку по открытой схеме на первых четырех переходах, а на последующих переходах – минимизировать суммарные углы подгибки элементов. Небольшая асимметрия сечений калибров может быть скорректирована углами подгибки элементов справа и слева от базового элемента. Специальные меры предотвращения скрутки профиля не требуются.

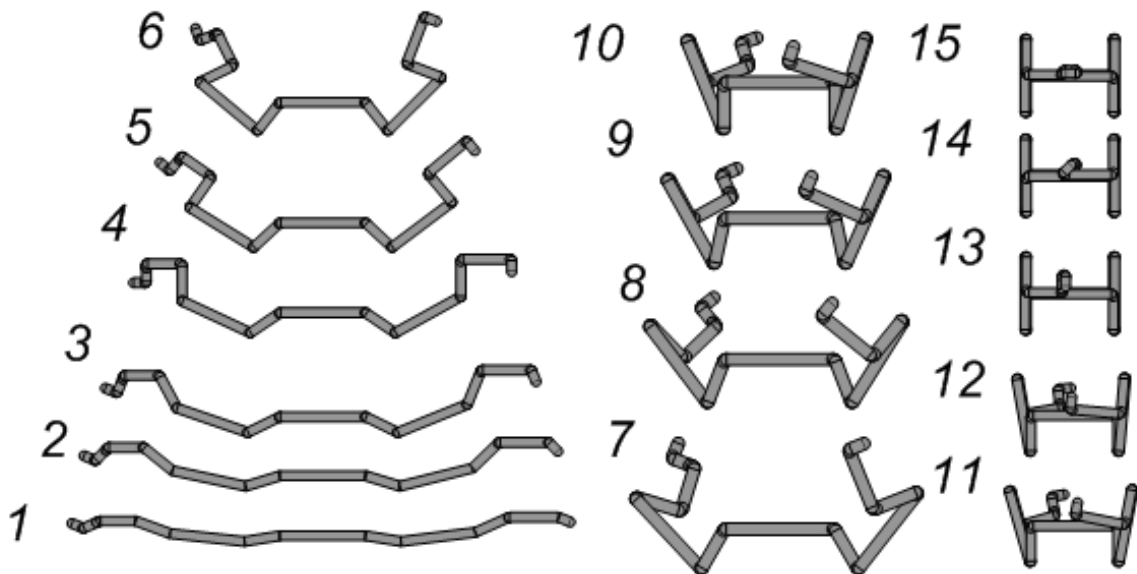


Рис. 2. Схема формообразования профиля: 1 – 15 – конфигурация сечения заготовки на пятнадцати технологических переходах

Принцип формовки. В методе интенсивного деформирования принимается принцип параллельной формовки элементов профиля в отличие от традиционного профилирования, где весьма часто применяется принцип последовательной формовки, приводящий к завышенному числу переходов [2]. Следует иметь в виду, что в МИД конечные радиусы изгиба задаются практически в первом переходе. В редких случаях (например, при формовке рифтов в донной части профиля) окончательное задание радиусов зон изгиба откладывается на последующие переходы. Как видно на рис. 2, зоны изгиба профиля формируются с первого перехода, а на последующих переходах лишь изменяются углы подгибки элементов.

Разработка схемы формообразования. Разработанная и приведенная на рис. 2 схема формообразования отличается тем, что ось профилирования делит заготовку примерно пополам, а монотонная подгибка по углу крайних полок с элементами жесткости дает им примерно равную продольную деформацию в каждом из переходов. Указанные продольные деформации несколько уменьшаются за осевой плоскостью роликов вследствие эффекта «жесткого конца», регулируемого соотношением диаметров роликов соседних переходов [1].

Небольшая глубина формовки (максимальные значения достигаются на шестом и седьмом переходах) позволяет применять формующие ролики небольших диаметров, в основном в пределах 100 мм. Схема максимально приближена к схеме открытой формовки, а углы подгибки определены с тем расчётом, чтобы обеспечивалась достаточная жесткость подгибаемых полок во избежание их излома из-за «набегания» продольных деформаций. Расчеты углов подгибки проведены на основе метода локальных жесткостей [1], а их распределение по переходам представлено на рис. 3. С принципом формовки и схемой формообразования тесно связана процедура расчета ширины заготовки, учитывающая утонение заготовки.

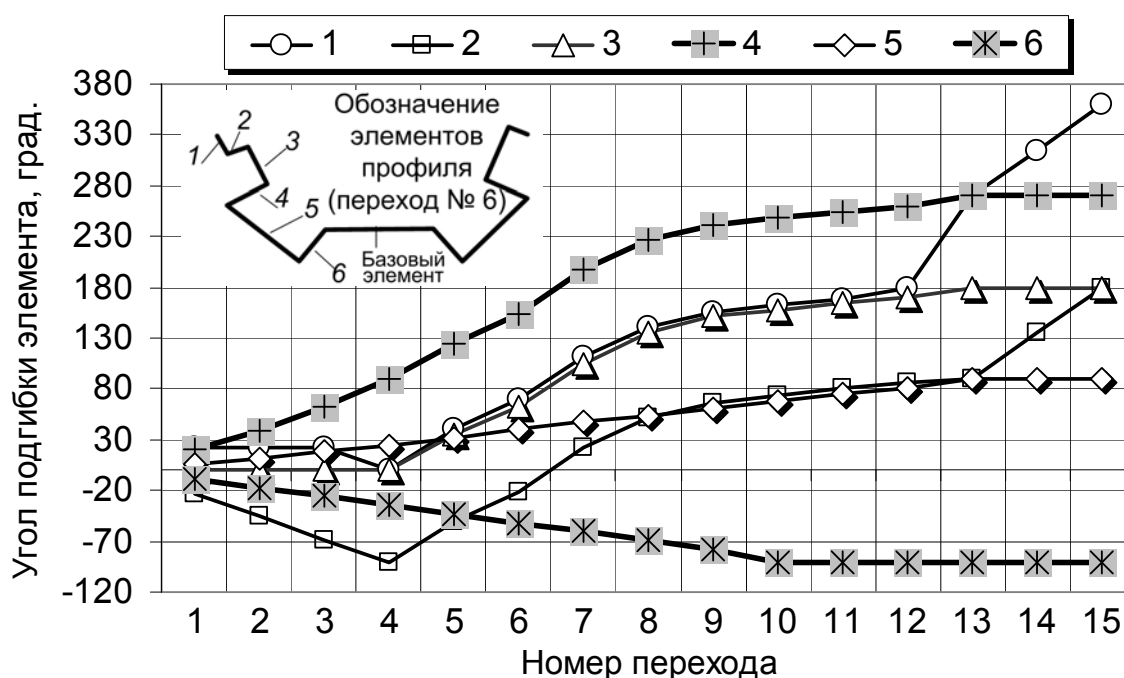


Рис. 3. Распределение углов подгибки элементов по переходам в схеме формообразования профиля: 1 – 6 – номера элементов профиля

Ширина заготовки. Теоретическая длина развертки поперечного сечения готового профиля по средней линии определяется из выражения

$$B_T = \sum_{i=1}^{n+1} B_i^R + \sum_{j=1}^n B_j^C, \quad (1)$$

где B_i^R , B_j^C – длина прямолинейного и криволинейного участков соответственно, мм; n – число зон изгиба профиля.

Длина j -го криволинейного участка определяется зависимостью

$$B_j^c = \frac{\pi \cdot \alpha}{180^\circ} \cdot (r_j + s/2). \quad (2)$$

С использованием формул (1) – (2) ширину заготовки для профилирования определяют по формуле

$$B_B = B_T + \Delta B, \quad (3)$$

где ΔB – приращение заготовки, которое подсчитывается алгебраически в зависимости от схемы формообразования.

Если на ряде переходов применяется подсадка заготовки (торцевое сжатие), то слагаемые, входящие в расчетную формулу для определения ΔB , берут со знаком «плюс». Если же формообразование осуществляется в условиях растяжения, то соответствующие слагаемые берутся со знаком «минус». В рассматриваемой схеме формообразования доминирует схема с растяжением, а расчет указанного приращения основывается на зависимости

$$\Delta B = -\frac{S}{\pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_B} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n \left(\alpha_i \cdot \frac{r_i + 1/2}{\sqrt{2 \cdot r_i^2 + 2 \cdot r_i + 1}} \right), \quad (4)$$

где σ_T , σ_B – предел текучести и предел прочности материала заготовки соответственно; α_i – суммарный угол подгибки i -й угловой зоны; r_i – относительный радиус изгиба i -й угловой зоны.

Расчет по формуле (4) дает значение приращения ширины заготовки 1,8 мм. При некорректном расчете ширины заготовки невозможно получить кондиционный профиль, даже если все другие составляющие технологии выполнены безукоризненно.

Расчет протяженности зоны плавного перехода выполнен для периферийных подгибаемых элементов каждого из переходов в соответствии с моделью зоны плавного перехода работы с применением метода локальных жесткостей [3]. Полученный результат для каждого из переходов сравнивался с межклетьевым расстоянием профилировочного оборудования. Протяженность зоны плавного перехода не должна превышать значение межклетьевого расстояния станка во избежание переформовки элементов профиля. По данным расчетов, протяженность зон плавного перехода всех переходов не превышала межклетьевого расстояния профилировочного станка.

Меры предотвращения потери устойчивости элементов профиля. Специальных и всеобъемлющих критериев потери устойчивости элементов при профилировании пока не существует. В общем случае для оценки потери устойчивости можно использовать модель, в которой потеря устойчивости прогнозируется индикаторной функцией [3]. В данном случае методом локальных жесткостей многоэлементные подгибаемые полки редуцируются к гладким полкам эквивалентной толщины, к которым можно применять указанный выше критерий. Однако для рассматриваемого профиля жесткость подгибаемых многоэлементных полок оказывается достаточной для обеспечения устойчивости деформирования. На периферийных участках заготовки имеются элементы жесткости в виде отбортовок, гарантирующие отсутствие кромковой волнистости.

Уточнение числа переходов и выбор профилировочного оборудования. Иногда разработка схемы формообразования вызывает необходимость увеличения или сокращения первоначально определенного числа переходов. Это может возникать как из-за погрешностей модели и процедуры приведения сечения профиля к типовой конфигурации, так и вследствие издержек на уровне определения положения сечения профиля в роликах, разработки схемы формообразования и предварительного определения режимов формообразования. В этой связи перед выбором профилировочного оборудования уточняют число переходов, а при разработке схемы формообразования под наличное оборудование с ограниченными возможностями предусматривают ряд дополнительных мер [1].

Применительно к разработанной схеме формообразования (см. рис. 2 и 3) можно считать пригодным модульный станок «среднего типа» [4], обладающий достаточной мощностью, приемлемой длиной валов, подходящим межосевым и межклетьевым расстоянием.

Определение вида замыкания калибров. Данный вопрос достаточно подробно изложен в работе [5]. Ограничимся лишь указанием на то, что для рассматриваемого профиля применяется замыкание по горизонтальным и вертикальным линиям разреза с двусторонним «врезанием» и геометрическим замыканием валов.

Проектирование и изготовление технологического оснащения. Проектирование технологического оснащения на основе разработанной схемы формообразования требует специальных знаний в области профилирования, относящихся как к процессу формообразования, так и к процессам изготовления формирующих роликов. В частности, формирующие ролики в ряде переходов необходимо выполнять сборными (рис. 4), что связано с обеспечением надлежащих условий формовки и с возможностью использования стандартного режущего инструмента.

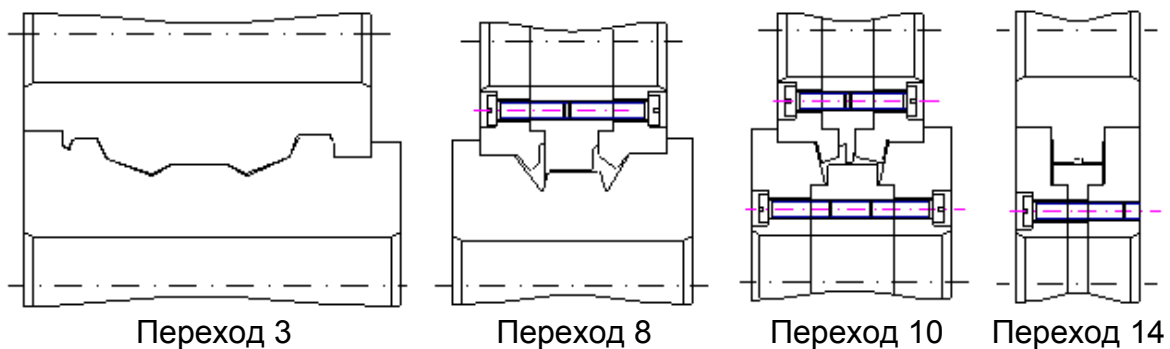


Рис. 4. Конструкция валковой арматуры для различных технологических переходов: переход 3 – цельная конструкция формирующих роликов; переход 8 – цельная конструкция нижнего ролика и сборная конструкция верхнего ролика; переход 10 – сборная конструкция обоих роликов; переход 14 – цельная конструкция верхнего ролика и сборная конструкция нижнего ролика

Отработка технологии и определение режимов формообразования. В результате отработки технологии было установлено, что наилучшие результаты профилирования достигаются при отключенных верхних валах клеток некоторых переходов, что связано с условиями замыкания роликовых калибров.

Геометрические характеристики сечения были выдержаны в пределах заданных допусков, отклонения углов не превышали $\pm 1^\circ$ (требования по чертежу). Серповидность, продольная кривизна и скрутка отсутствовали (допуски по чертежу: 1,0 мм/м, 1 мм/м и $1^\circ/\text{м}$ соответственно). На рис. 5 представлены образцы полученного профиля, причем на рис. 5, б показан профиль с повышенной жесткостью стенки, обеспечиваемой специальным устройством, установленным в шестнадцатой клетке станка.

Технология реализована на базе автоматизированной линии «среднего типа» производства ООО «Спецтехнология», включающей рулонницу, профилировочный станок, отрезное устройство и систему управления. Технология и оборудование внедрены на площадях заказчика и успешно эксплуатируются.

В данной работе особенности разработки технологии производства многоэлементного профиля рассмотрены в основном на качественном уровне. Некоторые вопросы не рассматриваются в силу их малого значения для данного профиля, например боковой утяжки, учета пружинения и др. Тем не менее, ряд весьма полезных выводов и рекомендаций позволит избежать серьезных ошибок в разработке технологии профилирования, влекущих за собой существенные финансовые потери.

Выводы. При разработке технологии производства многоэлементных профилей предварительный расчет числа переходов следует производить после приведения конфигурации профиля к сечению профиля типовой номенклатуры на основе модели расчета числа переходов, разработанной авторами. Вертикальная плоскость, содержащая ось профилирования, должна делить заготовку примерно на равные части. Следует отдавать предпочтение параллельной схеме формовки.

Схема формообразования должна гарантировать равенство продольных деформаций подгибаемых полок и обеспечивать двусторонний доступ инструмента к заготовке на возможно большем числе переходов, а также точность формовки элементов профиля. Пригодность схемы формообразования следует осуществлять расчетом протяженности зоны плавного перехода с целью предупреждения переформовки профиля.

Для предотвращения потери устойчивости элементов профиля необходимо осуществлять корректировку схемы формообразования в части пересмотра углов подгибки на основе соответствующих расчетов и использовать при необходимости натяг профиля, межклетьевые проводки и т. д.

Выбор вида замыкания калибров следует производить на основе разработанного авторами классификатора замыканий роликового калибра, предпочитая геометрическое замыкание силовому. В необходимых случаях рекомендуется использовать сборную оснастку. Режимы формообразования (настройка калиб-

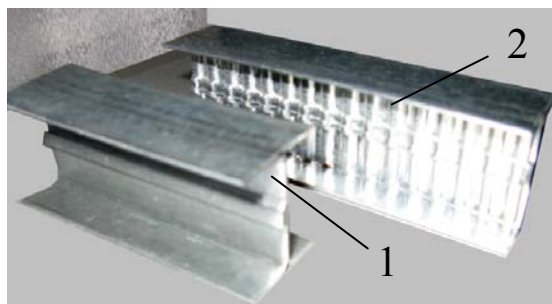


Рис. 5. Образцы готовых профилей, изготовленных по разработанной технологии: 1 – замкнутый профиль с гладкими полками; 2 – профиль с повышенной жесткостью стенки

ров, правильного устройства, схемы привода клетей) должны выбираться с учетом схем формообразования и получаемого качества профиля при отработке.

Библиографический список

1. Филимонов, С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2008. – 444 с.
2. Roll Forming Handbook / Edited by J.T. Halmos. Boca Raton: CRC Group, 2006. – 583 p.
3. Филимонов, С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2004. – 246 с.
4. Филимонов, В. И. Условия замыкания калибров при интенсивном формообразовании открытых профилей в роликах / В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Производство проката. – 2004. – №11. – С. 23–28.
5. Патент РФ на полезную модель № 50886. МПК В21D 5/06. Профилегибочный стан / В. А. Литвинов, А. В. Филимонов, Д. П. Зарубин, С. В. Филимонов, В. И. Лапшин. – Оpubл. 27.01.2006. Бюл. № 03.



- **Филимонов Сергей Вячеславович**, канд. техн. наук, генеральный директор НПО «ИДМ»
- **Лапшин Владимир Иванович**, технический директор ООО «Спецтехнология» (г. Ульяновск)
- **Лапин Вячеслав Викторович**, генеральный директор ОАО «Ульяновский механический завод»

3. КОНСТРУКЦИИ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ: КЛАССИФИКАЦИЯ, РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СБОРКА КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.981

ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ И УЗЛОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Лاپин В. В., канд. техн. наук Филимонов А. В.

При использовании гнутых профилей проката различных форм и размеров поперечного сечения в строительстве, автомобилестроении, машиностроении на стадии разработки конструкции изделий, включающих гнутые профили проката перед конструктором возникает ряд вопросов, требующих определенных знаний в сфере расчета и применения тонкостенных конструкций, а также в отношении технологических возможностей производства гнутых профилей. Уровень таких знаний и их компетентная реализация определяют уровень конструктивной технологичности гнутого профиля, подлежащего использованию в конструкции разрабатываемого изделия.

Наиболее общие сведения по технологичности конструкций изложены в работе [1], однако для практических целей в конкретной области, в частности в сфере сборных конструкций из тонкостенных гнутых профилей проката, требуются конкретные сведения и рекомендации. Данная публикация отчасти восполняет этот пробел в литературе последних десятилетий по конструктивной технологичности гнутых профилей, применяемых в изделиях различного назначения. Кроме того, в последнее десятилетие получил широкое распространение метод интенсивного деформирования, применяемый для производства многоэлементных гнутых профилей и обладающий рядом преимуществ перед традиционным профилированием [2]. Учет новых возможностей технологии также оказывает существенное влияние на процесс конструирования гнутого профиля и выбор материала.

На рис. 1 указаны основные факторы, подлежащие учету при разработке конструкций с применением гнутых профилей. По функциональному назначению профилей в конструкции (блок 1 рис. 1) они могут быть условно разделены на силовые, соединительные, вспомогательные и декоративные. Часто один и тот же профиль может совмещать ряд функциональных предназначений. Например, силовой профиль конструкции фасада здания или мансардной постройки должен удовлетворять требования технической эстетики, выполняя тем самым и функцию декоративного элемента.

Силовые элементы конструкции могут работать на сжатие-растяжение, изгиб, кручение или же испытывать комбинированное нагружение. В зависимости от вида нагружения и значений нагрузки при разработке конструкции профиля проводят соответствующий проектировочных расчет по допускаемым на-

пряжениям или допускаемым нагрузкам. Однако сложность определения расчетным путем разрушающих нагрузок существенно ограничивает применение второго подхода. Расчетные формулы для различных видов нагружения при проектировании профиля сведены в табл. 1. Если профиль подвержен нескольким видам нагрузок, то в первом приближении размеры сечения могут определяться на основе отбора максимальных расчетных значений размеров элементов профиля из совокупности полученных расчетных данных.

Для уточненного расчета сечения профиля при комбинированном нагружении следует обращаться к работам [3, 4]. При этом надлежит заметить, что в ряде случаев форма профиля и условия закрепления концов профильной балки предопределены требованиями к эксплуатации и монтажу профиля в конструкции (блоки 2 и 3 рис. 1).

Профиль может выполнять функцию соединительного элемента (блок 1.2 рис. 1) – неподвижного (раскосы, соединители, перемычки) или подвижного (тяги). В этом случае проектировочный и поверочный расчет существенно упрощаются. Специальных расчетов, связанных с нагружением, в ряде случаев можно избежать при проектировании вспомогательных элементов (блок 1.3 рис. 1) (ограждений, направляющих, уплотнителей), а также декоративных элементов (блок 1.4 рис. 1) (панелей и планок). Уточненные расчеты могут не потребоваться и в случае изготовления единичных изделий, в то время как для массового производства деталей и узлов ответственного назначения, кроме проектировочных расчетов, желательно выполнить конечно-элементный и функционально-стоимостной анализ конструкций.

Таблица 1

№ п/п	Вид нагружения	Расчетные зависимости	Примечание
1.	Растяжение	$A \geq \frac{N}{[\sigma]}$	
2.	Продольный изгиб (сжатие)	$\frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{Max}}{(\mu \cdot l)^2} \leq P_{cr}$	$\frac{\mu \cdot l}{i} > \lambda_0$
3.	Поперечный изгиб	$\frac{M_u^{Max} \cdot h_{Max}}{J_m} \leq [\sigma]$	
4.	Кручение	$\frac{3 \cdot M_k}{s_0 \cdot \sum_{i=1}^n b_i} \leq [\tau]$	

Обозначения в табл. 1: A – площадь сечения стенок профиля; N – растягивающая сила; $[\sigma]$ – допускаемое напряжение; E – модуль Юнга; J_{Max} – максимальный момент инерции сечения профиля; μ – коэффициент закрепления концов профильной балки; l – длина профильной балки; P_{cr} – критическая продольная сила сжатия балки; M_u^{Max} – максимальный изгибающий момент; h_{Max} – максимальная высота сечения профиля; J_m – момент инерции относительно оси, перпендикулярной плоскости изгиба и проходящей через центр тяжести сечения профиля; M_k – крутящий момент; s_0 – толщина стенок профиля; b_i – длина i -го элемента профиля по сечению; n – число элементов сечения профиля; $[\tau]$ – допускаемое касательное напряжение.

На выбор формы сечения профиля существенно влияют условия компоновки узла, взаимозаменяемости и ремонтпригодности (блок 2 рис. 1). Часто выбор формы сечения профиля (блок 2.1 рис. 1) связан с типовым набором фитинговых элементов (блок 2.2 рис. 1), выпускаемых серийно, с учетом возможной замены профиля после прекращения его производства другим, имеющим сходные характеристики несущей способности (блок 2.3 рис. 1). Это обстоятельство вызвано частой сменой номенклатуры производимых профилей в условиях современного рынка профильной продукции [2]. Однако определяющим фактором при выборе формы сечения профиля являются условия эксплуатации (блок 3 рис. 1), в частности условия нагружения (блок 3.2 рис. 1). Толщину стенок профиля и размеры элементов его сечения обычно получают в результате проектировочных расчетов. Выбор материала профиля определяется не только ценой материала и его прочностными свойствами, но и внешними условиями эксплуатации изделия (температурой, влажностью, ветровой нагрузкой и т. п.) (блок 3.1 рис. 1). В последние годы в строительной индустрии все чаще применяют профили, изготавливаемые из материалов с покрытием [5]. Такие профили обладают достаточно высокой коррозионной стойкостью, однако в большинстве случаев пригодны лишь для образования разъемных соединений. С одной стороны, это повышает ремонтпригодность конструкции и облегчает сборку, а с другой стороны, может накладывать ограничения в части удовлетворения условиям функциональности (при необходимости жесткой заделки концов или необходимости работы при низких или высоких температурах) и сборки (например, невозможность применения сварки).



Рис. 1. Факторы, подлежащие учету при разработке конструкций с применением гнутых профилей

При разработке конструкции профиля следует также учитывать ограничения, следующие из требований технологичности производства гнутых профилей, которые достаточно обстоятельно описаны в работе [6]. Это касается

минимальных радиусов изгиба, ограничений на размеры периферийных элементов, размеры и топологию отверстий (при их наличии), виды покрытий и т. д. В обобщенном виде изложенный выше подход к проектированию гнутого профиля может быть представлен в виде укрупненного алгоритма на рис. 2.

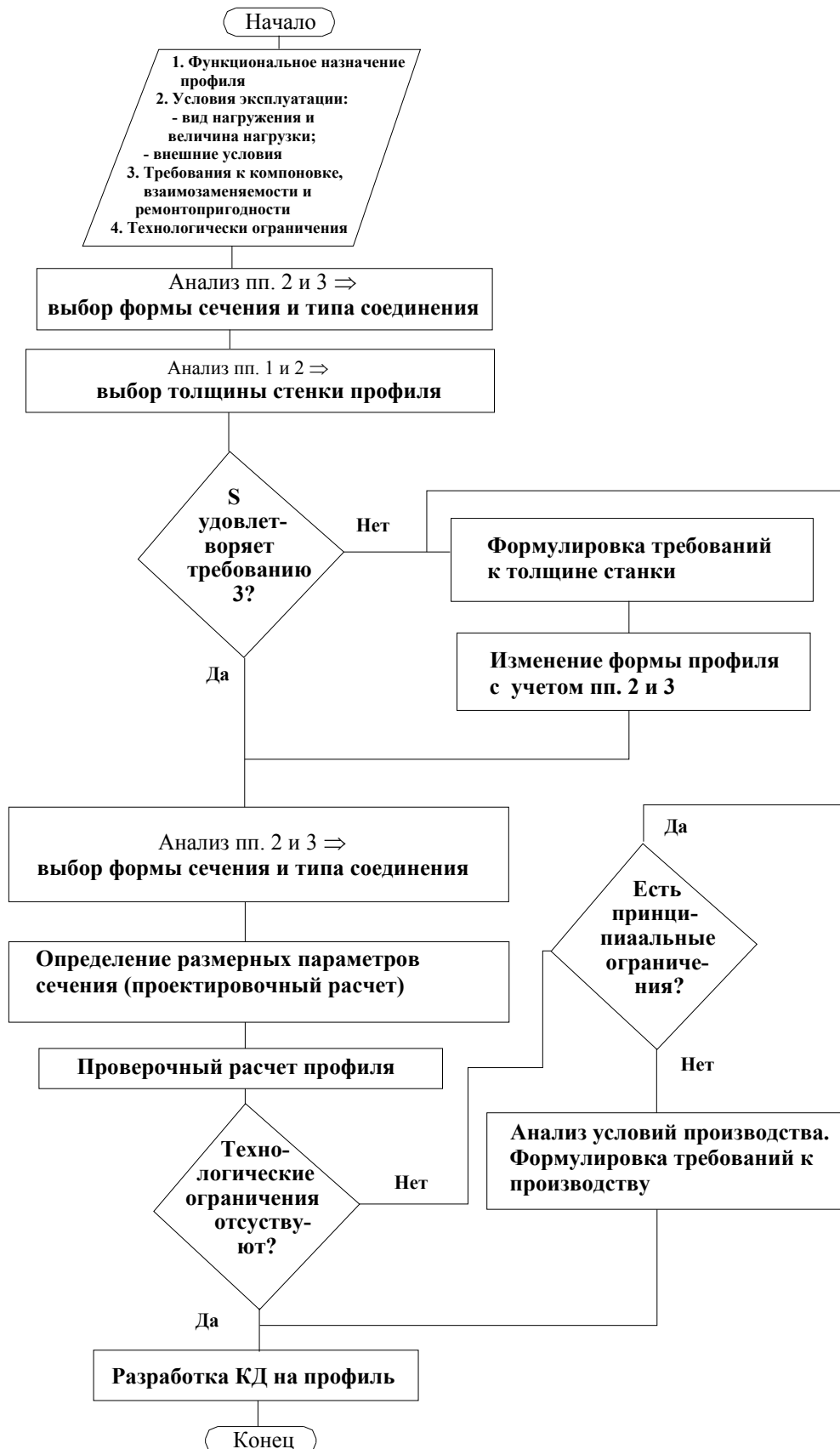


Рис. 2. Укрупненная блок-схема разработки конструкции гнутого профиля

На рис. 3 представлены конструкции, выполненные из гнутых профилей, изготовленных методом интенсивного деформирования [6].

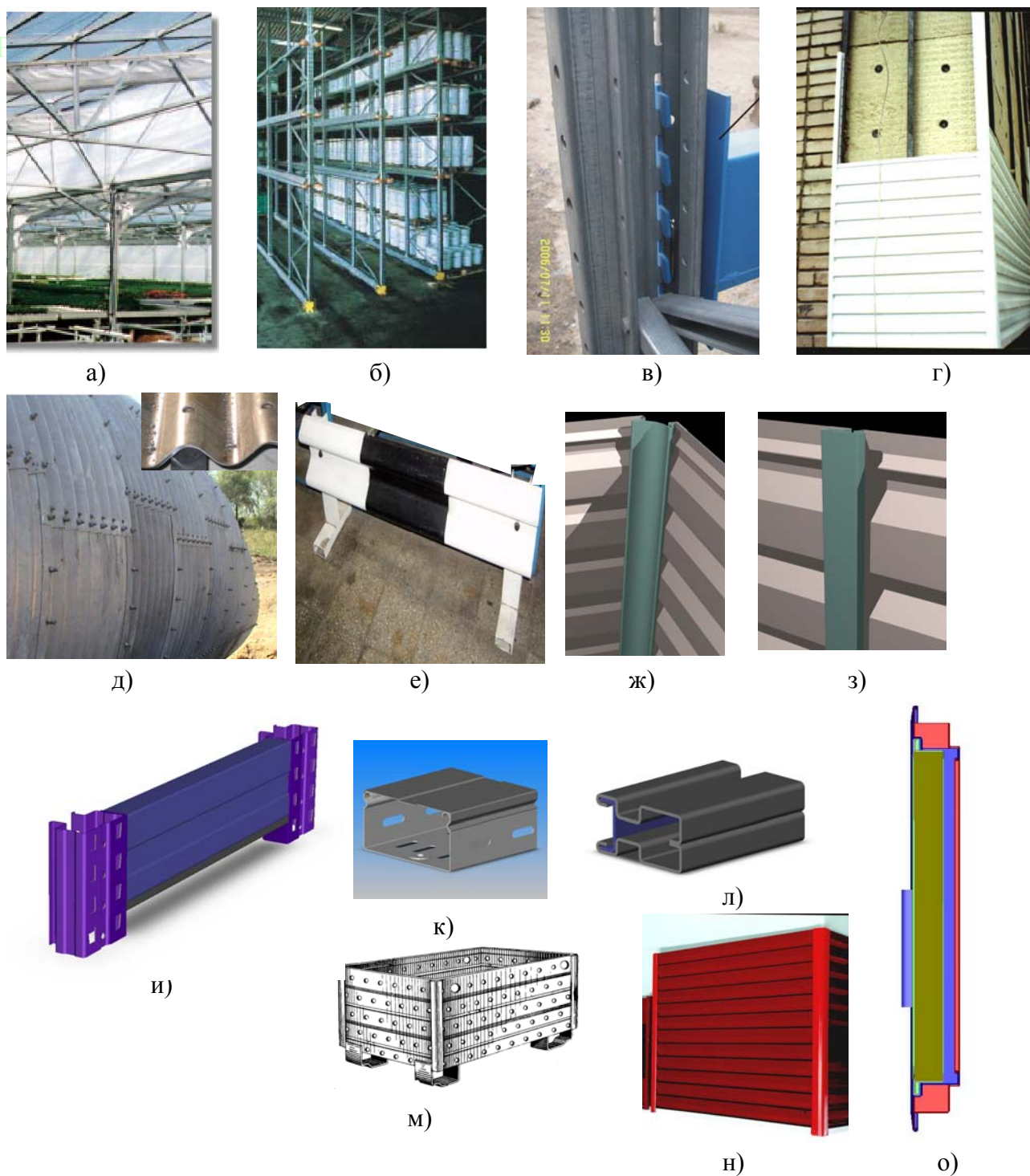


Рис. 3. Примеры конструкций из гнутых профилей, изготавливаемых методом интенсивного деформирования: а – каркасная теплица; б – сборно-разборный стеллаж; в – сборочный узел на основе профиля «стойка» в мансардном строительстве; г – конструкция облицовочных панелей зданий; д – трубы больших диаметров для водотоков; е – дорожное ограждение; ж – внутренний угол конструкции облицовки; з – срединный участок конструкции облицовки; и – конструкция стеллажных стоек; к – короб электропроводки для промышленных предприятий; л – строительный профиль в сборе; м – производственная тара; н – конструкция облицовки офисных помещений; о – конструкция бронированной двери на основе каркаса из гнутых профилей

В конструкциях гнутые профили соединяются друг с другом или же с другими деталями, образуя разъемное (болтовое, винтовое) или неразъемное соединение (заклепочное, сварное, клеевое). Среди неразъемных соединений различают наращивание (увеличение длины), переход (наращивание с целью изменения площади сечения в связи с изменением действующей нагрузки), усиление (присоединение дополнительных элементов жесткости), узел (соединение нескольких профильных элементов) [7 – 8].

В авиационной промышленности широко применяются заклепочные соединения, а в других отраслях промышленности – болтовые соединения (в основном для профилей с покрытием) и сварные соединения (для профилей без покрытия). В табл. 2 сведены примеры соединения гнутых профилей сваркой для иллюстрации выбора целесообразных конструкций.

При эксплуатации изделия в местах стыка (заделки) концевых участков профиля (торцевая заделка одного из профилей) обычно возникает концентрация напряжений от рабочей нагрузки, которая суммируется с концентрацией монтажных напряжений (схемы 1, 2 и 14 табл. 2). При статическом нагружении это не приводит к опасным явлениям, а при динамическом нагружении вызывает усталостное разрушение металла. Причиной концентрации напряжений является резкое изменение поперечного сечения детали. Кроме того, при жесткой заделке профиля, работающего на кручение, возможна локальная потеря устойчивости в форме депланации и излома периферийных элементов из-за «стесненного» кручения. Снижение концентрации напряжений может быть достигнуто за счет обеспечения податливости соединения или же выравнивания жесткости соединяемых элементов (схемы 3 и 4 табл. 2). Для устранения «стесненного» кручения заделка должна осуществляться по наиболее жестким элементам сечения профиля, а периферийные элементы должны быть свободными (схемы 4 – 7 табл. 2). Не рекомендуется использовать перемычки периферийных элементов, поскольку отсутствие депланаций приводит к той же схеме «стесненного» кручения, вызывающей концентрацию напряжений в местах заделки профиля. Лучший результат достигается применением пластинчатых перемычек боковых полок при их расположении с одного торца профиля на высоте 0,50...0,75 Н со смыканием с дном профиля при движении к другому торцу. Если рабочая нагрузка носит случайный характер (например, узлы сельскохозяйственных машин), то оптимизация конструкции достигается за счет податливости соединений, а систематические нагрузки, вызывающие концентрацию напряжений, уменьшают за счет подрессоривания (амортизации).

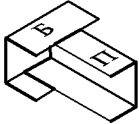
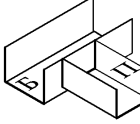
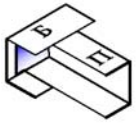
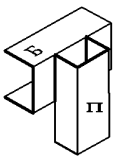
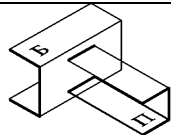
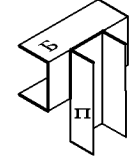
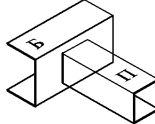
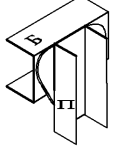
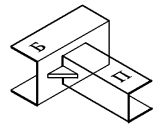
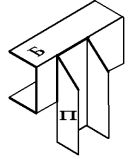
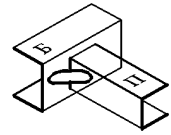
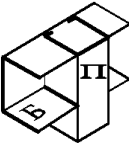
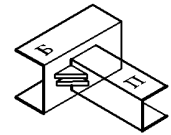
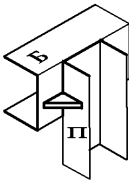
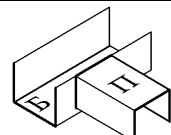
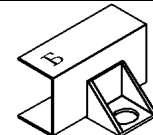
При перекрестном соединении профилей (схемы 10 и 11 табл. 2) условия работы профиля на изгиб и кручение при динамической нагрузке несколько улучшаются по сравнению с соединением в торец на уровне дна профиля. Свободные полки основного профиля (балки) смягчают условия жесткой заделки.

В некоторых случаях может потребоваться усиление соединения, что может достигаться за счет косынок, которые обычно крепят к наиболее жестким элементам сечения (схема 12 табл. 2). При использовании нескольких косынок, их не следует разносить на величину, превышающую одну треть высоты профиля (схема 7 табл. 2). При крутильной форме нагружения целесообразно ис-

пользовать замкнутый профиль, поскольку его жесткость на кручение более, чем в 50 раз превышает жесткость открытого профиля той же массы.

Таблица 2

Соединение двух профилей открытого сечения в узел

№ п/п	Описание соединения	Схема	№ п/п	Описание соединения	Схема
1.	Дно балки – торец профиля со сваркой по периметру контакта		9.	Полка балки – торец профиля (раскрыв – стенка)	
2.	Дно балки – торец профиля с усилением торца профиля пластиной		10.	Стенка балки – торцы полок профиля	
3.	Стенка балки – торец профиля со сваркой по периметру контакта		11.	Стенка балки – стенка профиля	
4.	Стенка балки – торец профиля со сваркой только по стенкам		12.	Стенка балки – стенка профиля через косынку	
5.	Стенка балки – торец профиля с усилением косынкой по стенкам		13.	Стенка балки – стенка профиля со срезом полок профиля на «ус»	
6.	Стенка балки – торец профиля с усилением трубчатым элементом по стенкам		14.	Соединение «врезанием» и сварка балки и профиля	
7.	Стенка балки – торец профиля с усилением косынками полок сваркой со стенками		15.	Стенка балки – стенка профиля с подкреплением полок профиля ребрами жесткости	
8.	Полка балки – торец профиля (раскрыв в раскрыв)		16.	Балка рамы автомобиля – башмак рессо-ры	

Снижению концентраций напряжений профиля, работающего на кручение, способствует также срез его концевых участков на «ус» (схема 13 табл. 2). Для профилей, работающих на изгиб, иногда целесообразно подкрепление их полок элементами жесткости (схема 15 табл. 2). Крепежные элементы, типа

башмаков рессор автомобиля, следует крепить к нижней стороне стенки балки (рамы) (схема 16 табл. 2).

В случае статических нагрузок при конструктивной необходимости возможно также соединение торца профиля с полкой балки (схемы 8 и 9 табл. 2). Однако с точки зрения работы узла они не принадлежат к числу оптимальных.

При использовании фитингов для сборки конструкции следует следить за тем, чтобы металл профиля и фитинга (или крепежного элемента) не образовывали анодные пары.

При разработке конструкций, подлежащих эксплуатации на открытом воздухе или в помещениях с повышенной влажностью, следует руководствоваться следующими рекомендациями: 1) открытую сторону профиля следует располагать снизу; 2) в необходимых случаях предусматривать выпуклости элементов или их наклон для отвода влаги; 3) в обоснованных случаях надлежит предусматривать отверстия для дренажа воды; 4) во избежание капиллярного просачивания швы соединений следует герметизировать (или окрашивать); 5) места концентрации напряжений подлежат усилению во избежание повышенной коррозии; 6) профили без покрытия или оцинкованные профили подлежат покраске; 7) торцы и кромки профилей с покрытием подлежат защите от коррозии окрашиванием.

Выводы:

1. При проектировании вновь создаваемых конструкций гнутых профилей надлежит учитывать функциональное назначение профиля, условия компоновки, взаимозаменяемости и ремонтпригодности, условия эксплуатации, а также технологические ограничения производства гнутых профилей.

2. При создании узлов, включающих гнутые профили, следует учитывать внешние факторы эксплуатации таких узлов, минимизируя концентрации напряжений от рабочих нагрузок выбором рациональной конструкции и предусматривая их антикоррозийную защиту.

Библиографический список

1. Технологичность конструкции изделия : справочник / под ред. Ю. Д. Амирова. – М. : Машиностроение, 1990. – 768 с.
2. Филимонов, С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 246 с.
3. Писаренко, Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев : Наукова думка, 1988. – 736 с.
4. Гиммельфарб, А. Л. Основы конструирования в самолетостроении / А. Л. Гиммельфарб. – М. : Машиностроение, 1980. – 367 с.
5. Илюшкин, М. В. Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах / М. В. Илюшкин, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2006. – 200 с.
6. Филимонов, С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2008. – 444 с.

7. Давыдов, В. И. Изделия из тонкостенных профилей / В. И. Давыдов. – М. : Машиностроение, 1957. – 186 с.

8. Тришевский, И. С. Производство деталей из гнутых профилей / И. С. Тришевский, В. С. Марьин, В. А. Хмель. – Киев : Техника, 1985. – 128 с.



- **Лапин Вячеслав Викторович**, генеральный директор ОАО «Ульяновский механический завод»
- **Филимонов Андрей Вячеславович**, канд. техн. наук, главный технолог ООО «Нижегородский промышленный альянс»

УДК 621.981

КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ПОЛУЗАКРЫТЫХ И ЗАКРЫТЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

канд. техн. наук Филимонов А. В., Лисин И. О.

Тенденция развития рынка профильной продукции в последние годы приобретает уклон в сторону расширения номенклатуры многоэлементных профилей полузакрытого типа. Между тем, до настоящего времени отсутствовали публикации, посвященные классификации и систематизации профилей и технологических приемов их производства. Хотя некоторые виды профилей полузакрытого и закрытого типа могут изготавливаться известными методами листовой штамповки (гибка в кромкогибочных устройствах, штампах), наиболее целесообразным все же является использование для этих целей метода интенсивного деформирования в роликах [1], позволяющего минимизировать производственные издержки производства и обеспечить высокое качество производимых профилей.

Цель работы заключается в создании классификатора профилей полузакрытого типа с учетом особенностей их производства методом интенсивного деформирования на специализированных профилировочных станках.

Уточним первоначально понятие «полузакрытый профиль». В принципе, это понятие могло бы быть сформулировано в терминах геометрических характеристик профиля, например, по признаку расположения точек концевых элементов в окаймляющем многоугольнике сечения профиля или по признаку принадлежности проекций этих точек базовому элементу (основанию) при вертикальном проецировании (рис. 1). Однако такие определения не отличаются однозначностью. Например, окаймляющих многоугольников можно построить бесконечное множество для каждой конфигурации (сравните схемы а, б и в на рис. 1), если не накладывать определенных ограничений. Проецирование концевых точек заготовки на базовый элемент также вызывает некоторое неудовлетворение. Например, на рис. 1, б проекции концевых точек располагаются по отношению к базовому элементу по-разному: одна ему принадлежит, а другая – нет. Откуда, казалось бы, правосторонний и левосторонний элементы должны

были бы и именоваться по-разному. Однако с технологической точки зрения тот и другой формируются по закрытой схеме (за вычетом срединного участка). Следовательно, для принятия какой-либо из рассмотренных возможностей в качестве определения необходимо вводить дополнительные ограничения и оговорки. Представляется более естественным ввести определение полузакрытого профиля, исходя из схемы его формовки в парах роликов с горизонтальными осями при горизонтальном расположении базового элемента (элемента, подверженного наименьшей деформации): профиль называют *полузакрытым*, если при его изготовлении в роликах к некоторым формируемым элементам отсутствует двусторонний доступ инструмента (формовка по закрытой схеме, т. е. квазиконсольно, см. рис. 1, г) хотя бы на одном из технологических переходов, а часть заготовки формируется по открытой схеме с двусторонним доступом инструмента.

Очевидно, *закрытым* будет называться профиль, формовка которого хотя бы на одном переходе осуществляется только в условиях одностороннего доступа инструмента к поверхности заготовки.

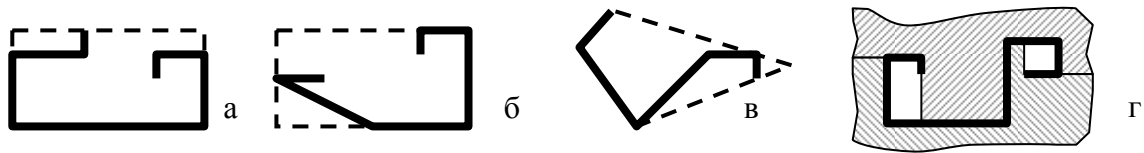


Рис. 1. К понятию «полузакрытого профиля»

Классификация профилей полузакрытого типа осуществляется по следующим первичным параметрам: 1) наличие/отсутствие симметрии сечения профиля относительно вертикальной плоскости; 2) наличие/отсутствие элементов жесткости; 3) толщина профиля; 4) наличие/отсутствие перфорации; 5) пластичность материала; 6) наличие/отсутствие покрытия. Существует и ряд вторичных параметров классификации (рис. 2), которые учитывают особенности формообразования второго плана.

В классификаторе первые три первичных параметра в целом отражают геометрические соотношения сечения профиля, а последние три первичных параметра можно было бы условно отнести к характеристикам технологического плана. Дело заключается в том, что профили, имеющие совершенно идентичные характеристики по первым трем параметрам классификации, но отличающиеся по характеристикам оставшихся параметров классификации могут потребовать различных технологических приемов для их изготовления (отличающихся друг от друга схем и режимов формообразования). Следовательно, разработанный классификатор относится к категории конструктивно-технологических классификаторов.

При рассмотрении симметрии сечения (блоки 1.1 и 1.2) учитывались особенности реализации процесса формовки профиля, связанные как с одинаковыми условиями формообразования периферийных элементов, так и с возможностью унификации конструктивных элементов технологического оснащения, например, замыкающих элементов калибра [2]. Выделенные параметры классификации, относящиеся к высоте различных участков профиля (преимущественно

но правой и левой сторон), имеют существенное влияние на процесс формообразования, в частности, на возникновение скрутки и потери устойчивости элементов профиля. Кроме того, требуются различные технологические приемы для достижения одних и тех же характеристик точности по элементам, различающимся геометрическими характеристиками.

Наличие элементов жесткости (блоки 2.1 и 2.2), тип элемента, его размер, топология оказывают серьезное влияние на проектные процедуры технологии и в целом на процесс формообразования [3]. В данном классификаторе представлены лишь типы элементов жесткости без их дальнейшей спецификации, которая с достаточной подробностью изложена в той же работе [3].

Классификация профилей по толщине стенки (блоки 3.1 – 3.3) представлена качественными характеристиками, однако следует уточнить, что под «умеренной толщиной» авторы подразумевают диапазон толщин от 1,5 до 3,0 мм, под «тонкостенным» профилем – профиль с толщиной стенки от 0,6 до 1,5 мм, под «особо тонкостенным» – профиль с толщиной стенки до 0,6 мм. Такое разделение обусловлено рядом явлений технологического плана, возникающих при работе с материалами различной толщины. Например, весьма зависимы от толщины материала такие явления, как потеря устойчивости элементов, нарушение покрытия, деформация отверстий в перфорированных профилях, пружинение элементов. В чисто технологическом аспекте толщина сказывается и на применении дополнительных технологических средств, в частности, межклетьевых проводок и различного вида оправок.

Параметр наличия или отсутствия перфорации (блоки 4.1 и 4.2) является до известной степени смешанным: с одной стороны, перфорация выступает как бы принадлежностью конструктивной стороны вопроса, а с другой стороны, она тесно связана с технологией изготовления профиля. Во-первых, профиль с перфорацией может быть изготовлен из предварительно перфорированной заготовки, из цельной заготовки с ее перфорацией в роликах по ходу процесса формообразования сечения профиля, или же из цельной заготовки, но с перфорацией после формовки в роликах. Во-вторых, наличие отверстий в заготовке заставляет технолога существенно пересматривать схемы формообразования профилей идентичного сечения, производимых из цельных заготовок. В классификаторе отражены только случаи использования цельной и предварительно перфорированной заготовки (с учетом влияния перфорации на процесс формообразования) как наиболее типичные для сложившихся типовых проектных процедур при реализации метода интенсивного деформирования гнутых профилей в роликах.

Пластические свойства материала учтены в классификаторе блоками 5.1 – 5.3. Обоснованность включения данного показателя в классификатор практически очевидна, однако на практике реальная потребность в учете свойств пластичности материала при профилировании возникает не часто. Дело в том, что в последние годы для целей профилирования в 95 – 97% случаев применяют мягкие стали с различного вида покрытиями или без покрытий. Безусловно, имеются существенные различия в реализации технологии производства профилей из низкоуглеродистой стали и титановых или высокопрочных алюминиевых сплавов.

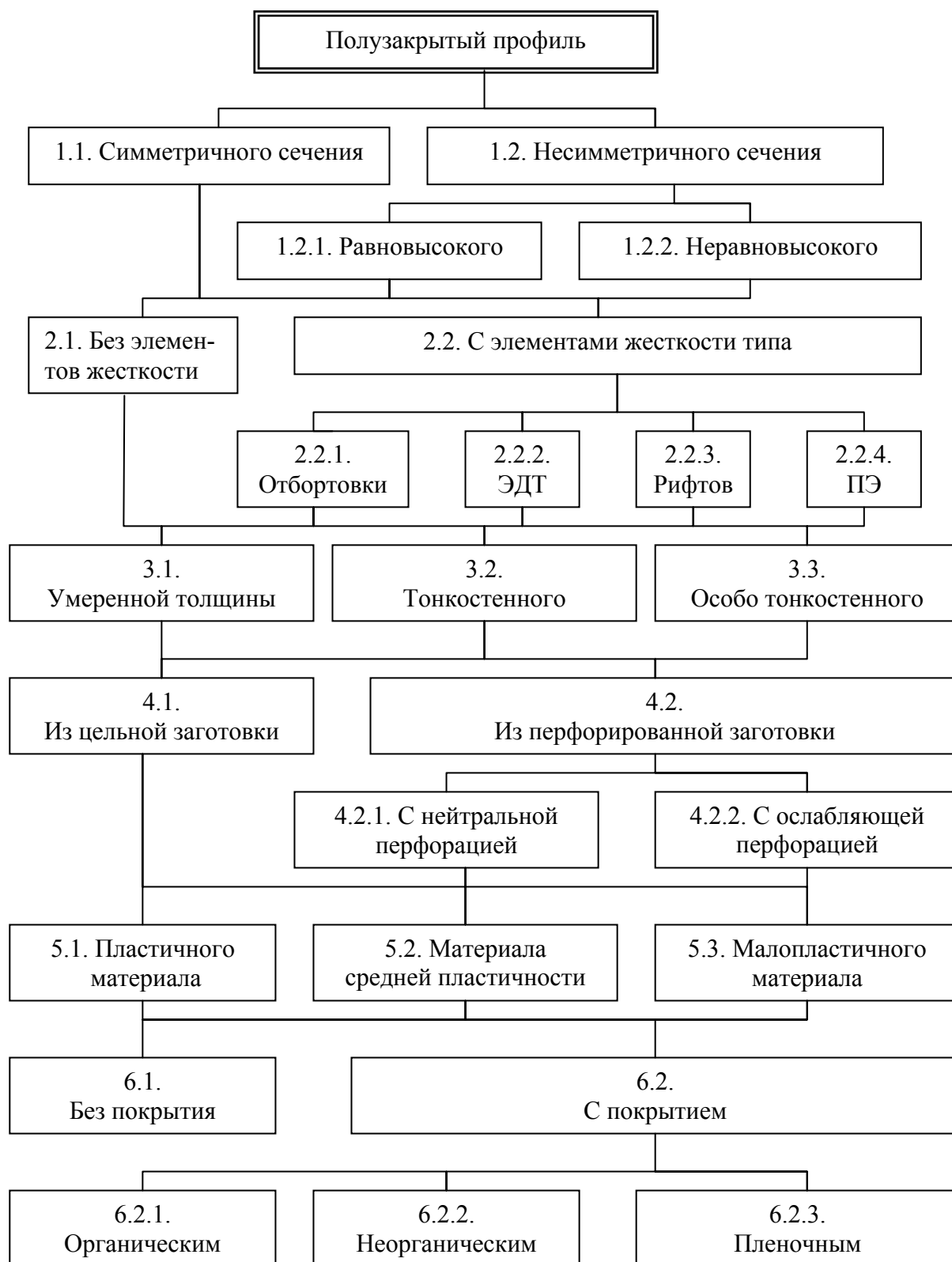


Рис. 2. Классификатор полузакрытых профилей

Наличие покрытия (блоки 6.1 и 6.2) на исходных заготовках часто приводит к требованию увеличения числа технологических переходов, особенно в случае заготовок умеренной толщины. Иногда для обеспечения сохранности

покрытия приходится применять специальные проводки (например, торцевые проводки с полиуретановым покрытием, вводимые в разъем роликового калибра).

Классификатор разработан на основе внедрения нескольких десятков типоразмеров полузакрытых профилей в ООО «Спецтехнология» (г. Ульяновск). Принятые в рассмотрение параметры классификатора могут оказаться весьма полезными для разработчиков новых конструкций гнутых профилей, а также разработанный классификатор может использоваться технологами и конструкторами предприятий-разработчиков при решении следующих вопросов: 1) оценка технологичности изготовления профиля; 2) типизация технологических приемов и проектных процедур при разработке технологии; 3) создание автоматизированной системы технологической подготовки производства, в частности, проектирования технологического оснащения для изготовления гнутых профилей в роликах на профилировочных машинах.

Таким образом, разработанный классификатор включает конструктивные и технологические спецификаторы, что позволяет системно решать вопросы создания новых конструкций профилей с учетом технологии их производства. Он может быть использован для оценки технологичности и типизации проектных процедур процессов профилирования.

Библиографический список

1. Филимонов, С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 246 с.

2. Филимонов, В. И. Условия замыкания калибров при интенсивном формообразовании открытых профилей в роликах / В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Производство проката. – 2004. – №11. – С. 23-29.

3. Колганов, И. М. Классификация типовых элементов жесткости гнутых профилей и особенности их формообразования / И. М. Колганов, В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов // Авиационная промышленность. – 2001. – №3. – С. 21-25.



- **Филимонов Андрей Вячеславович**, канд. техн. наук, главный технолог ООО «Нижегородский промышленный альянс»
- **Лисин Игорь Олегович**, аспирант кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

УДК 621.981

КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ЗАКРЫТОГО ТИПА, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Лисин И. О.

Среди новых видов металлических профилей, позволяющих успешно экономить металл, повышать надежность и прочность конструкций, особое ме-

сто занимают гнутые замкнутые профили. Широкая область применения гнутых профилей этого типа в строительстве, сельскохозяйственном машиностроении, автомобильной промышленности и др. обусловлена в основном возможностью получения высокопроизводительным способом профилей практически любой конфигурации в поперечном сечении (рис. 1), различных размеров по ширине, толщине и длине с высоким качеством поверхности профиля. В связи с расширением номенклатуры закрытых профилей встает вопрос об их классификации и систематизации.

Переходя к вопросу классификации профилей данного типа, остановимся на понятии «закрытый профиль». *Закрытым* будем называть профиль, при изготовлении которого в горизонтальных парах роликов к некоторым формуемым элементам отсутствует двусторонний доступ инструмента хотя бы на одном из технологических переходов.

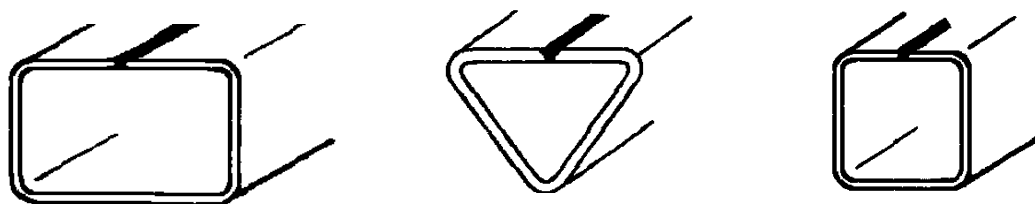


Рис. 1. Пример конфигурации поперечного сечения закрытого профиля

Классификация профилей закрытого типа осуществляется по следующим основным параметрам: 1) вид исходной заготовки; 2) тип поперечного сечения профиля относительно вертикальной плоскости; 3) используемый материал; 4) толщина профиля; 5) наличие/отсутствие элементов жесткости. Стоит отметить, что кроме основных параметров существует еще ряд вторичных параметров классификации, которые учитывают особенности формообразования профиля. Все вышеуказанные параметры отражены в классификаторе закрытых профилей (рис. 2).

Данный классификатор относится к категории конструктивно-технологических, так как в нем отражены параметры, которые можно условно отнести к характеристикам технологического плана (первые два параметра), а также параметры, отражающие геометрические соотношения сечения профиля (последние три параметра). Суть дела заключается в том, что профили, имеющие совершенно идентичные характеристики по последним трем параметрам классификации, но отличающиеся по характеристикам первых двух, могут потребовать различных технологических приемов для их изготовления, отличающихся друг от друга схемами и режимами формообразования.

Классификация закрытых профилей по виду исходной заготовки (блоки 1.1 и 1.2) обусловлена, в первую очередь, различными способами производства профилей данного типа, а также используемым оборудованием при реализации этих способов. Известны способы производства гнутых профилей из полосового металла путем холодной формовки (гибки) между валками.

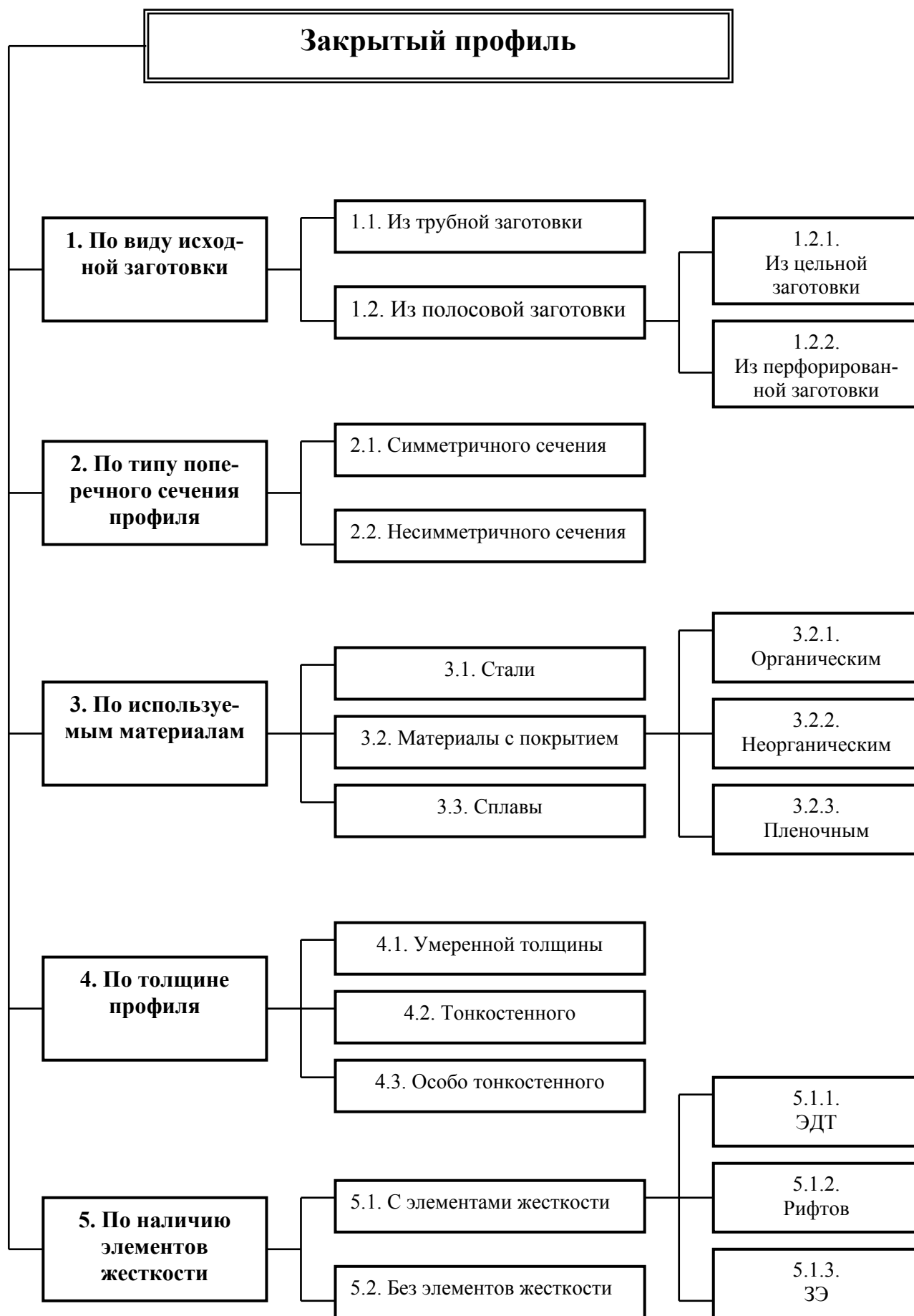


Рис. 2. Классификатор закрытых профилей

Постепенную гибку полосы в требуемый профиль осуществляют несколькими последовательно расположенными парами валков (роликов), при этом число пар валков зависит от сложности профиля и выбранной технологии профилирования. Между соседними горизонтальными парами валков устанавливают неприводные вертикальные ролики, служащие для удержания формируемой полосы в строго определенном положении или для дополнительной подгибки полосы, что особенно необходимо при производстве замкнутых профилей (Рис.3а). Способ формовки замкнутого профиля, включающий формообразование дугообразных элементов круглой трубной заготовки осадкой в плоские грани валками, образующими калибры, отличающийся тем, что образуют плоские грани, сопряженные закруглениями заданного радиуса, осадку осуществляют на заданную величину (рис. 3, б).

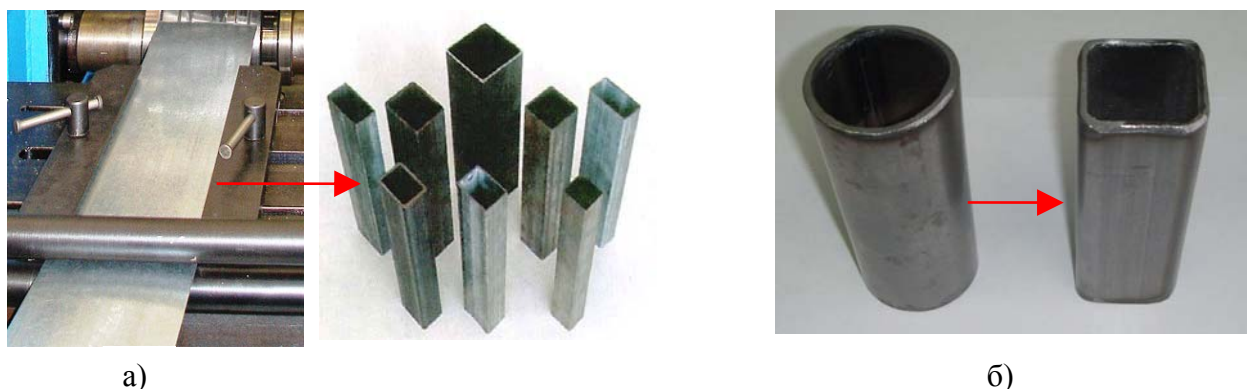


Рис. 3. Примеры закрытых профилей:
а) из полосовой заготовки; б) из трубной заготовки

В свою очередь, наличие перфорации (блоки 1.2.1 и 1.2.2) является, с одной стороны, как бы конструктивным признаком, а с другой стороны, она тесно связана с технологией изготовления профиля. Профиль с перфорацией может быть изготовлен из предварительно перфорированной заготовки, из цельной заготовки с ее перфорацией в роликах по ходу процесса формообразования сечения профиля, или же из цельной заготовки с последующей перфорацией после формовки в роликах. Наличие ослабляющих отверстий в заготовке требует иной схемы формообразования по сравнению со схемой формообразования профиля идентичного сечения, производимого из цельной заготовки. В классификаторе отражены только случаи использования цельной и предварительно перфорированной заготовки.

Классифицируя закрытые профили по типу поперечного сечения (блоки 2.1 и 2.2), внимание акцентировалось на особенностях реализации процесса формообразования профиля, связанных как с одинаковыми условиями формообразования периферийных элементов, так и с возможностью унификации конструктивных элементов технологического оснащения (например, замыкающих элементов калибра). На рис. 4 отражены примеры поперечного сечения закрытых профилей симметричного и несимметричного типа.

Выделенные параметры классификации, относящиеся к высоте различных участков профиля, оказывают влияние на возникновение различного рода дефектов (скрутки и потери устойчивости элементов профиля). Кроме того,

требуются различные технологические приемы для достижения одних и тех же характеристик точности по элементам, различающимся геометрическими характеристиками.

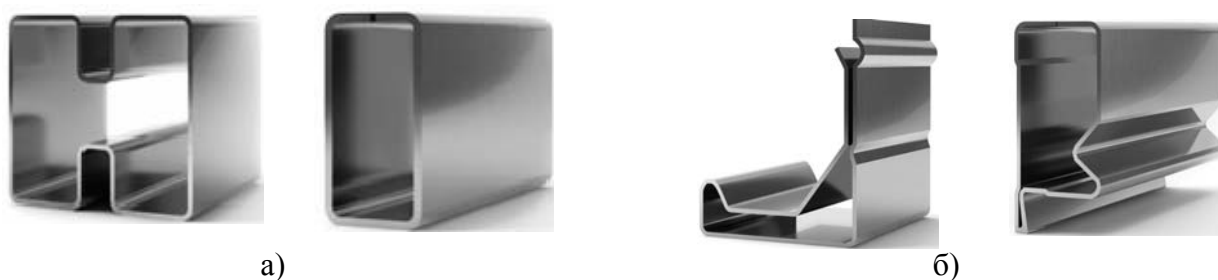


Рис. 4. Закрытые профили: а) симметричного сечения; б) несимметричного сечения

Характеристики исходного материала существенно влияют на технологию производства закрытых профилей (блоки 3.1 – 3.3). В связи с чем их можно разделить на различные стали (в том числе нержавеющей, жаропрочные), сплавы (Д16, АМг-6, В95, ОТ4-1, АБМ1 и др.) и материалы с покрытием (органическим, неорганическим, пленочным) [1]. Стоит отметить, что при изготовлении профилей из материала с покрытием (блоки 3.2.1 – 3.2.3) добавляются дополнительные требования:

- минимально допустимые внутренние радиуса гибки профиля, в зависимости от применяемого покрытия заготовки, должны находиться в пределах (0,6 – 2,0) мм и подлежат определению при исследовании покрытия;
- минимально допустимую величину отбортовок (малых полок) следует выбирать в зависимости от вида покрытия;
- толщину заготовки следует выбирать из ряда предпочтительных толщин [1].

Также наличие покрытия на исходных заготовках часто приводит к требованию увеличения числа технологических переходов, особенно для заготовок умеренной толщины. Иногда для обеспечения сохранности покрытия приходится применять специальные проводки (например, торцевые проводки с полиуретановым покрытием, вводимые в разъем роликового калибра) [2].

Классификация профилей по толщине стенки (блоки 4.1 – 4.3) подразумевает, что «умеренная толщина» соответствует толщине от 1,5 до 3,0 мм, «тонкостенный» профиль – профиль с толщиной стенки от 0,6 до 1,5 мм, «особо тонкостенный» профиль – профиль с толщиной стенки до 0,6 мм. Такое разделение обусловлено рядом явлений технологического плана, возникающих при работе с материалами различной толщины. Например, весьма зависимы от толщины материала такие явления, как потеря устойчивости элементов, нарушение покрытия, деформация отверстий в перфорированных профилях, пружинение элементов. В чисто технологическом аспекте толщина сказывается и на применении межклетьевых проводок и различного вида оправок [3].

Классификация замкнутых профилей по такому показателю как «наличие элементов жесткости» (блоки 5.1 и 5.2) основано на том, что тип элемента жесткости, его размер, топология оказывают серьезное влияние на процесс фор-

мообразования профиля [4]. В классификаторе учтены основные виды элементов жесткости (блоки 5.1.1 – 5.1.3), характерные для профилей данного типа (пример на рис. 5).

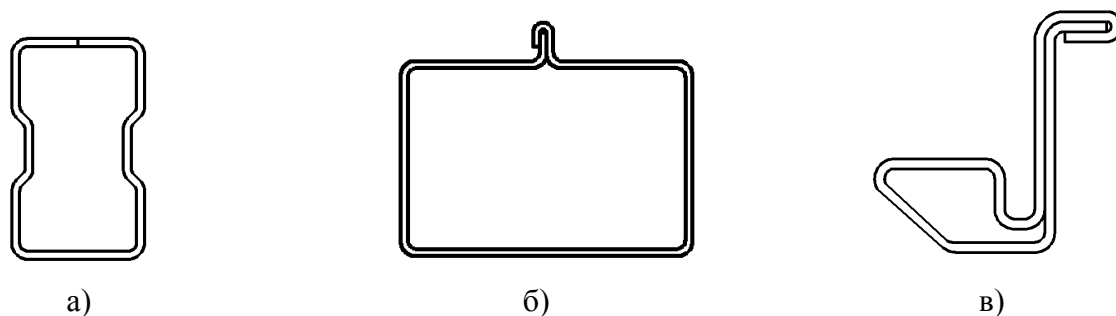


Рис. 5. Примеры закрытых профилей с элементами жесткости:
а) с рифтами; б) с замковым элементом; в) с элементом двойной толщины

Представленный классификатор, сформированный по конструктивно-технологическим признакам, позволяет выявить особенности формообразования закрытых профилей и может быть использован в методике разработки технологии с целью учета общей конфигурации профиля.

Библиографический список

1. Илюшкин, М. В. Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах / М. В. Илюшкин, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – 200 с.
2. Филимонов, С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2008. – 444 с.
3. Филимонов, А. В. Совершенствование технологии производства полузакрытых профилей в роликах методом интенсивного деформирования / А. В. Филимонов: Дис. канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2009. – 186 с.
4. Колганов, И. М. Классификация типовых элементов жесткости гнутых профилей, особенности их формообразования / И. М. Колганов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 2001. – №3. – С. 21-25.



- **Лисин Игорь Олегович**, аспирант кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, ВНЕДРЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.981

ЛИНИИ ПРОИЗВОДСТВА ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

канд. техн. наук Филимонов С. В., Лапшин В. И.

В последние годы производство гнутых профилей имеет тенденцию к все более широкому применению метода интенсивного деформирования (МИД) в роликах, который имеет определенные преимущества перед традиционным профилированием и методом стесненного изгиба [1]. В частности, по отношению к традиционному профилированию число переходов сокращается примерно в два раза [2].

Ежегодно разработчиками МИД на отечественный рынок поставляется более 20 автоматизированных линий, на которых производится порядка 150 типоразмеров вновь осваиваемых профилей, в том числе около 30 типоразмеров эксклюзивных конфигураций. Основными потребителями гнутых профилей являются предприятия строительной индустрии, транспортного и дорожного строительства, машиностроения.

Широкая номенклатура производимых и вновь разрабатываемых конструкций гнутых профилей вызывают необходимость разработки целесообразной гаммы профилировочного оборудования, призванного удовлетворить запросы заказчика в технологическом аспекте (технологические возможности, эксплуатационная надежность и другие) при обеспечении оптимума капитальных и эксплуатационных издержек.

Цель настоящей статьи: рассмотрение особенностей разработки и использования линий производства гнутых профилей на промышленных предприятиях. Типовой состав линии производства гнутых профилей включает разматывающее устройство, профилировочный станок, отрезное устройство. Расширение технологических возможностей линий достигается включением в их состав перфорирующих устройств или прессов с подвижными штампами. Состав различных типов автоматизированных линий приведен в табл. 1.

Основным формующим агрегатом линии является профилирующий / профилегибочный станок/стан, параметры которого определяются преимущественно его назначением. Профилировочные станки/станы разработки ООО «НПО «ИДМ» (изготовитель – ООО «Спецтехнология») имеют одну рабочую зону, цельную или модульную конструкцию с приводом формующих клеток с помощью зубчатой передачи или через карданные валы. Клетки выполнены съемными или в виде кассетного блока; валы монтируются консольно и замыкаются откидными «плавающими опорами». Станки/станы снабжены направляющими и правильными устройствами различных типов. Правильные устройства имеют возможность регулировки в продольном направлении (мон-

тажная регулировка вдоль оси профилирования), по вертикали, горизонтали и вращением правильного блока вокруг оси профилирования с незначительными отклонениями в случае производства эксклюзивных профилей. Вообще, существует более двадцати параметров классификации профилировочных станков/станов, хотя в данной статье используются лишь параметры типа станка по назначению (определяется толщиной материала заготовки) и степени его универсальности. Эти же параметры применяются и для классификации линий.

Таблица 1

Состав автоматизированных линий разработки ООО «ИДМ»

Перечень агрегатов, входящих в состав автоматизированных линий	Условное обозначение и состав линии					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6
Рулонница разматывающая	+	+	+	+	+	+
Отгибатель кромок						+
Листоправильная машина					+	+
Ножницы гильотинные						+
Пост сварки						+
Пресс с подвижным штампом пробивки					+	+
Перфорирующее устройство (пневмат.)						
Синхронизатор шага перфорации					+	
Профилировочный станок / стан	+	+	+	+	+	
Пресс с отрезным летучим штампом						+
Пила отрезная с синхронизатором					+	
Отрезное устройство (пневматическое)	+	+	+	+		
Стол приемный (с накопителем/сбрасывателем)	+	+	+	+	+	+
Электронная система управления	+	+	+	+	+	+
№1 – Узкоспециализированная (не переналаживаемая) линия «легкого» типа (толщина заготовки до 1,0 мм) – рис. 1; №2 – Номенклатурно-ориентированная линия «легкого» типа с кассетной сменой инструмента (толщина заготовки до 1,0 мм); №3 – Универсальная линия «легкого» типа (толщина заготовки до 1,5 мм) – рис. 2; №4 – Универсальная линия «среднего» типа (толщина заготовки до 2,5 мм) – рис. 3; №5 – Универсальная линия «среднего» типа с расширенными технологическими возможностями (толщина заготовки до 2,5 мм) – рис. 4; №6 – Номенклатурно-ориентированная линия «тяжелого» типа с расширенными технологическими возможностями (толщина заготовки до 5,0 мм) – рис. 5.						

При проектировании профилировочных станков существенное значение имеет определение числа формирующих клеток, межклетьевого расстояния и мощности привода. Указанные параметры определяются на основе анализа номенклатуры профилей, подлежащих изготовлению на данном оборудовании. Для определения числа клеток используют полуэмпирическую модель числа переходов наиболее сложного профиля, приведенного с использованием метода «локальных жесткостей» к профилю типовой номенклатуры [1]. Затем выполняют расчет числа переходов с прогонкой по толщинам заготовок из предполагаемого номенклатурного ряда. Максимальное значение числа переходов объявляется искомым. При производстве гнутых профилей из материалов с покрытием следует учитывать поправку на ослабление режима деформирования увеличением числа клеток на одну-две, если технологические меры оказываются мало эффективными [3].

Межклетьеовое расстояние подсчитывают на основе модели определения протяженности зоны плавного перехода при интенсивном деформировании [1, 4] для наиболее сложного профиля и для профиля с максимальными габаритными размерами (точнее, подгибаемыми полками). Из двух расчетных значений выбирается максимальное и после округления в сторону увеличения до ближайшего предпочтительного значения размерного ряда объявляется искомым. Задание корректного значения межклетьеового расстояния гарантирует при правильном проектировании технологии отсутствие потери устойчивости элементов профиля и переформовки заготовки.

Расчеты мощности привода станков можно производить с использованием результатов работ [2, 4, 5]. При этом расчет диаметров валов производят исходя из распирающей и тянущей силы при профилировании. Другие параметры агрегатов назначаются или рассчитываются исходя из соображений технологической или конструктивной целесообразности.

Рассмотрим характеристики и функционирование только одной из универсальных линий «среднего типа» (№ 4, см. табл. 1), поскольку построение и работа других линий до известной степени аналогичны. Для обеспечения надлежащего качества производимых на линии профилей к заготовкам – горяче- и холоднокатаным лентам мерной длины с обрезными кромками – предъявляются следующие требования: точность размера ленты по ширине – 0,2 мм; разнотолщинность ленты по ширине – не более 0,05 мм; серповидность заготовки – не более 1 мм на 1 м длины ленты; временное сопротивление разрыву материала заготовки – не более 390 МПа.

Автоматизированная линия включает следующие компоненты: 1) рулонницу Р-400х3,0; 2) стан профилегибочный универсальный СПУ-400К8х65; 3) устройство пневматическое для отрезки профиля; 4) стол-сбрасыватель; 5) систему управления. Основное и вспомогательное оборудование линий представлены на рис. 6.

Рулонница Р-400х3,0 предназначена для удержания, разматывания и подачи рулонного материала в стан профилегибочный. Она состоит из станины, в верхней части которой закреплен рабочий вал с колодочным тормозом. На валу расположены опоры и ограничители. Регулировка ограничителей под рабочую ширину рулона и посадочного диаметра под рулон производится регулировочными винтами. Ниже приведены характеристики рулонницы.

Высота оси рулона над полом, мм.....	1200
Минимальный посадочный диаметр барабана, мм.....	480
Максимальный посадочный диаметр барабана, мм	620
Максимальный диаметр рулона, мм.....	1200
Максимальная ширина рулона, мм.....	400
Максимальная масса рулона, кг.....	3000
Габаритные размеры рулонницы:	
длина, мм.....	2080
ширина, мм.....	1400
высота, мм	1700
масса, кг.....	1480.

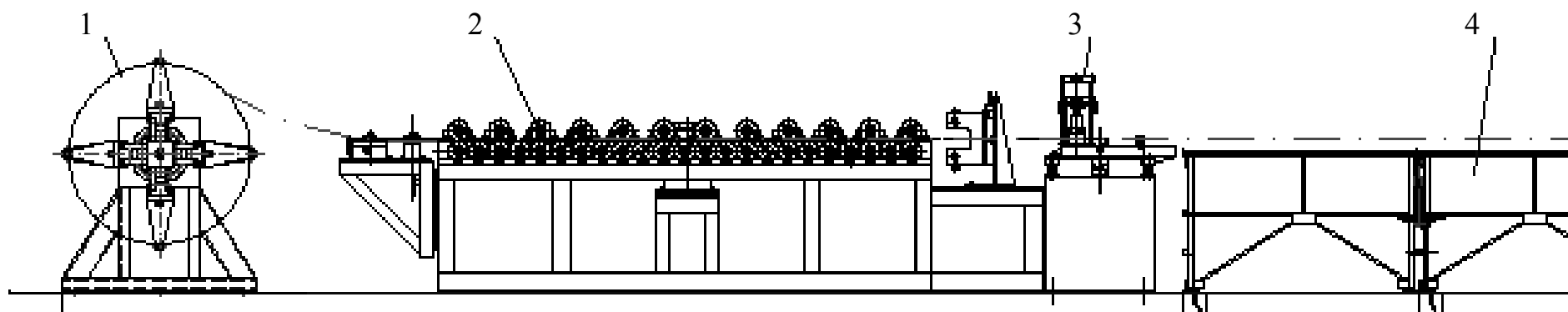


Рис. 1. Узкоспециализированная линия «легкого» типа

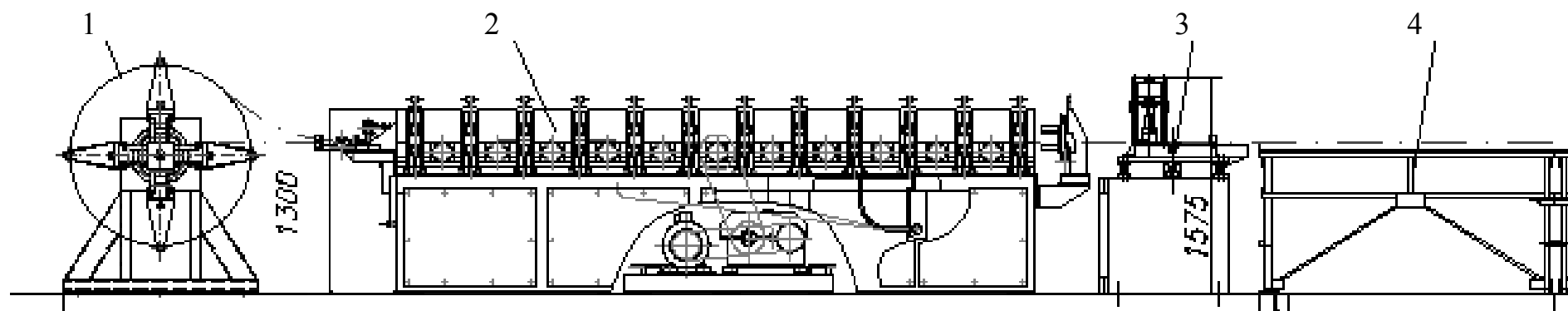


Рис. 2. Универсальная линия «легкого» типа

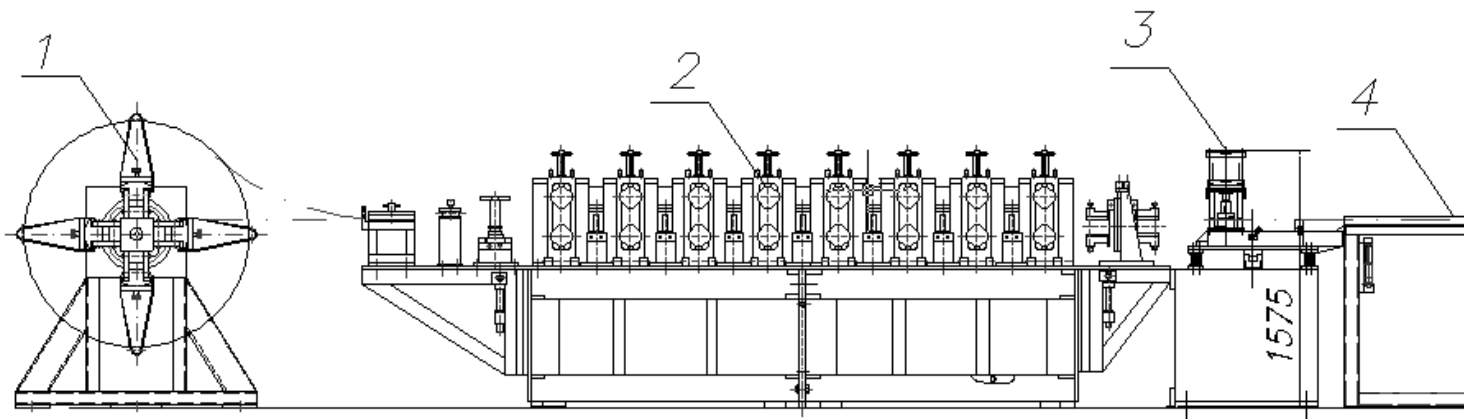


Рис. 3. Универсальная линия «среднего» типа

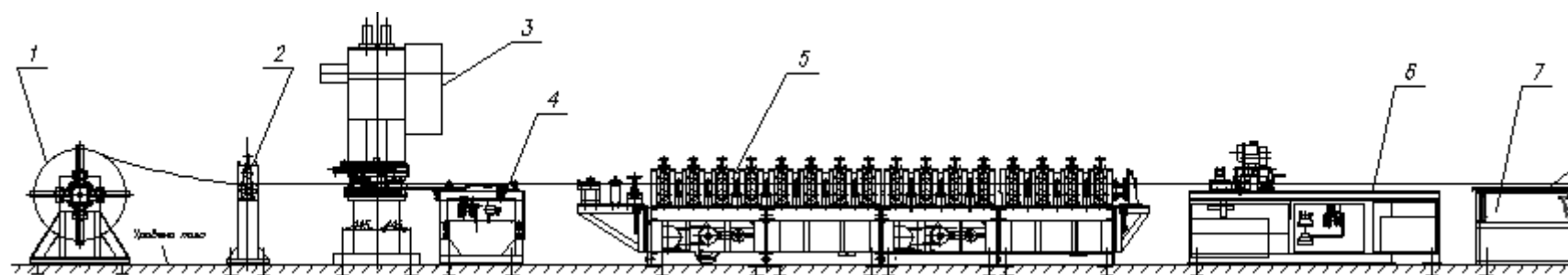


Рис. 4. Универсальная линия «среднего» типа с расширенными технологическими возможностями

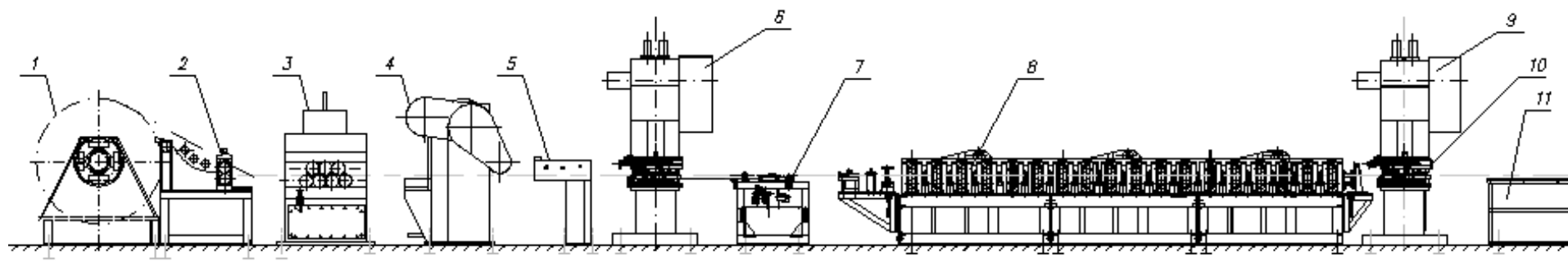


Рис. 5. Номенклатурно-ориентированная линия «тяжелого» типа с расширенными технологическими возможностями



Рис. 6. Агрегаты автоматизированных линий: а – профилегибочный стан; б – пневматическое устройство для отрезки и перфорации профилей; в – синхронизатор шага перфорации; г – летучая пила для отрезки профиля

Универсальный профилегибочный стан [6] СПУ-400K8x65 предназначен для изготовления методом интенсивного деформирования в роликах мелко-сортного гнутого профиля и состоит из двух секций с четырьмя профилирующими клетями каждая, направляющего устройства, правильного устройства и системы управления.

Основными узлами стана являются профилирующие клетки. Клеть (рис. 7, а) представляет собой основание 1, в котором установлены стойки 2 с перемещающимися по ним ползунами 3.

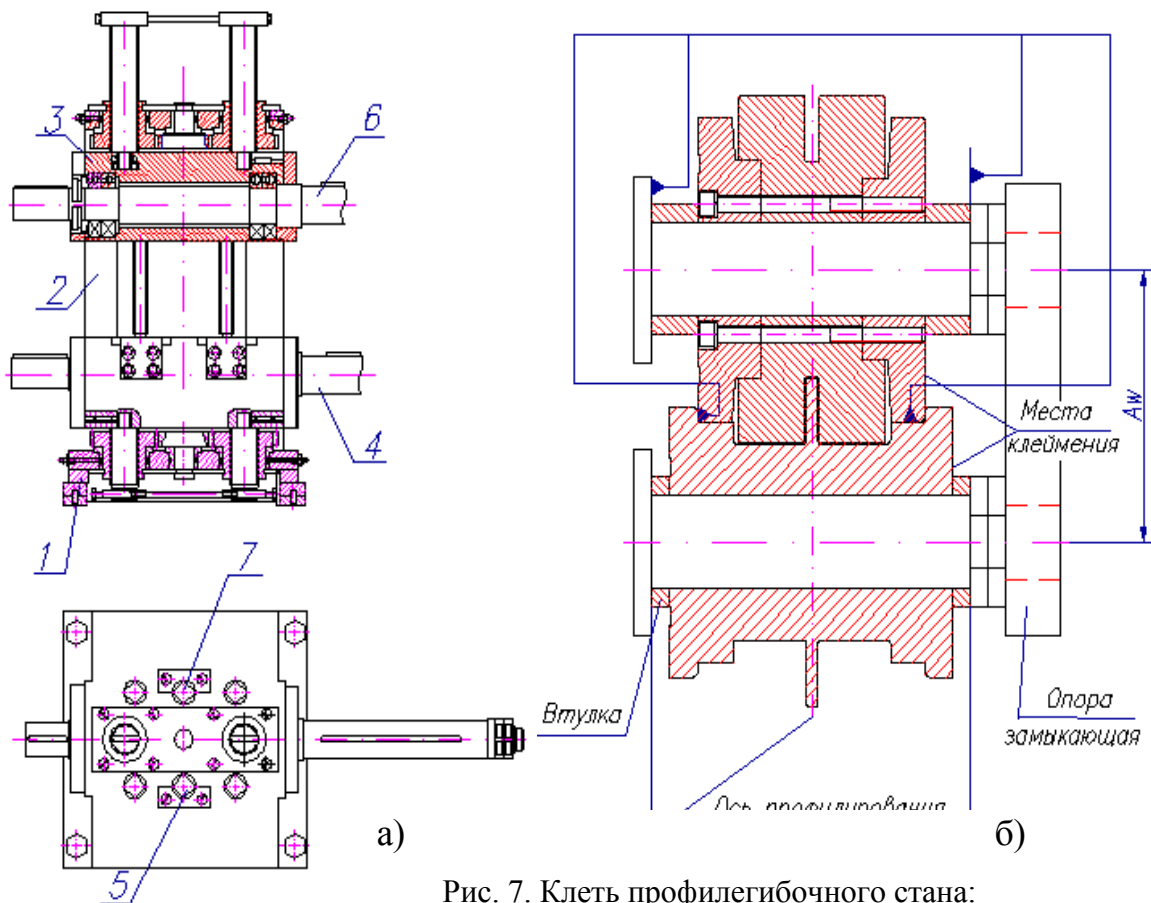


Рис. 7. Клеть профилегибочного стана:
а – устройство клетки и органы регулировки;
б – схема базирования формирующей оснастки
на рабочих валах клетки

В ползунах 3 на подшипниках качения установлены рабочие валы 4 и 6. Перемещение нижнего ползуна в вертикальной плоскости осуществляется вращением винта 5. Перемещение верхнего ползуна в вертикальной плоскости осуществляется вращением винта 7. Крутящий момент рабочим валам передается от раздаточной коробки через карданные валы к рабочим валам. На рабочих валах клетки при помощи замыкающей опоры закреплены ролики. Схема базирования формирующих роликов приведена на рис. 6, б. Замыкающая опора представляет собой основание, в котором установлены стойки с перемещающимися ползунами. В ползунах зафиксированы концы рабочих валов профилирующей клетки. Регулировка перемещения нижнего и верхнего ползунов осуще-

ствляется посредством ходовых винтов. Основные технические характеристики стана и профилирующей клетки приведены ниже.

Высота поверхности станины над полом, мм.....	800
Расстояние от стола до нижнего вала с оснасткой, мм	200
Максимальная глубина профилирования, мм	60
Скорость профилирования, м/мин	8 - 10
Максимальная толщина заготовки, мм	0,5 - 2,0
Максимальная ширина заготовки, мм	360.
Клеть профилирующая:	
Диаметр рабочих валов, мм	65
Длина рабочей части валов, мм.....	400
Регулировка верхнего вала клетки по вертикали, мм.....	50.
Межосевое расстояние между роликами с оснасткой:	
минимальное, мм	130
максимальное, мм	190
Мощность электродвигателя стана, кВт	11
Частота вращения вала электродвигателя, об/мин	1000.

Заготовка после центрирования в направляющем устройстве, захватывается роликами профилирующей клетки с горизонтальным расположением приводных рабочих валов. Между профилирующими клетями могут быть установлены промежуточные клетки с роликами или фильерами на вертикальных осях. За последней профилирующей клетью установлено устройство правильное с роликами, которое крепится болтами к торцу станины.

Устройство пневматическое предназначено для отрезки поступающего из профилегибочного стана профиля на заданную длину без остановки линии и состоит из станины с пневматическим прессом, ресивера, блока подготовки воздуха и пневмораспределителя.

Профиль поступает из стана в матрицу, закрепленную в прессе, и по сигналу на отрезку воздух из ресивера поступает в верхнюю полость пневмоцилиндра, приводя в движение поршень с пуансоном (ножом). Сопутствующее движение каретке пресса вдоль направляющих передается профилем. По сигналу от электронного блока управления происходит возврат поршня в исходное положение за счет подачи воздуха в нижнюю полость пневмоцилиндра. Возврат подвижной каретки в первоначальное положение происходит под действием пружин. Отрезанный в размер профиль поступает на стол-сбрасыватель. Характеристики пневматического устройства приведены ниже.

Максимальная ширина отрезаемой детали, мм.....	300
Максимальный ход поршня, мм	80
Максимальный ход каретки при работе, мм	120
Рабочее давление в пневмосистеме, МПа.....	0,4-0,6.
Габаритные размеры пресса:	
длина, мм	830
ширина, мм.....	942
высота, мм	1450
масса, кг	42.

Стол-сбрасыватель предназначен для приема готовых деталей и их удаления из рабочей зоны. Стол состоит из рамы сварной конструкции и панели, закрепленной на раме через кронштейн. Панель откидывается вниз и возвращается в исходное положение за счет работы пневмоцилиндров по сигналам от электронного блока управления.

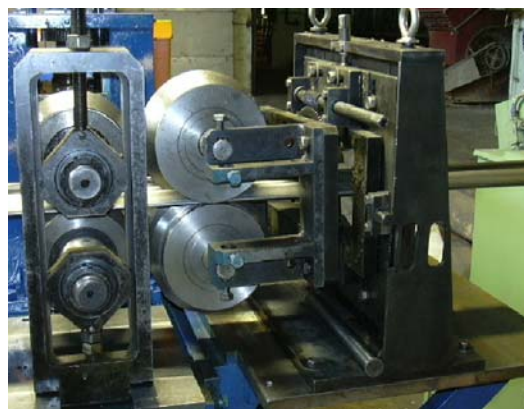
Электронная система управления включает отсчитывающее устройство и электронный блок управления, предназначенные для задания параметров: расстояния торможения, длины отрезаемой детали, количества изготавливаемых деталей, расстояния от места отрезки до стола со сбрасывателем, а также выдачи команд управления замедлением, отрезкой и столом на основе информации от соответствующих датчиков. Характеристики системы управления:

Напряжение питания однофазной цепи, В	220 +/-22
Номинальная частота тока, Гц	50 +/-0,5
Время непрерывной работы в сутки, часов не более.....	16
Средний срок службы, лет не менее.....	10
Средняя наработка на отказ, часов не менее	2500
Дискретность установки длины, мм.....	1,0
Минимальная длина профиля, мм	500
Максимальная длина профиля, мм	9999.

На рис. 8 представлены некоторые виды технологического оснащения для линий рассмотренного ряда.



а)



в)



г)

Рис. 8. Технологическое оснащение линий: а – съемные кассеты с формирующими роликами; б – правильное устройство с правильной оснасткой; в – клеть в сборе с перфорирующими роликами; г – ролик с вставными пуансонами

Линия может работать в режиме наладки и в автоматизированном режиме. Она обладает достаточной универсальностью, малым временем переналадки, достаточной для мелкосерийного производства производительностью, высокой надежностью, удобством эксплуатации, ремонтпригодностью и сравнительно невысокой ценой.

Практика внедрения и эксплуатации данных линий показывает их высокую экономическую эффективность. Известны случаи получения дневной прибыли до 200 тыс. рублей при производстве эксклюзивных профилей одной линией при двухсменной работе. При рациональном использовании линий срок их окупаемости обычно не превышает одного года.

Библиографический список

1. Филимонов, С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2004. – 246 с.
2. Филимонов, В. И. Перспективные ресурсосберегающие технологии и оборудование для интенсивного формообразования гнутых профилей и гофрированных панелей / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев // Вопросы технологии машиностроения. Материалы выездного заседания Головного Совета «Машиностроение» Министерства образования РФ. (г. Ульяновск, 29 – 30 сентября 2003 года). – С. 44-51.
3. Илюшкин, М. В. Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах / М. В. Илюшкин, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2006. – 200 с.
4. Филимонов, В. И. Применение модели пластического формоизменения профилирования / В. И. Филимонов, И. М. Колганов, С. В. Филимонов // Авиационная промышленность. – 1996. – №3-4. – С. 26-30.
5. Филимонов, В. И. Силовые параметры при стесненном изгибе и проектирование профилегибочного оборудования / В. И. Филимонов, А. С. Москвин // Авиационная промышленность. – 1994. – №9-10. – С. 5-10.
6. Патент РФ на полезную модель № 50886. МПК В21D 5/06. Профилегибочный стан / В. А. Литвинов, А. В. Филимонов, Д. П. Зарубин, С. В. Филимонов, В. И. Лапшин. – Оpubл. 27.01.2006. Бюл. № 03.



- **Филимонов Сергей Вячеславович**, канд. техн. наук, генеральный директор НПО «ИДМ»
- **Лапшин Владимир Иванович**, технический директор ООО «Спецтехнология»

5. ОБЗОРЫ И ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ В ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

УДК 621.981

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЕЙ И ГОФРИРОВАННЫХ ПАНЕЛЕЙ

канд. техн. наук Марковцев В. А., д-р техн. наук, профессор Филимонов В. И.

В последние годы наметилась устойчивая тенденция ко все более широкому использованию технологии интенсивного формообразования для изготовления длинномерных тонкостенных деталей постоянного поперечного сечения из различных материалов, преимущественно с покрытием, на парно-роликовых профилегибочных станках. В сравнении с другими методами производства таких деталей (гибкой в штампах, прессованием, гибкой в машинах с поворотной траверсой, традиционным профилированием) технология интенсивного формообразования (стесненный изгиб [1] и метод интенсивного деформирования [2]) обладает рядом преимуществ:

- возможность изготовления профилей минимальной толщины разнообразной номенклатуры;
- возможность замены сочетания нескольких стандартных профилей в конструкциях одним, имеющим сложную конфигурацию;
- возможность изготовления профилей из заготовок с покрытием;
- возможность производства профилей повышенной жесткости: с утолщением зоны сгиба до 20 – 30% и минимальным радиусомгиба в 2-3 меньшим радиусагиба, допускаемого при традиционных методах гибки; возможность деформирования высокопрочных и композиционных материалов, обладающих низкими пластическими свойствами;
- незначительные отходы металла, не превышающие, как правило, 1-2%;
- высокое качество поверхности профиля, с шероховатостью, не превышающей 0,63 мкм;
- высокая точность размеров профилей, не ниже 8-10 квалитетов;
- возможность использования компактного оборудования, имеющего малые габариты и невысокую стоимость при относительно небольшом энергопотреблении;
- использование малого количества средств технологического оснащения, что позволяет сократить затраты на технологическую подготовку производства и уменьшить время и трудоемкость переналадок оборудования;
- сравнительно высокая производительность труда и адаптируемость технологии к масштабам производства;

- возможность совмещения профилирования с другими производственными процессами (правка, отрезка, гибка по контуру); возможность механизации и автоматизации производства и др.

Из перечисленных выше методов производства профилей формообразование в роликах является наиболее универсальным методом производства профильной продукции, которое может быть условно разделено на традиционное профилирование (ТП), интенсивное деформирование (МИД) и стесненный изгиб (СИ). В таблице перечислены характерные отличительные черты каждого из этих методов формообразования профиля в роликах.

Традиционное профилирование предусматривает использование многоклетевых профилегибочных машин с числом клетей от 10 до 52 [3], причем «катающие диаметры» роликов обычно более 300 мм [4]. Скорость профилирования находится в диапазоне от 12 до 60 м/мин. Оборудование для традиционного профилирования является крупногабаритным; длина производственных линий профилирования достигает нескольких десятков метров. Это требует значительных производственных площадей и складских территорий для хранения технологической оснастки, что связано с высокими затратами на содержание производственных помещений. Освоение одного типоразмера профиля обходится в 500 тыс. руб. в ценах 2003 года. Кроме того, капитальные вложения на приобретение таких линий достаточно высоки: от 150 до 350 тыс. американских долларов – за линию российского производства и от 300 тыс. долларов – за линию зарубежного производства [5]. Для сравнения, стоимость автоматизированных линий интенсивного формообразования отечественного производства составляет от 50 до 100 тыс. долларов, а затраты на освоение одного типоразмера профиля не превышают (100 – 200) тыс. руб. в ценах 2003 года. Ежегодно в России внедряется несколько десятков линий и станков для производства профилей методом интенсивного деформирования в роликах. Например, ОАО «Ульяновский НИАТ» ежегодно внедряет до десяти линий и отдельных станков для производства около 100 типоразмеров профилей [6].

При интенсивном формообразовании нейтральный слой деформаций практически совпадает со средней линией, в то время как при традиционном профилировании нейтральный слой деформаций смещается к внутреннему контуру, а при стесненном изгибе – к наружному контуру зоны сгиба (рис. 1). Отсюда следует, что при стесненном изгибе и интенсивном деформировании происходит разгрузка наружного контура зоны сгиба, что позволяет обеспечивать меньшие радиусыгиба без разрушения заготовки.

При стесненном изгибе наряду с малым радиусом зон сгиба (меньшим допустимого для данного материала) можно получить утолщения в угловой зоне за счет придания заготовке волнообразной формы с последующей ее осадкой [1]. Возможны схемы с торцевым поджатием при плоской стенке, однако для набора утолщения в угловой зоне данная схема пригодна лишь для профилей с малой шириной полок (до $(20...30) S_0$) [1]. Увеличение ширины полки приводит либо к потере ее устойчивости (неплоскостности полки в поперечном направлении), либо к кромковой волнистости, что, безусловно, ограничивает технологические возможности метода.

Из таблицы видно, что метод интенсивного деформирования обладает рядом преимуществ перед традиционным профилированием, особенно в сфере мелкосерийного производства, и имеет более широкие технологические возможности в части изготовления широкополочных профилей по сравнению со стесненным изгибом.

Характеристика методов формообразования профиля в роликах

Характерный показатель	Традиционное профилирование	Метод интенсивного деформирования	Стесненный изгиб
Толщина заготовки, мм	0,5...3,0	0,5...3,0	0,5...3,0
Скорость профилирования, м/мин	12...60 (до 180)	6...30	2...15
Углы подгибки за переход, град.	8..12	10...40	10...40*
Тип калибра	Открытый с высвобождением	Закрытый	Закрытый
Форма калибра	Прямолинейные участки с сопряжением в углах	Прямолинейные участки с сопряжением в углах	Волнообразная
Диаметры роликов (по межосевому расстоянию)	D	$(0,4...0,7) \cdot D^{**}$	$(0,5...0,7) \cdot D$
Число переходов	N	$(0,5...0,7) \cdot N$	$(0,4...0,7) \cdot N$
Приложение дополнительных сил	—	Аксиальная, торцевая***	Торцевая, осадка заготовки
Правильное устройство	Не обязательно	Обязательно	Обязательно
Режим формовки радиусагиба	Плавный по переходам	На первых переходах	На последних переходах
Форма линии профилирования	Прямая	Кривая	Кривая
Технологические возможности: а) H/C (отношение высоты профиля H к ширине его дна C) б) r_B/s_0 (относительный радиусгиба)	Любые $r_B/s_0 > (r_B/s_0)_{\text{допуст.}}$	Любые $r_B/s_0 > 0,5$	$H/C \leq 2$ для прямой схемы; $H/C < 5$ для обратной схемы $r_B/s_0 > 0$
* — измеряется по наклону прямолинейного участка боковой стенки; ** — различие в значениях средних диаметров; *** — для специальных схем			

Кроме того, при стесненном изгибе профили имеют весьма высокий уровень остаточных напряжений, достигающий $(0,5...0,8) \sigma_S$ в случае неблагоприятных схем формообразования. В авиационной промышленности остаточные

напряжения не являются существенным ограничением, поскольку профили подвергают последующей закалке с правкой растяжением перед выполнением операций подсежки, малковки и гибки по контуру.

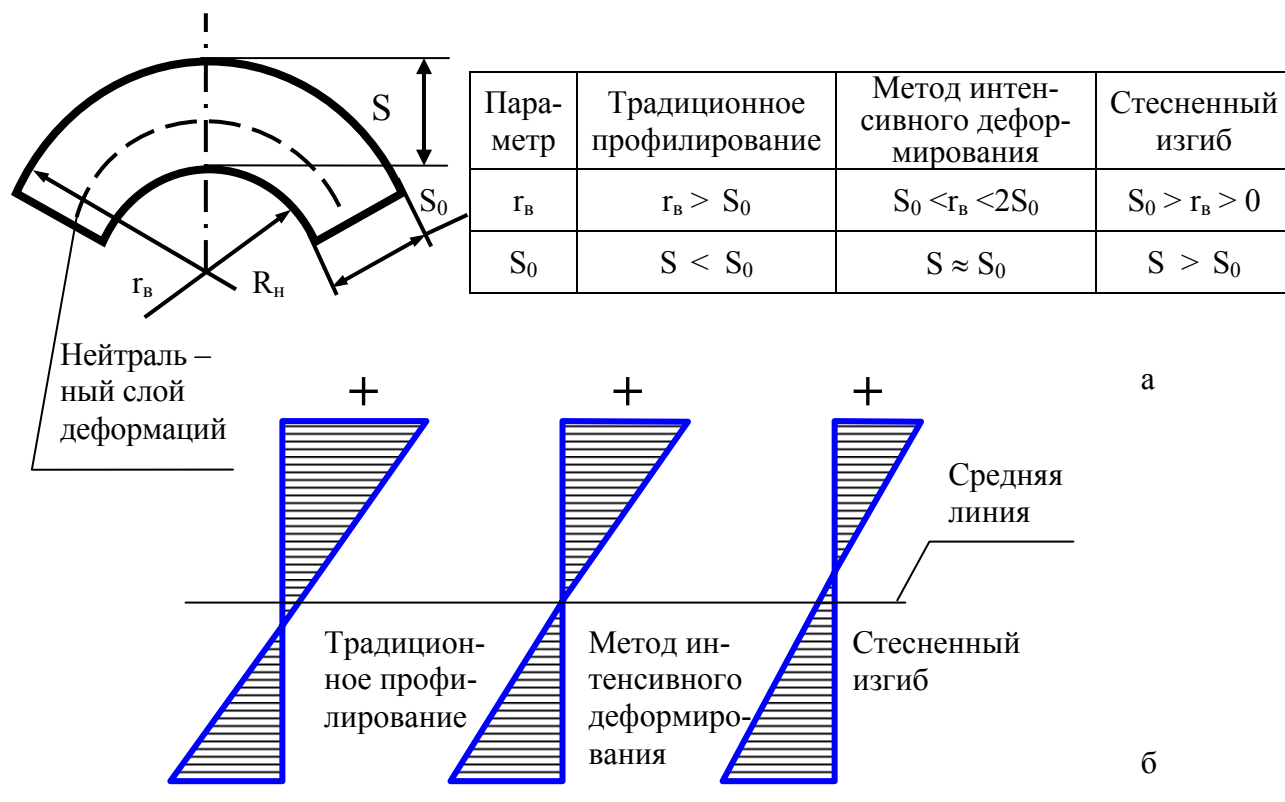


Рис. 1. Угловая зона и окружающие деформации при различных методах изготовления профиля в роликах: а – зона сгиба и характеристики методов; б – эпюры окружающих деформаций

Использование профилей с высоким уровнем остаточных напряжений в других отраслях промышленности может отразиться на сроке службы конструкций, включающих такие профили, хотя исследования европейских и американских ведомств по предотвращению коррозии металлов показывают, что при надлежащей защите профилей лакокрасочными покрытиями их стойкость простирается за 30 лет.

Профили из алюминиевых сплавов, изготовленные методом стесненного изгиба и методом интенсивного деформирования (рис. 2), используют в качестве стрингеров самолетов ИЛ-114, ИЛ-103, ТУ-334, Бе-200, АН-70, АН-140. Применение таких профилей в авиастроении обу-

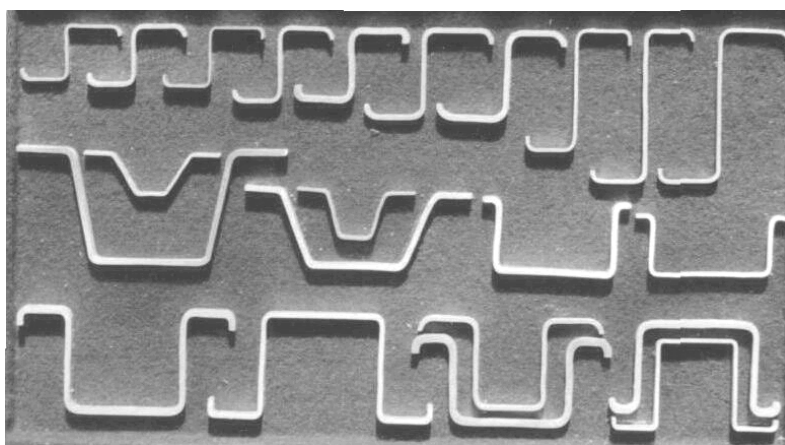


Рис. 2. Авиационные профили из легких сплавов

словлено их относительно высокой жесткостью, повышенным ресурсом по сравнению с прессованными профилями (в 2 – 3 раза), а также технологической эффективностью методов их изготовления [1].

В последние годы возрос спрос на сложные профили с элементами жесткости [7], изготавливаемые из сталей с покрытиями (рис. 3).

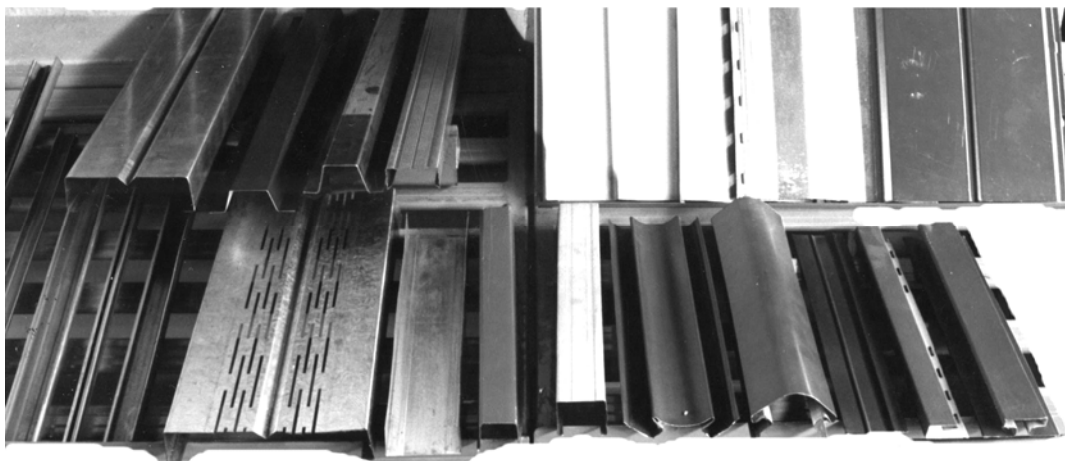


Рис. 3. Профили сложных сечений для строительства

За последние 20 лет ОАО «Ульяновский НИАТ» внедрило технологии интенсивного формообразования и соответствующее промышленное оборудование на тринадцати предприятиях авиационной отрасли, пяти предприятиях автомобилестроения, трех предприятиях электротехнической промышленности и примерно на 250 предприятиях строительной индустрии, не считая примерно 150 малых фирм различной специализации, также использующих разработки в области профилирования, выполненные совместно ОАО «Ульяновский НИАТ» и кафедрами машиностроительного факультета Ульяновского государственного технического университета.

Основное и вспомогательное промышленное оборудование для реализации технологий интенсивного формообразования насчитывает более 70 единиц, в том числе:

- профилегибочные станки различных модификаций [6] (рис. 4);
- станки прокатки гофр;
- автоматизированные линии продольного и поперечного раскроя рулонного материала;
- автоматизированные линии производства профилей и гофрированных панелей, в том числе для производства профилей и гофр с заданной продольной кривизной [8];
- правильные машины, отрезные устройства, перфораторы, рулонницы и другое вспомогательное оборудование.

К настоящему времени разработаны и внедрены в ряде отраслей промышленности производственные инструкции, технологические рекомендации по производству типовых профилей из различных материалов, руководящий технический материал [9], проведены исследования и разработаны модели про-

цессов стесненного изгиба при наличии аксиальных сил, а также для совмещенных процессов формообразования и разрезки [1].

Вопросы обеспечения правки, а также формирования заданной продольной кривизны одновременно с формированием поперечного сечения профиля типовой номенклатуры решены в работе [10].

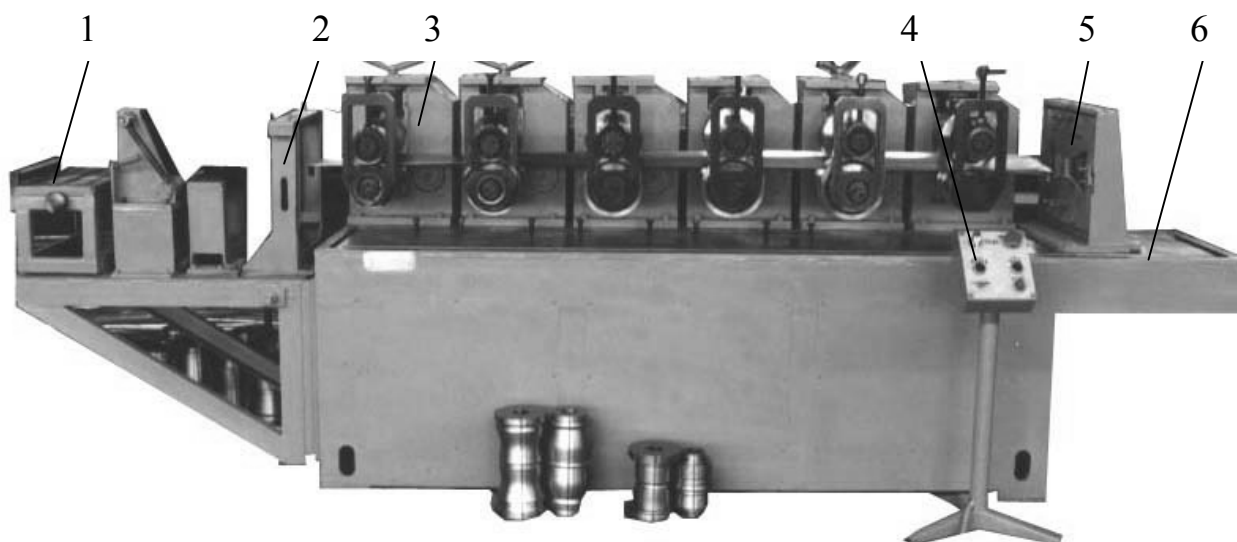


Рис. 4. Станок ГПС-350М6: 1 – направляющее устройство; 2 – клеть предварительного формообразования; 3 – профилирующие клетки; 4 – пульт управления; 5 – устройство для правки профиля; 6 – станина

В работе [2] представлены модели зон плавного перехода, числа переходов, потери устойчивости подгибаемых элементов широкополочных тонкостенных швеллеров [11], обнаружен новый эффект влияния ширины донной части на режимы подгибки и деформационные параметры полок типовых профилей.

Результаты исследований отражены более чем в 300 публикациях, в том числе в 70 изобретениях и 10 монографиях.

Хотя многие научные проблемы производства профилей типовой номенклатуры можно считать решенными и процедуру проектирования и обработки профиля рутинной, имеется много задач в этой области, подлежащих решению. Предстоит разработать:

- Модели формообразования профилей из материалов с покрытием с целью определения условий сохранности последнего в процессе формоизменения заготовки.

- Модели поведения заготовки в межклетьевом пространстве при изготовлении сложных неравнополочных профилей с элементами жесткости (отбортовки, рифты, петельные элементы, элементы двойной толщины) с целью выявления условий устойчивости процесса и оптимальных схем формообразования.

- Новые схемы и способы формообразования профилей с одновременным приданием профилю заданной продольной кривизны или винтовой скрутки.

- Новые способы перфорации, совмещенной с формообразованием, продольной и поперечной резкой профиля.
- Новые виды оборудования, инструмента, межклетевых проводок, активных направляющих и правильных устройств, гибочных блоков, требующих наличия надежных математических моделей.
- Средства автоматизации проектирования и изготовления сложных профильных деталей.

Библиографический список

1. Филимонов, В. И. Интенсификация процесса формообразования стесненным изгибом профилей для авиационных конструкций: Дис. канд. техн. наук: 05.07.04/Самарский гос. Аэрокосмический ун-т. – Самара, 1993. – 199 с.
2. Филимонов, С. В. Разработка технологии интенсивного формообразования гнутых тонкостенных профилей в роликах: Дис. канд. техн. наук: 05.03.05/ Нижегородский гос. Технический ун-т. – Нижний Новгород, 2003. – 223 с.
3. Lignes de profilage // Machines et production. 1999. 706 e. – P. 67.
4. Производство и применение гнутых профилей проката : справочник / под ред. И. С. Тришевского. – М. : Металлургия, 1975. – 536 с.
5. Roll forming line for USSR // Sheet metal industry. – 1992. – V. 68. – №9. – P. 40.
6. Марковцев, В. А. Изготовление методом интенсивного деформирования профилей из листа и их внедрение в авиастроении / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов, И. М. Колганов и др. // Авиационная промышленность. – 2001. – № 4. – С. 21-23.
7. Колганов, И. М. Классификация типовых элементов жесткости гнутых профилей и особенности их формообразования / И. М. Колганов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 2001. – №3. – С. 21-25.
8. Марковцев, В. А. Автоматизированная линия изготовления С-образного профиля методом стесненного изгиба / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов // Вестник УлГТУ. – 1998. – №2. – С. 30-34.
9. РТМ 1.4.2005– 90. Изготовление профилей из листов алюминиевых сплавов Д16, В95, 1420 методом стесненного изгиба / Ю. М. Арышенский, Г. В. Проскуряков, В. А. Марковцев и др. – М. : НИАТ, 1991. – 85 с.
10. Марковцев, В. А. Разработка и внедрение технологии и оборудования для изготовления прямолинейных листовых профилей для авиационных конструкций методом стесненного изгиба: Дисс. канд. техн. наук: 05.07.04. – М. : НИАТ, 1991. – 202 с.
11. Берлет, Ю. Н. Деформационные характеристики подгибаемых полок и оптимизация углов подгибки при профилировании / Ю. Н. Берлет, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2002. – №6. – С. 8-12.

- **Марковцев Владимир Анатольевич**, канд. техн. наук, генеральный директор ОАО «Ульяновский НИАТ»
- **Филимонов Вячеслав Иванович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

УДК 621.981

ПРИМЕНЕНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЯМИ

Марковцева В. В.

Современная промышленность проявляет высокую потребность в деталях, обладающих требуемой декоративностью, высокой коррозионной стойкостью, прочностью и другими свойствами. Такие изделия можно получить использованием заготовок с предварительно нанесенными на них покрытиями и при изготовлении их методом интенсивного деформирования в валках профилигибочного стана. Высококачественные профили с покрытиями широко используются в качестве наружных и внутренних декоративных панелей, силовых несущих, кровельных, потолочных, облицовочных и др. конструкций.

Выявление условий бездефектной формовки профилей из материалов с покрытиями, разработка соответствующих математических моделей, технологических приемов и алгоритмов создания соответствующей технологии представляет актуальную проблему в данной области.

Целью данной работы является описание применения гнутых профилей с покрытиями в различных отраслях народного хозяйства: в машиностроении, автомобилестроении, строительстве и т. д.

Классифицировать все покрытия довольно сложно из-за огромного разнообразия компонентов, составляющих покрытие. В зависимости от назначения материала в промышленных условиях на металлическую основу наносят определенный ряд покрытий, исходя из требований малой продолжительности и сушки покрытия, высоких физико-

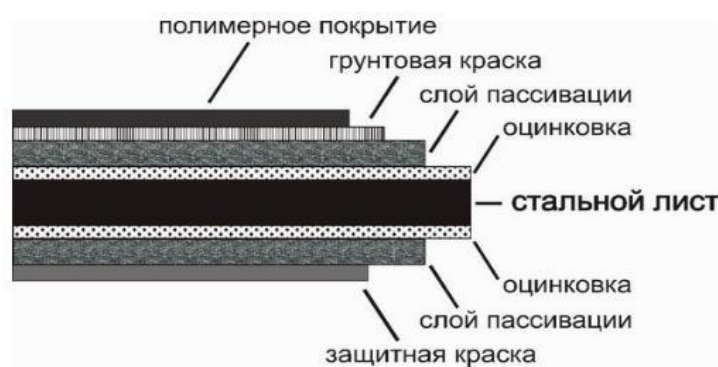


Рис. 1. Структура листового материала с покрытием

механических и декоративных свойств, достаточной коррозионной стойкости. В связи с этим в данной статье выделяются два вида покрытий: металлические (схема 1) и неметаллические (схема 2). Под системой покрытий понимается со-

четание слоев, составляющих материал с покрытием: подложка, грунт, покрытие. На рис. 1 представлена структура листового материала с покрытием.

В большинстве случаев для предварительной защиты металла от коррозии применяют металлические покрытия (рис. 2), к которым относят цинковые (Zn), алюминиевые (Al) покрытия, цинкоалюминиевые (Zn+Al) сплавы, сплавы на основе цинка (Zn+Fe, Zn+Ni), а также медные, оловянные, оловянно-свинцовые покрытия и др.

В настоящее время наибольшее применение в России и за рубежом нашли металлические покрытия на цинковой основе, получаемые горячим способом (толщиной 10-60 мкм) или электролитическим способом (толщиной 2-12 мкм). За рубежом помимо цинковых покрытий, применяют также его сплавы (Zn+Al, Zn+Fe). Сплав Aluzink (55% Al, 43,4% Zn и 1,6% Si) имеет повышенную коррозионную стойкость (в несколько раз превышает время до появления первой ржавчины по сравнению с покрытием).

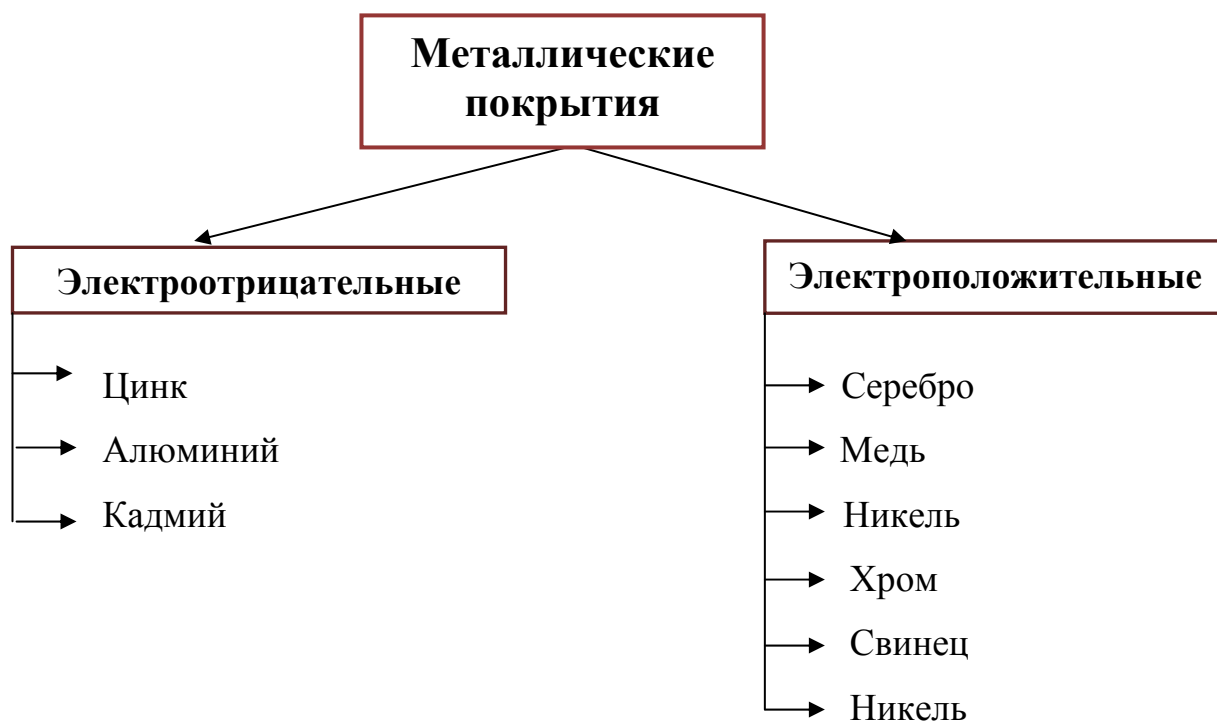


Рис. 2. Виды металлических покрытий

Производителями оцинкованной стали являются ОАО «НЛМК», ОАО «Северсталь», ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат (ММК)», АО «ЛМЗ». Зарубежные производители: металлургический комбинат «ИСПАТ КАМЕТ» (Казахстан), Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича (Украина), [1].

Неметаллические покрытия (рис. 3) – краски (алкидные, масляные и эмали), лаки (синтетические, битумные и дегтевые) и полимеры образуют защитную пленку на поверхности металлов, исключаящую (при своей целостности) контакт с внешней средой и влагой.

Эффективность и качество нанесенных покрытий зависят от соблюдения нескольких условий: неукоснительное следование технологии нанесения на металлические поверхности, необходимость применения исключительно качественных лакокрасочных материалов, а также соответствие климатическим условиям, в которых будет эксплуатироваться металлическая конструкция. Например, лакокрасочные материалы лучше всего наносить несколькими слоями, так как такое количество слоев обеспечивает достаточную защиту от различных воздействий на металлическую поверхность.

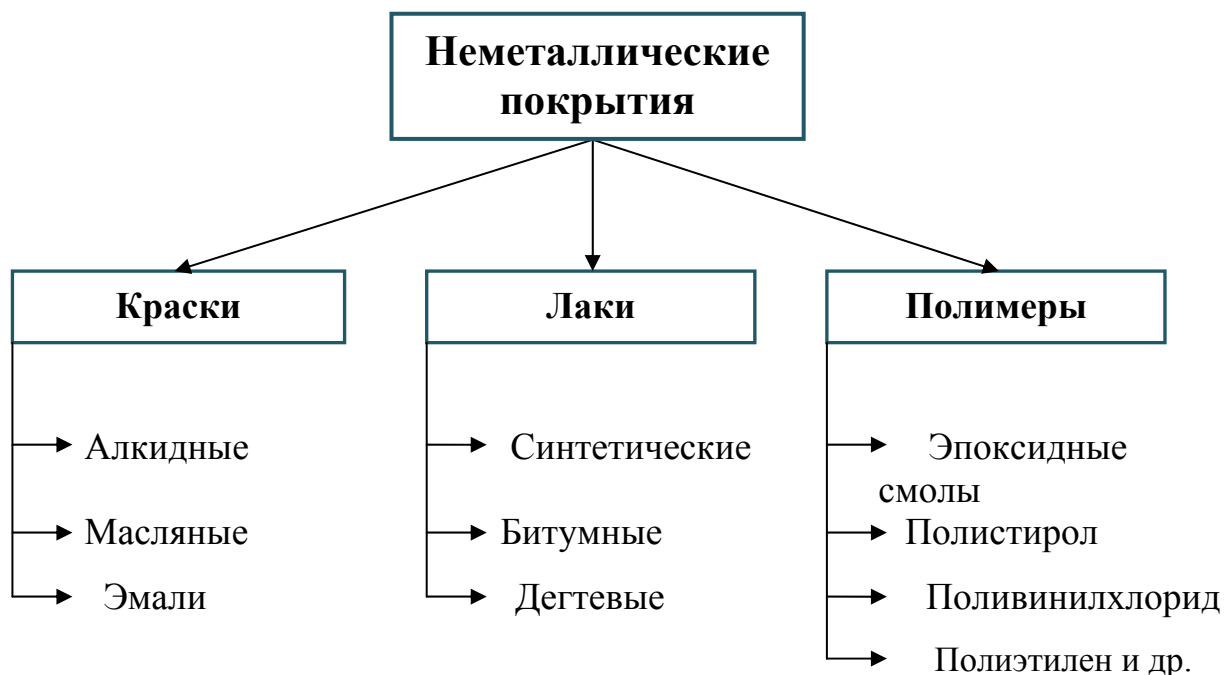


Рис. 3. Виды неметаллических покрытий

В качестве защитных покрытий от коррозии могут также выступать полимеры – это эпоксидные смолы, полистирол, поливинилхлорид и полиэтилен. Наносимые на исходный материал (так называемую подложку) покрытия должны обеспечивать возможность проведения дальнейшей механической обработки металлопроката. В настоящее время среди российских производителей материала с полимерными покрытиями можно выделить ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК)», АО «Электроштит», АО «Лысьвенский металлургический комбинат (ЛМЗ)»; среди зарубежных производителей – концерны SAAB (Швейцария), Rautaruukki (Финляндия), British Steel (Великобритания) [1].

Практически все сферы современного народного хозяйства все больше требуют использования специальных материалов, в частности материалов с покрытиями, поскольку именно таким материалам присущи особые свойства, необходимые в той или иной области применения. Среди них можно отметить коррозионную стойкость, прочность, жесткость, высокую декоративность и другие.

В связи с вышесказанным, гнутые профили с покрытиями широко используются в авиастроении, автомобилестроении, строительстве, при производстве бытовой техники и в других отраслях промышленности. В данной статье рассмотрены только некоторые из них.

В отечественном **автомобилестроении** необходимо отметить таких крупных производителей как ВАЗ, УАЗ, ГАЗ. Так, например, предприятие ОАО «АВТОВАЗ» применяет следующую последовательность нанесения защитных и декоративных покрытий на кузов автомобилей: фосфатирование, анафорезное или катафорезное первичное грунтование, выравнивающее вторичное грунтование, однослойное или двухслойное декоративное лакокрасочное покрытие (www.autofaq.ru). Скрытые труднодоступные места на всех моделях ВАЗ (пороги, ниши дверей, арки заднего колеса) обрабатываются составом «Оримин», аналогичным Тектилу (представляет собой антикоррозионный тиксотропный состав на нефтяной основе, предназначенный для защиты днища; после отверждения образует прочную эластичную пленку черного цвета) (www.samara-lada.ru).

Также осуществляется перевод части деталей, изготавливаемых из тонколистового материала на оцинкованный (кузов и др.).

В строительстве выделяется несколько групп применяемых профилей с покрытиями. В первую группу входят профили швеллеро- и С-образного типа с толщиной подложки 0,5-2,0 мм, имеющие защитное цинковое покрытие. Данные профили применяют в конструкциях при отделке помещений, силовых конструкциях (мансардное строительство, армирование пластиковых окон) и др. Такие профили, как правило, находятся внутри конструкции, что обосновывает выбор такого покрытия.

Во вторую группу включены профили (рис. 4), предназначенные для наружной облицовки зданий и сооружений (сайдинг, софит и доборные элементы) и водосточные системы (трубы, желоба). Эти профили предназначены для улучшения декоративного вида сооружения, поэтому в качестве покрытий применяются полиэфирные и акриловые краски, имеющие наиболее высокие декоративные свойства (наибольший выбор цвета и блеска покрытий).

К третьей группе относятся профили, предназначенные для отделки кровли зданий (кровельные листовые панели, металлочерепица, фальцевые панели, а также их доборные элементы: коньки и др.). Эти профили наиболее подвержены атмосферным воздействиям (дождь, ветер, солнечное излучение) в совокупности со сложным поперечным сечением (элементы с двойной толщиной металла, замковые элементы), что обуславливает выбор для таких профилей более стойких покрытий. К таким покрытиям относят полиуретановые, поливинилфторидные и пластизолевые покрытия.

К четвертой группе относятся профили, применяемые во внутренней отделке интерьера помещений. К таким профилям относятся металлические по-

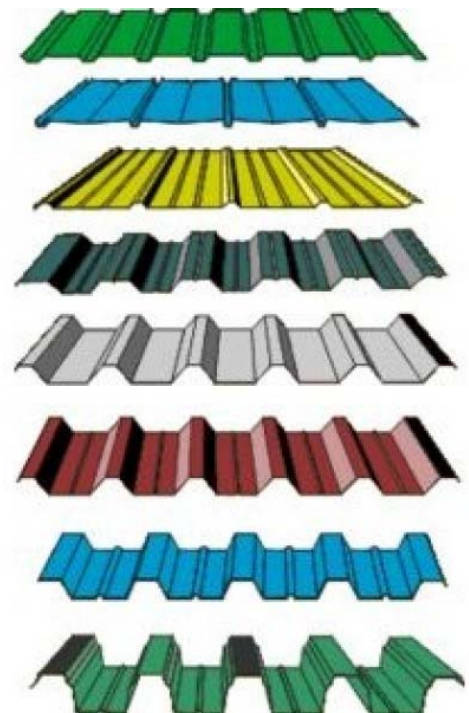


Рис. 4. Виды профнастила с покрытиями, используемого в строительстве

толки, жалюзи, карнизы и др. В связи с их декоративным предназначением применяют соответствующие покрытия (акрил, напыляемые покрытия под цвет золота и серебра, а также различные декоративные пленки) (www.spf.ccr.ru).

В авиастроении наиболее широко применяются профили, являющиеся несущими силовыми элементами каркаса (лонжероны, стрингеры, шпангоуты), а также различные декоративные и ограждающие элементы. Здесь в основном используются профили, плакированные алюминием. Почти все наиболее ответственные детали из высокопрочных сталей хромируются.

Такие детали работают в особо сложных условиях: наличие коррозионной среды и больших нагрузок.

На рис. 5 представлены профили из алюминиевых сплавов с плакирующим покрытием, применяемые в качестве стрингеров самолётов ИЛ-114, ИЛ-103, БЕ-200, АН-70, АН-140. На производство указанных профилей ОАО «Ульяновский НИАТ» разработало



Рис. 5. Профили с покрытиями, производимые ОАО «Ульяновский НИАТ» и применяющиеся в качестве элементов стрингерного набора

отраслевую нормативно техническую документацию, по которой в авиастроении изготавливаются профили указанного назначения.

Библиографический список

1. Илюшкин, М. В. Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах / М. В. Илюшкин, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – 200 с.
2. Марковцев, В.А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – 244 с.
3. Тришевский, И. С. Производство гнутых профилей / И. С. Тришевский. – М. : Металлургия, 1982. – 384 с.
4. Halmos, G. Roll Forming Handbook. London: Tailor & Francis, 2006. – 586 p.



- **Марковцева Валерия Владимировна**, студентка пятого курса, специализирующаяся по кафедре «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ НЕСИММЕТРИЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Карпов С. А.

Развитие современного машиностроения определяется несколькими показателями, в основном связанными с экономической составляющей, такими как производительность труда, трудоемкость, ресурсоемкость и др. В соответствии с этим, развитие большей части отраслей (за исключением тех наукоемких, основной задачей которых является освоение новейших технологий, независимо от требуемых на данные цели затрат) направлено на повышение именно этих показателей.

Задача повышения технико-экономических показателей может быть решена при условии широкого внедрения высокопроизводительных процессов. Одним из таких является изготовление профиля несимметричного сечения на прокатных станах методом интенсивного деформирования [1]. Преимуществами профилирования в сравнении с прессованием, гибкой в штампах, кромкогибочных машинах являются относительно высокая производительность, безотходность, возможность получения длинномерных деталей.

Профили различного несимметричного сечения получили широчайшее распространение в силу большого разнообразия форм и типоразмеров. Одним из самых крупных потребителей гнутых профилей различного сечения, несимметричного в частности, является отрасль *автомобилестроения*.

Здесь применение профиля является довольно значительным: пороги, окантовки дверей и окон, соединения панельных дверей, каркас и планки сидений, обоймы уплотнителя поворотного стекла, сточный желоб крыши и его облицовка, уплотнитель фланца задней двери, направляющие подлокотника, молдинги и многие другие детали, применяемые во внутренней и внешней отделки автомобилей.

Преимущество процессов профилирования в данной области в том, что к профильным деталям в числе прочих требований предъявляются жесткие допуски их изготовления. Тем не менее, необходимость сертификации технологии, жесткая конкуренция, ввиду массовости производства в этой отрасли, определенный риск временного приостанова поточного производства создают определенную сложность внедрения технологий профилирования.

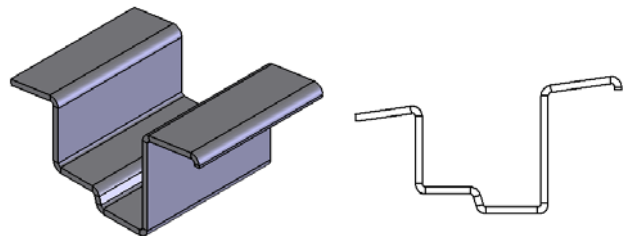


Рис. 1. Деталь 2120-6206332. (Направляющая средняя задней сдвижной двери ВАЗ)

Помимо производства автомобилей профили несимметричного сечения используются в вагоностроении (рис. 2). Гнутые профили позволяют получать наряду с известными [2] совершенно новые конструктивные решения по отдельным узлам и элементам вагонов со снижением

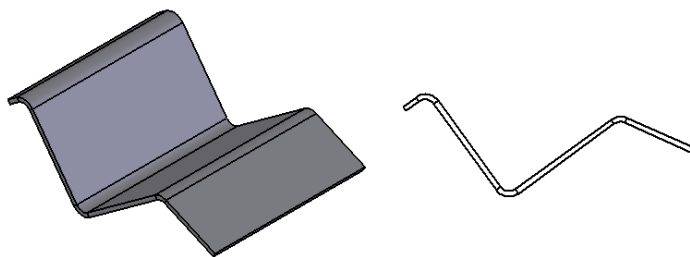


Рис. 2. Профиль №13 (ГОСТ 14635-93)

трудовых затрат на их изготовление при высоких прочностных характеристиках. Около 25% массы в конструкции четырехосных цельнометаллических вагонов составляют гнутые профили, что позволяет создать полувагон с эстетичным, современным внешним видом и высокими эксплуатационными качествами. Изготовление вагонов из гнутых профилей позволяет добиться снижения его стоимости до уровня 10% [3].

Авиастроение остается передовой отраслью, в которой не перестает идти поиск новых материалов и прогрессивных технологических процессов. Применение гнутого профиля в этой отрасли целесообразно ввиду расширения в последние годы парка летательных аппаратов, наряду с повышением требований к их конструкции. Профилирование является одним из путей, позволяющих повысить эксплуатационные характеристики изделий. Помимо того, использование гнутых профилей и панелей, подкрепленных ими, есть один из путей снижения массы и повышения ресурса как отдельных частей, так и всего летательного аппарата [4].

В настоящий период с быстрорастущими темпами развития производства, используемая номенклатура гнутого профиля часто меняется, что не представляет возможным количественно выделить типоразмеры деталей. Однако в недавнем прошлом в отечественном авиастроении использовалось порядка 300 типоразмеров гнутых профилей из авиационных сплавов разнообразных поперечных сечений, приведенных в табл. 1 [5]. Определенную часть в них занимает профиль специального назначения, в числе которого присутствуют некоторые с несимметричным сечением.

Таблица 1

Применение гнутых профилей в авиастроении

Тип профиля	Количество типоразмеров	Годовой объем, пог. м.
Уголок	155	316000
Зетовый	37	323500
Швеллер	56	20600
Корытный	47	474200
Специальный	5	2100

Отдельную нишу в применении профильной продукции занимает **строительная индустрия**. Предприятия производят большое количество про-

филей широкой номенклатуры: коньки крыш, противоветренные уголки, воронки, подоконники, дождевые стоки, а также соединительные элементы, детали герметизации, снегозащиты и т. п.

Группа компаний «Стройпромет» [6] (г. Сходня М.О.) производит более 7 видов сайдингов шириной от 216 до 502 мм из стали толщиной 0,5 мм (с покрытием) преимущественно на станках фирмы «KNUDSON». Кроме того, предприятия «Стройпромет» выпускают софиты, стеновые панели, водосточные желоба и профили повышенной жесткости (рис. 3) по согласованным ТУ [7]. Толщина стенок профилей повышенной жесткости – от 0,8 до 1,2 мм. ОАО «Челябинский завод профилированного стального настила» [8] помимо профилированных листов повышенной жесткости согласно ГОСТ [9] выпускает также профили для арочных покрытий и настилов покрытий и стен (рис. 4), согласно [10,11] размером до 330x136 мм и толщиной стенок от 0,8 до 1,2 мм.

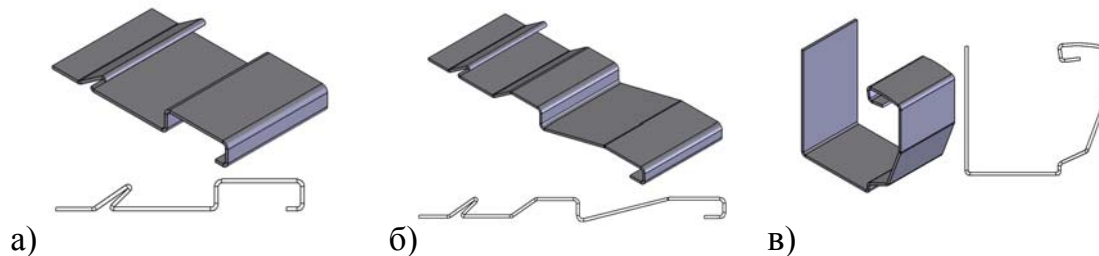


Рис. 3. Профили компании «Стройпромет»: а, б) некоторые из видов сайдинга, в) водосточный желоб

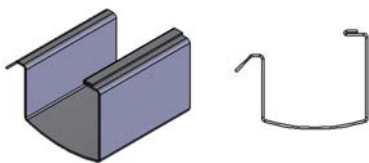


Рис. 4. Профиль для арочных покрытий и настилов

Отлично зарекомендовали себя гнутые профили в производстве стальных входных дверей. Весомые преимущества дает использование профиля, как в каркасе дверного полотна, так и в коробке дверного блока.

Коробка дверного блока может изготавливаться из уголка, профильной трубы и гнутого профиля. Главное преимущество применения здесь гнутого профиля – получение сложного контура прилегания обшивочного листа полотна на коробку.

Применение гнутых профилей в каркасе дверного полотна позволяет добиться следующих преимуществ:

- увеличить жесткость двери примерно втрое;
- создать дверь большой толщины при минимальном увеличении веса;
- установить два контура уплотнения по всему периметру двери, что улучшит ее тепло- и шумоизоляционные свойства и герметичность.

Чем сложнее геометрическая форма гнутого профиля, образующего в конструкции сложные замкнутые контуры, и больше толщина материала, тем жестче и прочнее получается конечное изделие.

Коробки из гнутого профиля (рис. 5) обеспечивают требуемую жесткость конструкции, но, в отличие от коробок, изготовленных из профильной трубы или уголка, позволяют «утопить» полотно двери в коробке. Это улучшает внешний вид изделий, повышает их устойчивость к взлому, позволяет создать два контура прилегания с особой геометрией. При установке в контуры лепестковых или трубчатых уплотнителей, максимально улучшаются тепло- и шумоизоляционные свойства и герметичность дверей [13].

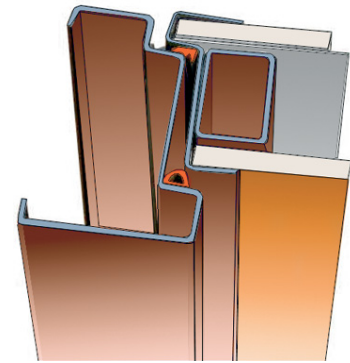


Рис. 5. Дверная коробка из гнутого профиля

Гнутый профиль несимметричного сечения используется также для армирования металлопластиковых окон (рис. 6.). Армирующий профиль – металлический профиль, проходящий внутри пластикового оконного профиля для придания последнему большей жесткости. Также к армирующему профилю крепятся наружные петли и различные внутренние механизмы фурнитуры. В свете популяризации так называемых пластиковых окон производители стали расширять разнообразие типоразмеров гнутого профиля, используемого в данной области.

Профили несимметричного сечения (рис. 7) нашли применение за последнее десятилетие также и в производстве мебели [12]. Чаще всего профили используются в качестве несущих, функциональных или декоративных элементов в комбинации с деревом для производства столов, кроватей, шкафов-купе. Однако помимо этого изготавливаются различные виды деталей торгового оборудования для современных торговых комплексов и супермаркетов [14].

Преимущества стеллажей из перфорированных профилей [15]:

- возможность изменения междуполочной высоты стеллажей, что особенно важно при неустойчивой номенклатуре хранимых грузов;
- высокая прочность и жесткость получаемых конструкций;
- легкость монтажа и демонтажа;
- сравнительно невысокая стоимость их изготовления.

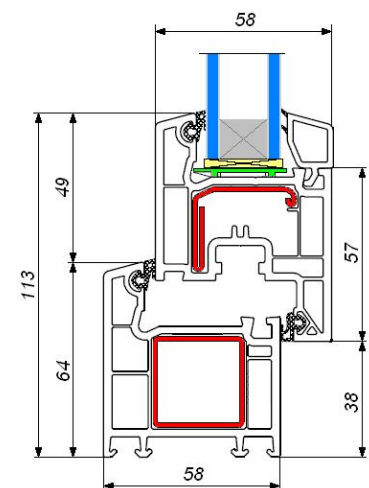


Рис. 6. Армирующий профиль VEKA

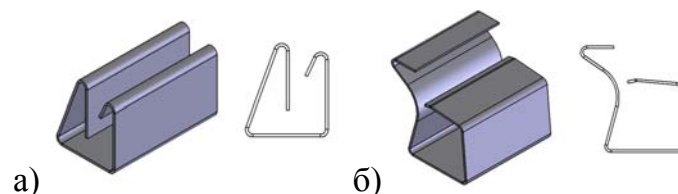


Рис. 7. Некоторые профили несимметричного сечения, применяемые в мебельном производстве: а) П-154; б) П-155

Богатый ассортимент гнутого профиля несимметричного сечения используется во внутренней отделке помещений. Домашние интерьеры предполагают использование гибких, эстетичных конструкций для защиты и укрепления поверхностей. Однако на открытых участках и в местах с высокой проходимостью необходимы нержавеющие профили, изготавливаемые из стали (рис. 8). Высокая механическая устойчивость предполагает использование металлических деталей, которые укрепляют конструкцию и в то же время выглядят элегантно и изящно. Это может понадобиться в следующих случаях:

- облицовка фасадов камнем, керамической плиткой, организация декоративных вставок;
- облицовка ступеней лестниц в местах с высокой проходимостью, там, где особенно требуется защита от стирания и механических повреждений;
- изготовление сложных подвесных многоуровневых конструкций [16].

Продукция профилирования все больше внедряется в различные области производства. Зарекомендовав себя с лучшей стороны, со временем гнутый профиль приходит на замену другим изделиям и используется в самых неожиданных местах. Номенклатура гнутого профиля необъятно разнообразна, следовательно, данный профиль конкурентоспособен и востребован. Однако, ввиду сложности формы, технология его изготовления имеет свои тонкости и требует высокой квалификации разработчика.



Рис. 8. Профиль для отделки

Библиографический список

1. Филимонов, С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2008.
2. ГОСТ 14635-93. Профили стальные гнутые специальные для вагоностроения. Сортамент.
3. Филимонов, С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 10 с.
4. Колганов, И. М. Повышение несущей способности панельных конструкций ЛА с профилями, гнутыми из листа / И. М. Колганов, С. В. Филимонов, Н. А. Щавлева // Авиационная промышленность. – 1999. – №3. – С. 9-12.
5. Профили гнutoкатанные из листовых алюминиевых сплавов: Научно-технический отчет № 5448 – 227 – 88. – М. : НИАТ, 1988. – 75 с.
6. Электронный ресурс. – Режим доступа : <http://www.knudson.ru/sayding>.
7. ТУ 1122-181-024946880- 99. Профили стальные гнутые тонкостенные для строительства.
8. <http://www.profnasteel.ru/products>. Электронный ресурс.
9. ГОСТ 24045-94. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства.

10. ТУ 5262-100-02494680-99. Конструкции стальные из гнутых профилей для облицовки наружных стен зданий.
11. ТУ 5262-101-02494680-99. Конструкции металлической облицовки потолков и стен зданий.
12. Чертежи к общему прайс-листу по состоянию на 01.05.2011 г. Гнутый профиль из рулонной холоднокатаной стали, включая сталь с покрытиями ОАО «Ульяновский НИАТ».
13. Ковалев, В. Секреты стальной двери (особенности конструкции и установка) / В. Ковалев // Идеи вашего дома. – 2005. – №4.
14. Филимонов, А. В. Совершенствование технологии производства полужакрытых профилей в роликах методом интенсивного деформирования. Дисс. канд. техн. наук: 05.03.05. – Ульяновск : УлГТУ, 2008.
15. Филимонов, С. В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – С. 24.
16. Электронный ресурс. – Режим доступа : <http://worldprofile.ru>.



- **Карпов Сергей Александрович**, аспирант кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета

ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ ОЧЕРЕДНОГО СБОРНИКА

Строгое соответствие тематике сборника!!!

Текст:

- Текст статьи – формат Microsoft Word 2003.
- Объем статьи – от 4 до 12 стр.
- Форматирование:
 - лист А4 в одну колонку;
 - поля – по 20 мм с каждой стороны;
 - интервал межстрочный – **одинарный**;
 - выравнивание – по ширине страницы;
 - отступ первой строки абзаца – 12,7 мм;
 - шрифты: Times New Roman, кегль 14, цвет – черный.

Оформление:

- Первая строка – УДК (прописными, слева);
- Вторая строка – Название статьи (прописные, жирный, по центру);
- Третья строка – Фамилия, И.О., ученая степень, звание (строчные, обычный, по центру), соавторы – через запятую;
- Четвертая строка – пустая;
- Пятая строка и последующие – текст статьи;
- В конце статьи – одна строка пустая;
- Далее – «Библиографический список» (строчные, обычный, по центру);
- Далее – Список нумерованных цитируемых источников (отступ – 12,7 мм).

Формулы:

- Редактор – Equation Editor в составе Word;
- Выравнивание: номера формул – по правому краю; сами формулы – посередине;
- Ссылки на приведенные формулы обязательны;
- Формат формул – стандартный для Word;
- Расшифровка обозначений – в строку (без образования абзаца для каждого символа).

Таблицы:

- Стандартное оформление: «Таблица N» (по правому краю); название, таблица (заголовки таблицы – опция – «с переносом на следующую строку»); шрифт обычный; выравнивание в ячейках – по усмотрению автора.

Рисунки (исполнение – по ЕСКД):

- Вставка через буфер или из файла (кроме рисунков встроенного графического редактора Word);
- Четкость в черно-белом исполнении при распечатке в масштабе 50% (2 стр./лист);
- Символы на рисунке должны примерно иметь высоту букв основного текста;
- Нумерованные подрисуночные надписи во вставной рамке (например, «Рис. 1. Схема...»). Шрифт надписи – Times New Roman, кегль 12, выравнивание по левому краю;
- Вставная рамка должна быть сгруппирована с рисунком;
- Обтекание – «вокруг рамки», для широких рисунков – «сверху и снизу»;
- Ссылки на рисунки обязательны, их расположение – выше рисунка по тексту.

Библиографический список:

- по ГОСТ 7.1–2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления». – М. : Книжная палата, 2003. – 192 с.

- Примеры:

1. Филимонов, В. И. Условия замыкания калибров при интенсивном формообразовании открытых профилей в роликах / В. И. Филимонов, С. В. Филимонов // Производство проката. – 2004. – №11. – С. 23 – 29.

2. Филимонов, С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов – Ульяновск : Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 246 с.

3. Патент 2228232 РФ, МПК7 В 21 D 5/06. Способ изготовления широкополочных швеллерных и корытных симметричных тонкостенных профилей в роликах / В. И. Филимонов, В. А. Марковцев, С. В. Филимонов. – Оpubл. 10.05.04. Бюл. № 13.

4. Технологичность конструкции изделия: Справочник / под ред. Ю. Д. Амирова. – М. : Машиностроение, 1990. – 768 с.

Аннотацию (до 15 строк) с оформлением по образцу статьи поместить в конец файла после сведений об авторах (ФИО, степень, звание, место работы, должность, телефон, e-mail).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в сборнике статьи дают представление об уровне исследований и их направленности. Следует отметить что в последнее десятилетие выполнен цикл исследований и разработок в рамках метода интенсивного деформирования:

- классификация гнутых профилей по типам и по видам элементов жесткости;
- классификация дефектов гнутых профилей в пределах определенных типов профилей (уголковых, зетовых, корытных, С-образных, полужакрытых, закрытых и других);
- классификации профилировочного оборудования и технологического оснащения по характеристикам врезки профиля в тело ролика и замыкания калибров;
- исследование условий потери устойчивости элементов профиля;
- исследование схем формообразования, выбора базового элемента и оси профилирования;
- применение межклетевых проводок;
- исследование процессов перфорации и формообразование перфорированных заготовок;
- исследование формовки многоэлементных полужакрытых и закрытых профилей;
- разработка основного профилировочного и вспомогательного оборудования.

С некоторыми результатами работ по указанным направлениям читатель мог ознакомиться в представленном сборнике.

В 2010 году научной школе «Интенсивное формообразование гнутых профилей методом интенсивного формообразования», объединяющей сотрудников Ульяновского государственного технического университета, ОАО «Ульяновский НИАТ», ООО «Спецтехнология», НПО «ИДМ», был присвоен статус ведущей научной школы Ульяновской области по результатам областного конкурса в области технических наук.

В рамках научной школы защищены 2 докторских и 6 кандидатских диссертаций. Оборудование и технологии интенсивного формообразования внедрены на сотнях промышленных предприятий Российской Федерации. Ежегодно на отечественных рынок поставляется до 30 автоматических линий и до 300 технологий.

Научное издание

**ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ:
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА. (2011 г.)**

Сборник научных трудов

Редактор М. В. Штаева
Технический редактор В. Н. Кокорин

ЛР №020640 от 22.10.97.
Подписано в печать 26.12.2012. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 9,77. Тираж 100 экз. Заказ 98.

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.