

Таким образом, холодная пластическая деформация с малыми обжатиями, сопровождающими асимметричную дрессировку, интенсифицирует коррозионное разрушение низкоуглеродистой стали с цинковым покрытием; асимметричная дрессировка создает предпосылки для различий в коррозионной устойчивости сторон листовой стали с покрытиями, обращенных к валкам разных диаметров, что должно быть учтено при аттестации и назначении стали для металлоизделий.

Список литературы

1. Алимов В.И., Штырно А.П. Влияние холодной деформации на склонность к окислению стали 12X18H10T // Защита металлов, 1983. — № 5. — С. 792–793.
2. Алимов В.И., Березин А.В. Влияние борного ангидрида на защитные свойства цинкового покрытия на стали // Защита металлов, 1985. — № 5. — С. 796–797.
3. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справ. изд. / О.А.Баннх, П.Б.Будберг, С.П.Алисова и др. — М.: Металлургия, 1986. — 440 с.

Алимов В.И., Байков Е.В., 2001

КОНОВАЛОВ Ю.В. (ДОНГТУ), ГОРИН А.Н. (ДИХТ), АНОХИНА И.Ю. (ДОНГТУ)

СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРОКАТА*

Разработан метод расчета силы и параметров профилирования сложных несимметричных профилей с учетом химического состава стали, наклепа металла, утонения участков подгибки и углов пружинения.

Изготовление гнутых профилей на профилегибочных станах началось в США в 1910 г., в Западноевропейских странах и в СССР — в 1925—1932 г.г., в Японии — в 1958 г. Производство гнутых профилей развивалось очень быстро, что обусловлено тем, что профилирование во много раз производительнее гибки на прессах и обладает рядом преимуществ по сравнению с прокаткой: возможность получения профилей с рациональным распределением металла по сечению с точки зрения обеспечения максимальной жесткости и прочности профиля при минимальном расходе металла; высокая точность размеров, позволяющая использовать их в машиностроении и строительстве без дополнительной обработки; возможность изготовления профилей с формой сечения, заменяющих набор горячекатаных профилей, что сокращает расход металла и исключает операции сварки, клепки и др.; относительно малая толщина стенок профиля, которую во многих случаях невозможно получить прокаткой. Граничные размеры гнутых профилей составляют по толщине 0,3–13 мм, по ширине — 30–1650 мм. Еще одним достоинством гнутых профилей является то, что они обладают повышенной прочностью при статических нагрузках на 15% по сравнению с катаными профилями за счет наклепа, возникшего при профилировании металла [1–5].

За счет указанных достоинств способа получения профилей гибкой, а также того, что профилирование можно совмещать в одной линии с другими процессами (продольной сваркой, перфорацией, гибкой готового профиля по дуге и др.), возникает высокая эффективность как производства, так и применения гнутых профилей [6]. В работе [3] приведены такие цифры: по всем отраслям народного хозяйства бывшего СССР эффективность на 1 т гнутых профилей составляла 23,7 руб., в том числе 13,05 руб. за счет экономии 166 кг металла.

* В экспериментальной части работ участвовали сотрудники ДонГТУ Будакова С.А., Байков Е.В., Митьев А.П.

Материал гнутых профилей — сталь, цветные металлы, сплавы, в том числе с антикоррозионными и декоративными покрытиями.

Высокопроизводительные агрегаты для производства гнутых профилей в СССР начали строить с 1959 г. Было создано четыре центра по массовому производству гнутых профилей широкого сортамента. Это металлургические предприятия «Запорожсталь», Череповецкий и Магнитогорский комбинаты, завод «Амурсталь». На них достигнуты скорости профилирования 150–180 м/мин.

Сортамент гнутых профилей, изготавливаемых на территории Украины и России свыше 1000 типоразмеров.

На высокопроизводительных станах гнутых профилей, действующих в составе металлургических предприятий производят профили общего назначения (уголки равнополочные и неравнополочные, швеллеры, перфорированные, корытные, зетовые, С-образные, замкнутые и замкнутые сварные прямоугольные и квадратные) большими партиями. Для таких агрегатов характерно использование заготовки в виде рулона. Во многих случаях рулоны перед профилированием сваривают в бесконечную полосу, а порезку производят уже после профилирования.

Гнутые специальные профили — профили особой конфигурации индивидуального назначения. Их производят на специализированных станах, имеющих узкий сортамент (часто — всего один профиль). Такие станы строят на машиностроительных заводах, в том числе и автомобильных, заводах металлоконструкций, бытовой техники и других. В том случае чаще всего используют агрегаты поштучного профилирования.

Состав оборудования профилегибочных агрегатов обусловлен их назначением, характером процесса и производительностью. Оборудование делится на три основных участка: подготовки заготовки к профилированию, профилирования и отделки продукции. Наиболее полный набор механизмов таков: разматыватель с загрузочным устройством, листопрямляющая машина, ножницы, сварочная машина с гратоснимателем, накопитель, тянущие ролики, профилегибочный стан, устройство для порезки профилей, укладчик. Из представленного перечня ясен технологический процесс производства гнутых профилей.

В настоящее время достигнут высокий уровень технологии, оборудования и автоматизации профилегибочных станков. Пожалуй, одним из немногих направлений заметного совершенствования оборудования и технологического процесса является предложение отказаться от группового привода валков профилегибочного стана и реализовать процесс профилирования протяжкой. Стан для профилирования протяжкой включает тянущую формирующую клетку (последняя клетка стана) с приводными валками и несколько формирующих клеток с парами неприводных валков. Эксперименты показали, что при новом способе потребляемая приводом стана мощность снижается на 37,6%, упрощается конструкция стана и его масса [7–9].

По нашему мнению этот способ подходит для производства несложных профилей на станах непрерывного профилирования. На станах поштучного профилирования он вызывает дополнительные отходы металла за счет некачественно сформированного переднего конца.

Особенностью процесса профилирования является то, что площадь поперечного сечения заготовки практически не изменяется, формируемая заготовка подвержена продольным деформациям и напряжениям. Деформация металла начинается значительно раньше, чем участок заготовки войдет в контакт с валками. Перемещение заготовки происходит за счет тянущих усилий, создаваемых вращающимися валками (последнее в отличие от гибки в штампах и волочения). В связи с этим достаточно для практики разработанная теория продольной прокатки не может быть применена для процесса получения гнутых профилей.

Установившийся процесс профилирования характеризуется тем, что форма и положение поперечных сечений заготовки в каждой клетке остаются неизменными в течение всего процесса. При достаточно большом удалении друг от друга формирующего инструмента (следующих друг за другом пар валков) формирование заготовки начинается до непосредственного контакта с валками за счет деформируемого участка заготовки в валках в силу сплошности металла, который сопротивляется деформированию, но тем не менее передает деформацию каждому позади лежащему участку. Это, так называемый, участок плавного перехода.

Схема участка плавного перехода (очага деформации) при профилировании швеллера и график изменения угла подгибки и относительного радиуса изгиба в соответствии с работами [2, 3, 10] приведены на рис.1.

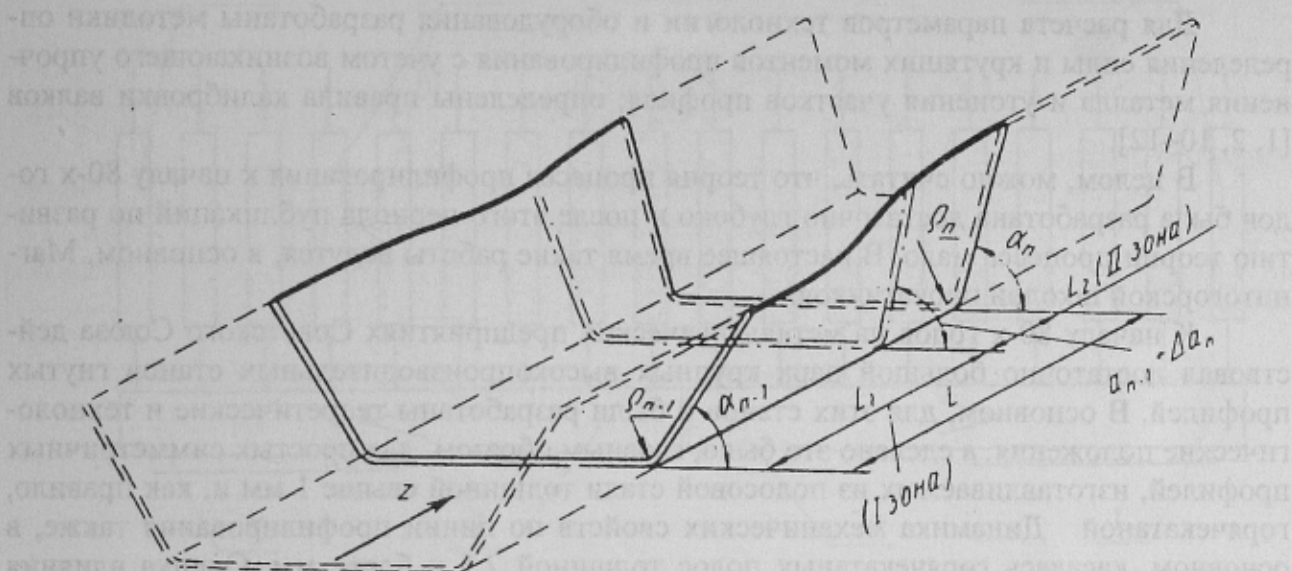


Рис. 1. Схема участка плавного перехода при профилировании швеллера в промежуточной клетке стана; L, L_1, L_2 — длины: общая и зон деформации; α — угол подгибки; ρ — радиус кривизны

На участке плавного перехода непрерывно изменяется угол подгибки элементов профиля и радиус кривизны в местах изгиба.

Момент внутренних сил, возникающих на участке плавного перехода, не уравновешивает момент внешних сил, приложенных к полосе со стороны валков. Поэтому за осевой плоскостью валков подгибка полок продолжается. На этом процесс образования зоны I участка плавного перехода, в котором наблюдается монотонный рост угла подгибки, заканчивается.

При дальнейшем движении полосы длина части очага деформации, расположенной за осевой плоскостью валков, увеличивается, а угол подгибки начинает уменьшаться. Начинает образовываться зона II участка плавного перехода, характеризующаяся уменьшением угла подгибки — происходит упругая разгрузка мест изгиба. Формоизменение переднего конца полосы также носит упругий характер.

В процессе упругой разгрузки внутренние напряжения перераспределяются, и при некоторой длине участка плавного перехода, находящейся за осевой плоскостью валков, уменьшение угла подгибки прекращается — процесс разгрузки для переднего конца полосы закончился, длина зоны II участка плавного перехода больше не увеличивается и за ее пределами во всех поперечных сечениях внутренние напряжения взаимно уравновешены.

Таким образом, образовался стабильный участок плавного перехода, состоящий из двух зон. При дальнейшем движении полосы он сохраняет свою форму и размеры.

Остается неизменным также распределение деформаций и напряжений на всем участке плавного перехода, что свидетельствует об установившемся процессе профилирования [10].

Отдельные фрагменты теории, а точнее расчета параметров профилирования появились в 30-х годах прошлого века, но наиболее интенсивно теория профилирования начала развиваться в 50-х годах. Основным центром развития ее стала Санкт-Петербургская школа прокатчиков во главе с К.Н.Богоявленским, а несколько позже — Московская (Г.Я.Гун). С 70-х годов развитие теории, технологии и оборудования надолго перешло в г. Харьков (Украинский научно-исследовательский институт металлов). Руководителем направления был И.С.Тришевский.

Весь накопленный предшественниками опыт был харьковчанами систематизирован, углублен, а главное теория, технология и создание оборудования были логически объединены в последовательный процесс.

Для расчета параметров технологии и оборудования разработаны методики определения силы и крутящих моментов профилирования с учетом возникающего упрочнения металла и утонения участков профиля; определены правила калибровки валков [1, 2, 10–12].

В целом, можно считать, что теория процесса профилирования к началу 80-х годов была разработана достаточно глубоко и после этого периода публикаций по развитию теории процесса мало. В настоящее время такие работы ведутся, в основном, Магнитогорской школой прокатчиков.

К началу 80-х годов на металлургических предприятиях Советского Союза действовал достаточно большой парк крупных высокопроизводительных станов гнутых профилей. В основном, для этих станов и были разработаны теоретические и технологические положения, а сделано это было, главным образом, для простых симметричных профилей, изготавливаемых из полосовой стали толщиной свыше 1 мм и, как правило, горячекатаной. Динамика механических свойств по линии профилирования также, в основном, касалась горячекатаных полос толщиной 2,5 и более мм. Оценка влияния химического состава стали на механические свойства металла обычно не учитывается.

В Украине крупные станы гнутых профилей действуют на комбинате «Запорожсталь», и можно с уверенностью сказать, что в условиях резкого снижения внутренней потребности в металлоизделиях, в ближайшие 10 лет крупных станов гнутых профилей не понадобится.

В последние годы появилась четкая тенденция установки станов гнутых профилей на машиностроительных заводах, заводах, изготавливающих бытовую технику, стройдетали и пр. Характерной особенностью этих станов является узкий сортамент профилей на каждом из них, но во многих случаях поперечное сечение их имеет сложную несимметричную форму, а часто еще и участки двойной толщины, получаемые двухстадийной гибкой. Заготовкой в большинстве случаев является холоднокатаная стальная полоса толщиной менее 1 мм. Производительность таких станов в 5–10 раз ниже, чем на металлургических предприятиях.

Теории и методик расчета параметров профилирования на таких станах практически нет. Они выбираются опытным путем, что вызывает большие потери металла, а используемые режимы не оптимальны.

В связи с этим в ДонГТУ и ДИХТе была поставлена и решена задача математического обеспечения расчета параметров профилирования станом, производящих сложные несимметричные профили.

Для изготовления боковых панелей бытовых холодильников на ЗАО «Группа «Норд» был смонтирован восемнадцатиклетевой профилегибочный стан (рис.2).

Клетки стана открытого типа, установлены на металлическом фундаменте на расстоянии 270 мм друг от друга. Привод валков — от двух электродвигателей мощностью

по 7,5 кВт и номинальной скоростью вращения $n=1500$ об/мин. Первый электродвигатель установлен под клетью I и предназначен для привода во вращение валков I–IX клетей, второй — под клетью XVIII — приводит во вращение валки X–XVIII клетей. Уравновешивание валков пружинное. Валки наборные. Диаметр цилиндрической части валков в каждой последующей клетке больше, чем в предыдущей на 0,1 мм. Это позволяет создать стабильное натяжение полосы между клетями. Подушки подшипников валков имеют две П-образные проточки, которыми они надеваются на направляющие в станине. Это позволяет им воспринимать горизонтальную силу при профилировании и не изменять зазоры в калибровке валков.

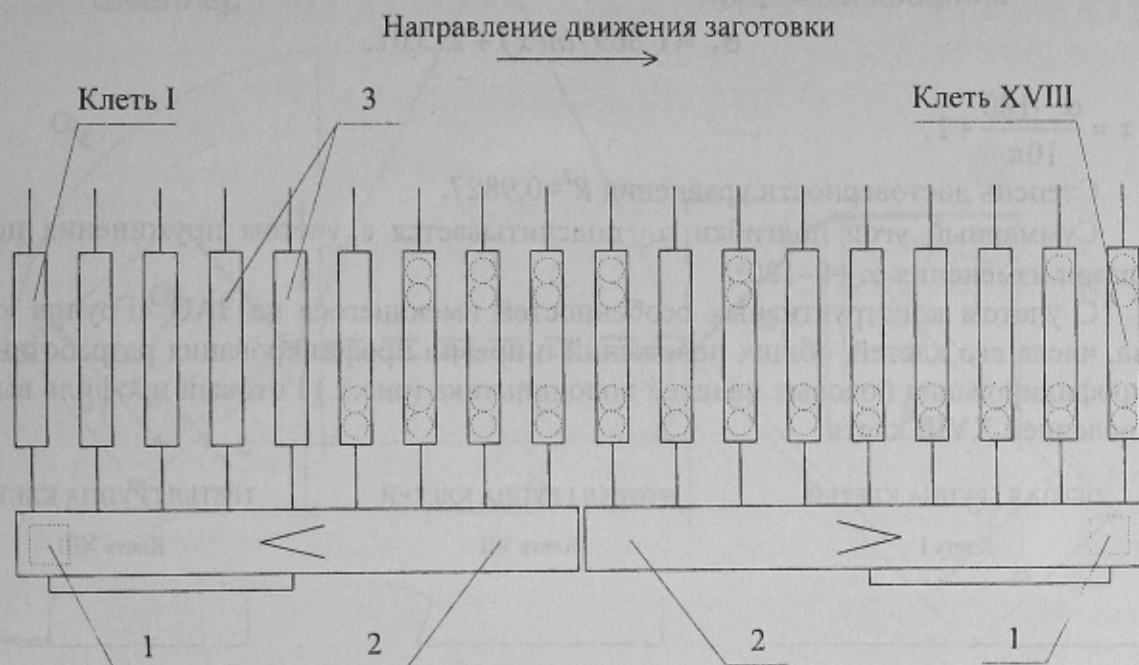


Рис. 2. План расположения оборудования восемнадцатиклетевого профилигибочного стана для изготовления боковых панелей бытовых холодильников: 1 — двигатели; 2 — шестеренные клетки; 3 — рабочие клетки с горизонтальными и вертикальными (показаны пунктиром) валками

Из рис.2 видно, что в последних 13 клетях имеются одна или две пары вертикальных валков.

На стане производят всего один профиль листным способом. Заготовкой является холоднокатаный лист толщиной 0,7 мм из стали марок 08пс и 08Ю.

В результате выполненных ранее исследований было установлено, что имеющий место разброс механических характеристик исходной заготовки не позволяет гарантированно получать корпусные детали холодильников, изготавливаемые холодным профилированием, требуемой точности. Следовательно, фактор химического состава следует учитывать как при калибровке валков, так и при настройке профилигибочного стана. В связи с этим нами была поставлена и решена задача прогнозирования механических свойств исходной заготовки в зависимости от содержания химических элементов в стали [13].

Получены уравнения регрессии для расчета предела текучести σ_T , Н/мм²; сопротивления разрыву, относительного удлинения, глубины сферической лунки. Поскольку для определения силы и маршрутов профилирования необходим главным образом показатель σ_T , то его мы и представляем ниже.

Для стали 08Ю:

$$\sigma_T = 225,15 + 1,42C - 1,9Mn - 0,45Si - 0,01S + 0,3P - 2,3Cu - 0,35Ni + 2,83Cr - 0,05Al.$$

Для стали 08пс:

$$\sigma_T = 200,7 - 0,59C - 0,28Mn + 0,653Si + 0,119S + 0,137P + 0,048Cu - 0,21Ni + 0,033Cr + 0,244Al.$$

Средняя погрешность расчетов σ_T по приведенным уравнениям составляет 5,14%, что вполне допустимо как для расчета калибровки валков, так и корректировки их настройки.

Для оценки влияния наклепа на σ_T в зависимости от углов α_C подгибки профиля по клетям стана получено уравнение

$$\sigma_T = 6,569 \cdot \ln(x) + 213,01,$$

где $x = \frac{\alpha_C \cdot 180}{10\pi} + 1.$

Степень достоверности уравнения $R^2=0,9827.$

Суммарный угол подгибки α_C подсчитывается с учетом пружинения полосы. Диапазон изменения $\alpha_C=0-180^\circ.$

С учетом конструктивных особенностей имеющегося на ЗАО «Группа «Норд» стана, числа его клетей, общих положений и правил профилирования разработана схема профилирования боковых панелей холодильника (рис.3.) Готовый профиль выходит из последней XVIII клетки.

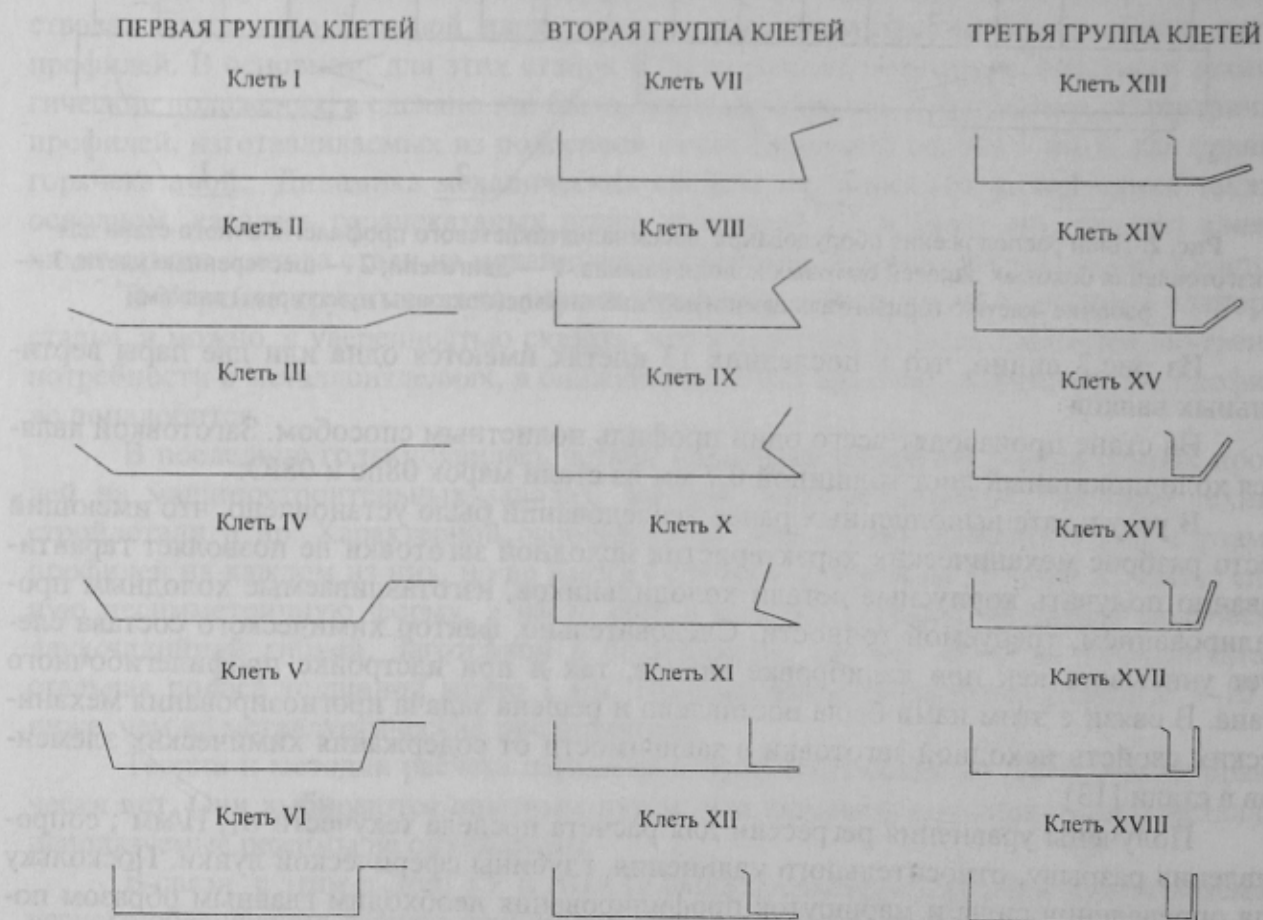


Рис. 3. Схема профилирования полосы

Из рис.3 видно, что необходимый профиль сложен и несимметричен. При разработке математической модели силы профилирования такого профиля использована методика расчета силы профилирования для простых профилей, изложенная в работах [1, 2, 10]. Сложный несимметричный профиль условно разбивали на простые элементы и

принимали условие аддитивности, то есть допускалась возможность суммирования сил, рассчитываемых для различных элементов профиля.

При этом клетки по характеру гибки были разбиты на три группы (см. рис.3).

В первой группе клеток (клетки II–VI, первая клетка задающая и она в модели не учтена) профиль рассмотрен как состоящий из двух частей: швеллер (левая часть) и корытный профиль (правая часть).

Профили полосы во II и VI клетях с обозначениями элементов показаны на рис.4.

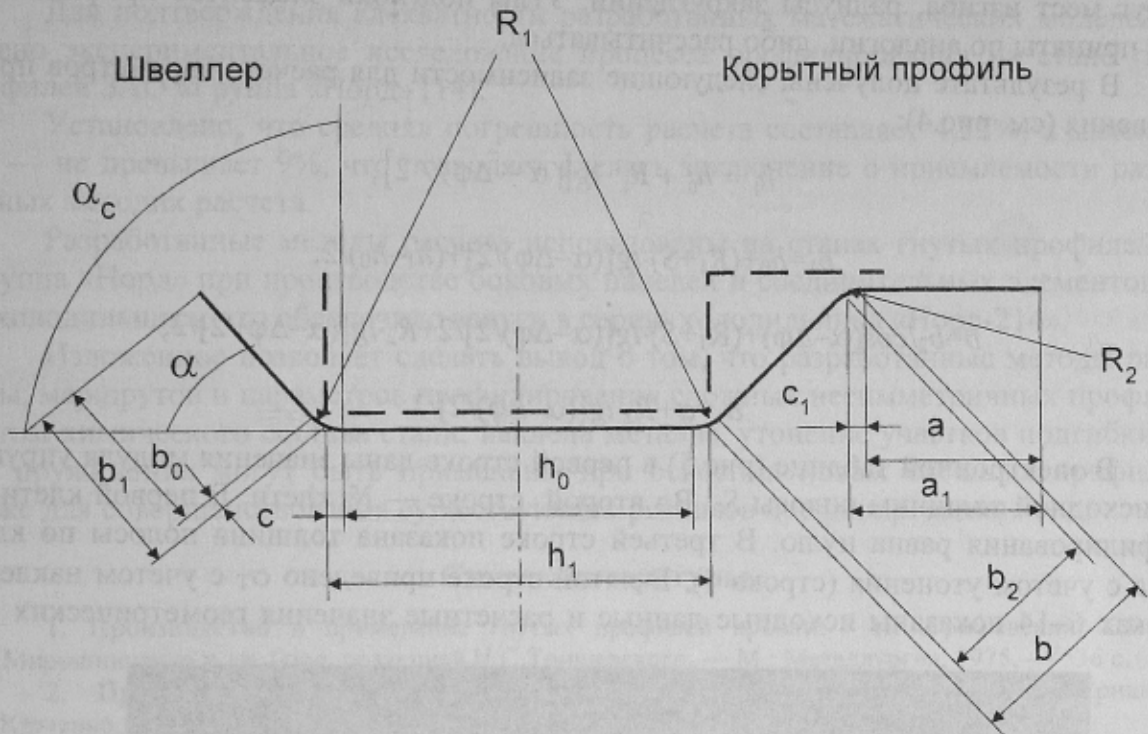


Рис. 4. Профиль полосы во II (сплошная линия) и в VI (пунктирная линия) клетях

Для левой части получено:

$$P_1 = \frac{\sigma_m \cdot S^2}{4} \cdot \left[\ln \frac{h_1 - c}{c} \cdot \left(\frac{b_1}{c} \right)^{\cos \alpha_c} \right] + 1,76 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \cdot S^{2,6} \times$$

$$\times \left(\frac{b_1^2 - c^2}{b_1^{2,6}} \cdot \cos \alpha_c + \frac{h_0}{h_1^{1,6}} \right).$$

Для правой части:

$$P_2 = \frac{\sigma_T \cdot S^2}{4} \cdot \ln \left[\frac{a_1 \cdot (h_1 - c)}{c^2} \cdot \left[\frac{\left(\frac{\sigma_T \cdot b^{1,6}}{7,04 \cdot 10^{-4} \cdot E \cdot \alpha^{1,4} \cdot S^{0,6}} \right)^2 \cos \alpha_c}{c \cdot b - c^2} \right] \right] + 1,76 \cdot 10^{-4} \times$$

$$\times E \cdot \alpha^{1,4} S^{2,6} \times \left[4 \cdot \cos \alpha_c \left(\frac{1}{4 \cdot b^{0,6}} + \frac{c \cdot b - c^2}{b^{2,6}} \right) + \frac{h_0}{h_1^{1,6}} + \frac{a_1^2 - c_1^2}{a_1^{2,6}} \right] - \sigma_T \cdot S^2 \cdot \cos \alpha_c.$$

где S — текущая толщина полосы, мм; E — модуль упругости; σ_T — текущее значение наклепа металла; α_c — суммарный угол подгибки (подсчитывается с учетом пружинения полосы).

Остальные обозначения видны из рис. 4.

При разработке методики расчета калибровки валков в качестве исходных данных приняты: ширина заготовки, число профилирующих клеток, форма и размеры готового профиля, толщина полосы и величина прямолинейных участков между центрами дуг мест изгиба, радиусы закруглений. Углы подгибки элементов профиля могут быть приняты по аналогии, либо рассчитываться.

В результате получены следующие зависимости для расчета параметров профилирования (см. рис.4):

$$h_1 = h_0 + R_1 \cdot \operatorname{tg}[(\alpha - \Delta\varphi) / 2];$$

$$b_1 = b_0 + (R_1 + S) \cdot \operatorname{tg}[(\alpha - \Delta\varphi) / 2] + (h_1 - h_0) / 2;$$

$$b = b_2 / \cos(\alpha - \Delta\varphi) + (R_1 + S) \cdot \operatorname{tg}[(\alpha - \Delta\varphi) / 2] / 2 + R_2 \cdot \operatorname{tg}[(\alpha - \Delta\varphi) / 2] / 2;$$

$$a_1 = a + R_2 \cdot \operatorname{tg}[(\alpha - \Delta\varphi) / 2] / 2.$$

В электронной таблице (рис.5) в первой строке даны значения модуля упругости E и исходной толщины полосы S_0 . Во второй строке — № клетки. В первой клетке сила профилирования равна нулю. В третьей строке показана толщина полосы по клетям стана с учетом утонения (строка 4). В пятой строке приведено σ_T с учетом наклепа. В строках 6–14 показаны исходные данные и расчетные значения геометрических пара-

	A	B	C	D	E	F
1		E=21000			S0=0,7	
2	№ клетки	2	3	4	5	6
3	S	0,6985	0,6974	0,6965	0,6957	0,6950
4	Утонение sigma	0,0015	0,0026	0,0035	0,0043	0,0050
5	h0	28,70	32,07	34,31	35,99	37,34
6	h1	515,00	515,32	515,57	515,85	516,21
7	c	0,09	0,04	0,04	0,04	0,04
8	h1	515,18	515,40	515,65	515,94	516,29
9	c1	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
10	b0	31,16	31,33	31,54	31,80	32,13
11	b1	31,25	31,37	31,58	31,84	32,17
12	b	28,02	27,96	27,93	27,90	27,87
13	a	30,20	30,20	30,20	30,20	30,20
14	a1	30,24	30,24	30,24	30,24	30,24
15	alfa, град.	18	18	18	18	18
16	Угол пружинения	3,53	3,94	4,21	4,42	4,58
17	alfa - пружинение, град.	14,47	14,06	13,79	13,58	13,42
18	alfa - пружинение, рад.	0,2526	0,2454	0,2406	0,2370	0,2342
19	alfa c, град.	18	36	54	72	90
20	alfa c - пружинение, рад.	0,25	0,56	0,87	1,18	1,49
21	P1	303,76	339,69	436,25	528,09	395,70
22	P2	553,02	640,97	885,20	1108,96	795,99
23	Итого	856,78	980,67	1321,46	1637,05	1191,69
24						
25						

Рис. 5. Электронная таблица для силы профилирования во II–VI клетях

метров формуемого профиля. В строках 15 и 19 приведены соответственно углы подгибки (маршрут профилирования) и суммарный угол профилирования в каждой клетки. В строке 16 дан расчетный угол пружинения, а в строках 17, 18 и 20 — фактический угол подгибки с учетом пружинения в градусах и радианах. В строках 21–23 приведены значения сил профилирования.

Аналогично выполняются расчеты силы и параметров профилирования для других групп клеток. Все расчеты выполнены в Microsoft EXCEL, а результаты представлены в виде электронных таблиц (см. рис.5).

Для подтверждения адекватности разработанных математических моделей проведено экспериментальное исследование процесса профилирования на стане гнутых профилей ЗАО «Группа «Норд» [14].

Установлено, что средняя погрешность расчета составляет 4,25%, а максимальная — не превышает 9%, что позволяет сделать заключение о приемлемости разработанных методик расчета.

Разработанные методы расчета использованы на станах гнутых профилей ЗАО «Группа «Норд» при производстве боковых панелей и соединительных элементов шкафа холодильника, что обеспечило запуск в серию холодильника «Норд-214».

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что разработанные методы расчета силы, маршрутов и параметров профилирования сложных несимметричных профилей с учетом химического состава стали, наклепа металла, утонение участков подгибки и углов пружинения могут быть применены при освоении новых сложных профилей, а также для совершенствования существующих режимов профилирования.

Список литературы

1. **Производство** и применение гнутых профилей проката / И.С.Тришевский, Г.В.Донец, В.И.Мирошниченко и др. / под редакцией И.С.Тришевского. — М.: Металлургия, 1975. — 536 с.
2. **Производство** гнутых профилей (оборудование и технология) / И.С.Тришевский, А.Б.Юрченко, В.С.Марьин и др. — М.: Металлургия, 1982. — 384 с.
3. **Технология** прокатного производства. В 2-х книгах. Кн.2. Справочник / М.А.Беняковский, К.Н.Богоявленский, А.И.Виткин и др. — М.: Металлургия, 1991. — 423 с.
4. **Березовский С.Ф., Кропылев Ф.М.** Производство гнутых профилей — М.: Металлургия, 1978. — 152 с.
5. **Griffin E.** Production of bent profiles from strip and sheet materials. P.II. Residual stresses in coldly bent profiles, their causes and influence on constructions designed from them // Proc. 2nd Int. Conf. Rotary Metalwork, Process., Stradfortupon — Avon, 6–8 Oct., 1982. Kempston. — P. 227–246.
6. **Hisashi J.** Economic aspects of cold roller sheet forming // Jap. Soc. Technol. Plast, 1978. — V.19. — N 215. — P. 994–998.
7. **Игнатенко А.П.** Совершенствование приводов профилегибочных станов // Сталь, 1995. — № 5. — С. 57–60.
8. **Игнатенко А.П.** Снижение энергозатрат при производстве гнутых профилей // Сталь, 1993. — № 7. — С. 44–47.
9. **Исследование** деформированного состояния металла при нетрадиционных способах профилирования / А.П.Игнатенко, А.М.Смоляров, Н.П. Славинский и др. // Бюл. НТИ «Черная металлургия», 1996. — № 1. — С. 13–19.
10. **Тришевский И.С., Докторов М.Е.** Теоретические основы процесса профилирования. — М.: Металлургия, 1980. — 288 с.
11. **Тришевский И.С., Клепанда В.В.** Механические свойства гнутых профилей проката. — К.: Техніка, 1977 — 143 с.
12. **Калибровка** валков для производства гнутых профилей проката / Тришевский И.С., Мирошниченко В.И., Стукалов В.П. и др. — К.: Техніка, 1980 — 168 с.
13. **Коновалов Ю.В., Анохина И.Ю., Горин А.Н.** Статистическое прогнозирование свойств холоднокатаного металла в зависимости от его химического состава // Металл и литье Украины, 1999. — № 1–2. — С. 50–52.
14. **Коновалов Ю.В., Горин А.Н.** Экспериментальное исследование силовых параметров формирования боковых панелей бытовых холодильников // Металлургическая и горнорудная промышленность, 1999. — № 6. — С. 33–37.