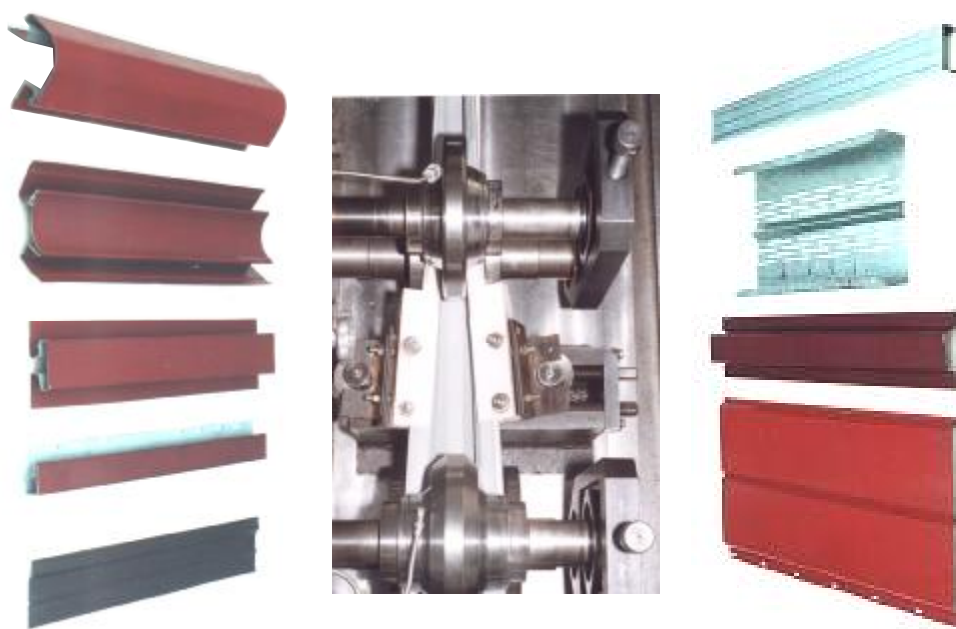


М.В. Илюшкин, В.И. Филимонов

**Интенсивная технология
производства гнутых профилей
из материалов с покрытием
в роликах**



Ульяновск

2006

**ОАО “Ульяновский НИАТ” –
Научно-исследовательский институт авиационной технологии и
организации производства**

Ульяновский государственный технический университет

М.В. Илюшкин, В.И. Филимонов

**Интенсивная технология
производства гнутых профилей
из материалов с покрытием
в роликах**

Ульяновск – 2006

УДК 621.7
ББК 22.251
Ф53

Рецензенты:
доктор технических наук, доцент Н.А. Красильников,
кандидат технических наук В.А. Марковцев

Одобрено редакционно-издательским советом университета

Илюшкин М.В., Филимонов В.И.

Ф53 Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием в роликах / М.В. Илюшкин, В. И. Филимонов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ «Венец», 2006. – 198 с. : илл.

ISBN 5 – 89146 – 500 – 0

Книга предназначена для аспирантов специальности 05.03.05 «Технологии и машины обработки давлением» и разработчиков технологии интенсивного формообразования гнутых профилей в роликах, а также может быть полезна технологам и конструкторам, работающим в области профилирования, и студентам, специализирующимся в области обработки металлов давлением.

Работа подготовлена на кафедре «Материаловедение и обработка металлов давлением» УлГТУ и в НПК-100 ОАО «Ульяновский НИАТ».

УДК 621.7
ББК 22.251

Научное издание

ИЛЮШКИН Максим Валерьевич, ФИЛИМОНОВ Вячеслав Иванович

ИНТЕНСИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ
ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ В РОЛИКАХ

Редактор Н. А. Евдокимова
Технический редактор И.М. Колганов

Подписано в печать . . . 2006. Формат 60 × 84/16. Бумага тип. №1.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 150 экз. **Заказ** .

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32
Типография УлГТУ «Венец», 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32

© Илюшкин М.В., Филимонов, В.И.
© Оформление УлГТУ, 2006

ISBN 5 – 89146 – 500 – 0

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОИЗВОДСТВА ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ.....	7
1.1. Виды и характеристика покрытий листовых материалов.....	7
1.2. Испытания листовых материалов с покрытием.....	14
1.3. Область применения профилей с покрытием.....	18
1.4. Теоретические исследования процесса формообразования профилей из листового материала с покрытием.....	21
1.5. Экспериментальные исследования в области технологии формообразования профилей из листа.....	32
1.6. Возможности применения технологических смазок.....	39
1.7. Оборудование и технологическое оснащение для изготовления профилей.....	40
Выводы.....	46
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПРЕДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	48
2.1. Классификация видов воздействия на заготовку при профилировании.....	48
2.2. Исследуемые материалы и критерии оценки качества покрытия.....	51
2.3. Изгиб заготовки с покрытием.....	56
2.4. Моделирование контактных воздействий.....	62
2.5. Обжим заготовки с покрытием в роликах.....	68

Выводы.....	71
ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ.....	73
3.1. Классификатор причин нарушения покрытий и способы их предотвращения.....	73
3.2. Основные допущения при теоретическом рассмотрении процесса.....	75
3.3. Моделирование контакта при профилировании.....	77
3.4. Напряженно-деформированное состояние материала с покрытием в контактной зоне при профилировании.....	89
Выводы.....	96
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ.....	97
4.1. Программа и методика исследования.....	97
4.2. Анализ номенклатуры профилей, подверженных нарушению покрытия; характерные дефекты профилей и основные факторы нарушения покрытия.....	99
4.3. Определение геометрических параметров процесса	108
4.4. Определение предельных геометрических параметров профиля при изготовлении из материала с полиэфировым покрытием.....	113
4.5. Определение минимальных формирующих радиусов на первом переходе.....	118
Выводы.....	123
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ.....	124

5.1. Разработка технологических схем.....	124
5.2. Технологические особенности формовки профилей с элементами жесткости.....	129
5.3. Проектирование и изготовление технологической оснастки....	141
5.4. Отладка процесса формообразования.....	149
5.5. Алгоритм разработки технологии изготовления профилей с покрытием.....	161
Выводы.....	166
ГЛАВА 6 ВНЕДРЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ.....	167
6.1. Характеристики изготавливаемых профилей с покрытием.....	167
6.2. Внедрение технологии на площадях заказчика.....	173
6.3. Применение рассматриваемых профилей с покрытием.....	175
Выводы.....	179
ГЛАВА 7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИС- СЛЕДОВАНИЙ.....	180
7.1. Экономическая эффективность работы.....	180
7.2. Основные направления дальнейших исследований.....	185
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	187
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	189

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий “профильный бум”, наблюдаемый в последнее десятилетие в различных областях производства и строительства, приводит к поиску новых технологических решений и применению новых материалов, обеспечивающих высокое качество изделий при минимальных издержках для их производства.

Широкое применение профилей в строительстве в качестве декоративных стеновых и кровельных панелей наружного исполнения, внутренних декоративных панелей, силовых несущих конструкций, предопределяет требования высоких защитно-декоративных свойств изделий, что достигается применением соответствующих покрытий.

В настоящее время широкое применение находят процессы непосредственного изготовления профилей из листового материала с уже нанесенным в промышленных условиях многослойным покрытием. Такое покрытие обладает высокими прочностными характеристиками, широкой цветовой гаммой и отличной коррозионной стойкостью. Причем, изготовление профиля из такого материала более экономически оправдано, чем нанесение покрытия на уже готовый профиль.

Разработанный в ОАО “Ульяновский НИАТ” метод интенсивного деформирования (МИД) позволяет использовать преимущества, как ранее разработанного метода стесненного изгиба (СИ), так и традиционного профилирования. Интенсивные схемы формообразования позволяют уменьшить число технологических переходов, обеспечить удешевление оборудования, повысить его мобильность, компактность, экономичность, снизить затраты на занимаемые площади, уменьшить время переналадки и др.

Однако, интенсификация процесса приводит к дополнительным воздействиям на заготовку с покрытием при формовке изделия, что проявляется в виде образования дефекта нарушения покрытия на поверхности изделия, снижающий декоративные и защитные свойства профиля.

Выявление условий бездефектной формовки профилей из материала с покрытием, разработка соответствующих математических моделей, технологических приемов и алгоритмов создания соответствующей технологии представляет актуальную проблему в данной области, чему и посвящена данная книга.

ГЛАВА 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОИЗВОДСТВА ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ

1.1. Виды и характеристика покрытий листовых материалов

Покрытия находят широкое применение в защите металлов от коррозии [1, 2, 3]. 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 формирования и сушки покрытия, высоких физико-механических и декоративных свойств, достаточной коррозионной стойкости [3, 4]. Кроме того, покрытие должно быть устойчиво к дальнейшей переработке материала [5, 6]. Данным требованиям удовлетворяют покрытия рулонных материалов, которые можно условно разделить на полимерные и металлические покрытия (рис. 1.1).

1.1.1. Полимерные покрытия

К полимерным относят термореактивные лакокрасочные покрытия (ЛКП), термопластичные покрытия, получаемые из жидкой фазы, и полимерные пленки [3, 4, 7]. К группе термореактивных покрытий относятся акриловые, полиэфирные (ПЭ), полиэфирдендритфторидные (ПЭДФ), эпоксидные (ЭП) и др. покрытия; группу термопластичных покрытий составляют поливинилхлоридные пластизоли (Пл), органополи и сополимеры винилхлорида. Практически все лакокрасочные материалы, применяемые в настоящее время, производят на основе синтетических олигомеров и полимеров [8], что дает основание отнести их также к полимерным покрытиям (ПП). Большинство пленок формуется на основе поливинилхлорида (ПВХ) и полипропилена. Отметим, что с точки зрения технологии профилирования в определенных условиях свойства термореактивных покрытий и свойства термопластичных покрытий могут не различаться.

К основным характеристикам полимерных материалов можно отнести: реологические, технологические, структурные, физико-механические, специальные, декоративные, антикоррозионные и атмосферостойкие свойства [8].

Из физико-механических свойств покрытий (табл. 1.1) наиболее важными свойствами для рассмотрения являются эластичность и прочность покрытия, поскольку именно эти характеристики покрытия обеспечивают способность сопротивляться деформации и выдерживать напряжения при формовке изделия [3]. Из декоративных свойств отметим разнообразный выбор цвета покрытия, а также текстуры, рисунков и блеска покрытий. Из антикоррозионных свойств покрытия – противостояние коррозии под действием различных сред (кислотных, щелочных и др.). Из свойств атмосферостойкости – противостояние тем-

пературным воздействиям, влажности, атмосферным загрязнениям, а также сохранение первоначального вида покрытия.

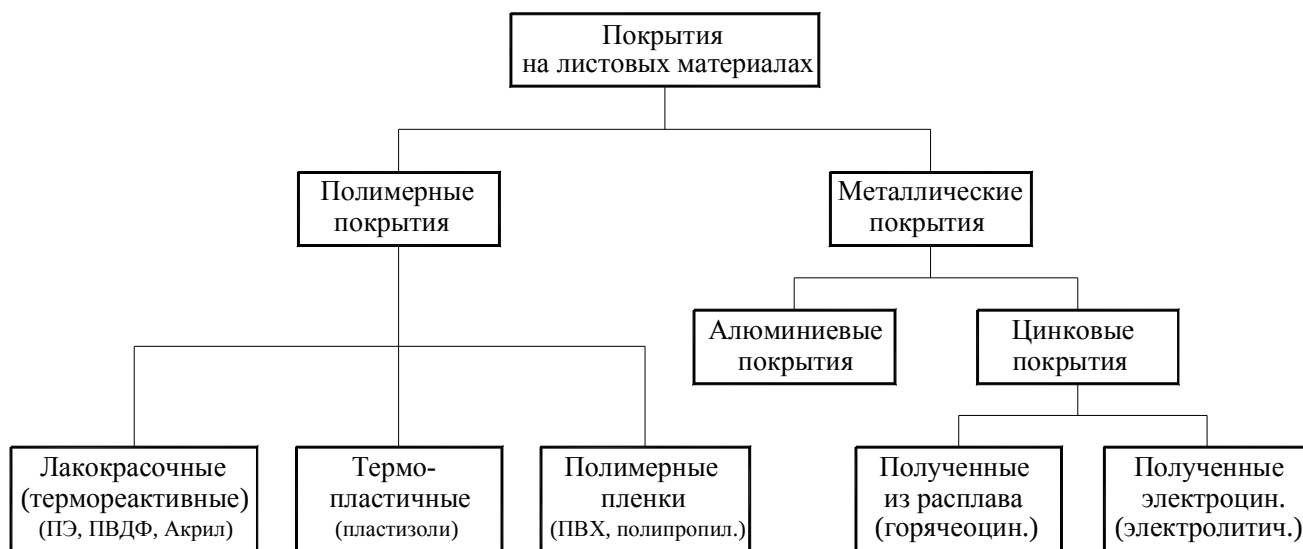


Рис. 1.1. Классификация покрытий на листовых материалах

Таблица 1.1

Основные свойства полимерных покрытий, применяемых на рулонном материале

Покрытия	Физико-механические	Декоративные	Антикоррозионные	Атмосферостойкость
Термореактивные	Низкие (эластичность и прочность)	Высокие (большой выбор цвета и блеска)	Низкая коррозионностойкость	Высокая (отсутствие изменение цвета)
Термопластичные	Высокие (эластичность и прочность)	Низкие (ограниченный выбор цвета и блеска)	Высокая коррозионностойкость	Низкая (изменение цвета*, ограниченность температуры экспл.)
Пленки-ПВХ	Высокие (эластичность и прочность)	Высокие (большой выбор цвета и рисунков)	Высокая коррозионностойкость	Высокая

* - характерно, что светлые тона более устойчивы к воздействию света, чем темные

В настоящее время среди российских производителей материала с полимерным покрытием можно выделить ОАО “Новолипецкий металлургический комбинат (НЛМК)”, АО “Электроцит”, АО “Лысьвенский металлургический комбинат (ЛМЗ)”; среди зарубежных производителей - концерны SSAB (Швеция), Rautaruukki (Финляндия), British Steel (Великобритания).

Толщины полимерных покрытий лицевого слоя материала различных производителей приведены в табл. 1.2, физико-механические и декоративные свойства полимерных покрытий, на материале производимых ОАО “НЛМК” [www.nlmk.ru/rus/product] - в табл. 1.3.

Таблица 1.2

Толщина полимерных покрытий лицевого слоя материала [9]

Фирма производитель	Толщина покрытий, мкм				
	ПЭ	ПВДФ	ПУ	Пл	ПВХ-пленка
ОАО “НЛМК”	10-20	25-60	-	100-250	200-300
АО “Электроцит”	15-25	-	-	-	100-200
АО “ЛМК”	15-25	-	-	100-200	100-200
Концерн “SSAB” (Швеция)	27	27	50	175	100-200
Концерн “Rautaruukki” (Финл.)	25-35	27-40	50	200	-

Таблица 1.3

Физико-механические и декоративные свойства полимерных покрытий, производимых ОАО “НЛМК”

Параметр	Термореактивные покрытия		Термопластичные покрытия
	ПЭ	ПВДФ	Пл
Адгезия, балл ГОСТ 15140-78	0		0
Прочность при обратном ударе, Дж	5-10		10-15
Эластичность по Эриксону, мм	не менее 6		не менее 8
Прочность при изгибе 180°, ГОСТ 30246-94	(3-4)°Т”	(2-3)°Т”	1°Т”
Твердость по карандашу	F-H-2H		F-H
Блеск, %	10-90		20-60
Атмосферостойкость, при ускоренных испытаниях (в солевом тумане), час	500		1000

Термореактивные покрытия обладают высокими декоративными свойствами (большой выбор цвета, блеска) и высокой атмосферостойкостью (устойчивостью к температурным воздействиям). К их недостаткам можно отнести низкую эластичность покрытия, ограничивающую приложение значительных деформаций при переработке материала, и низкую коррозионную стойкость покрытий. Полиэфирное покрытие рекомендуют использовать в декоративных целях в связи с большим разнообразием цвета [10].

Термопластичные покрытия обладают высокой эластичностью и высокой коррозионной стойкостью. Согласно источнику [4], покрытие на основе ПВХ-пластизолов (пластифицированная ПВХ-смола) толщиной 200 мкм является наиболее долговечным при защите рулонного материала и способно выдерживать деформации до 60%. К его недостаткам можно отнести низкие декоративные свойства (малое разнообразие цвета и блеска, низкую стойкость цвета к высоким и низким температурам).

Практически всех недостатков лишены ПВХ-пленки, наклеиваемые на металл (рис. 1.2). Они обладают высокими физико-механическими, декоративными и антикоррозионными свойствами. Однако стоимость листового металла с таким покрытием превышает стоимость материала с покрытиями, получаемыми из жидкой фазы.

Из термореактивных покрытий следует выделить полиуретановые (ПУ) покрытия (полиамид модифицированный с полиуретановой основой) [11], которые обладают свойствами термопластичных покрытий (высокой эластичностью и коррозионной стойкостью) и специально разработаны для прокатной стальной индустрии [12]. Некоторые источники из всех покрытий рекомендуют использовать именно эти покрытия [6], [[www.brest/pl.htm](http://www.brest.pl.htm)].

Пластичность ПВХ, ПУ покрытий выше, чем пластичность ПЭ покрытия, что связано с их структурой и отнесением их к разряду “пластиковых” покрытий [[www.brest/pl.htm](http://www.brest.pl.htm)]. Такие покрытия имеют высокую стойкость к царапанию и образованию задиров, что, в первую очередь, связано с их относительно большей толщиной [13]. Это можно учесть при рассмотрении НДС материала с покрытием, например, на участках контакта с инструментом. Однако твердость и прочность таких покрытий сравнительно низкая, что связано со значительной толщиной покрытия и, следовательно, меньшим влиянием адгезии на верхние слои покрытия [8, 14].

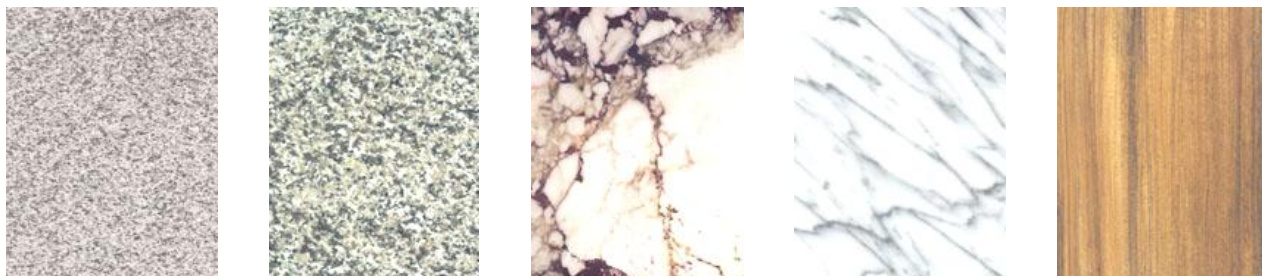


Рис. 1.2. Полимерные пленки (ламинат) на листовых металлах

1.1.2. Металлические покрытия

В большинстве случаев для предварительной защиты металла от коррозии применяют металлические покрытия [15, 16, 17, 18], к которым относят цинковые (Zn), алюминиевые (Al) покрытия, цинкоалюминиевые сплавы (Zn+Al), сплавы на основе цинка (Zn+Fe, Zn+Ni и др.) [19, 20], а также медные, оловянные, оловянно-свинцовые покрытия и др. [9, 18].

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) [17, 21, 22, 23, 24]. Цинковое покрытие, полученное из расплава горячим способом, обладает лучшими защитными свойствами, большей адгезией и прочностью по сравнению с электролитическим покрытием, поэтому около 70 % поверхностей цинкуют из расплавов [25].

За рубежом помимо цинковых покрытий, применяют также его сплавы (Zn+Al, Zn+Fe). Сплав Aluzink (55% алюминия, 43,4% цинка и 1,6% кремния) имеет повышенную коррозионную стойкость (в несколько раз превышает время до появления первой ржавчины по сравнению с Zn покрытием) [26]. А общий объем применения алюминиевого покрытия составляет 10% от применения цинкового покрытия [27].

Долговечность цинкового покрытия зависит от способа получения и среды эксплуатации покрытия. В табл. 1.4 приведено время (в годах) до появления коррозии на подложке с цинковым покрытием [20].

Как видно из табл. 1.4, долговечность цинкового покрытия, полученного горячим способом, выше электролитического той же толщины.

Таблица 1.4

Коррозия на подложке с цинковым покрытием при испытании в открытой атмосфере*

Способ получения цинкового покрытия	Масса покрытия, г/м ² (толщина покрытия, мкм)	Время до появления ржавчины, годы	
		первые признаки	50% ржавчины
Получено из расплава	259-289 (40)	9,3	11
	378-390 (53)	12,1	14,8
	485-497 (68)	13,9	>17
	646-671 (92)	15,5	>17
	793-802 (112)	>17	>17
Получено электролитически	61 (8)	0,1-0,3	0,8
	97,6 (14)	3,0	3,7
	414,8 (57)	7,5	9,5

*-измерение проводились в США, штат Пенсильвания.

Цинковое покрытие не устойчиво к кислым ($\text{pH} < 6$) и сильнощелочным ($\text{pH} > 12$) средам [20]. В сильно загрязненной (промышленной) атмосфере цинковое покрытие разрушается значительно быстрее (до 10 раз), чем в чистой (сельской, сухой атмосфере) [20, 28].

Производителями оцинкованной стали являются ОАО “НЛМК”, ОАО “Северсталь”, ОАО “Магнитогорский металлургический комбинат (ММК)”, АО “ЛМЗ”, а также металлургический комбинат “ИСПАТ КАМЕТ” (Казахстан), Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича (Украина).

Цинковые покрытия различного производства отличаются по характеристикам, но относительно высокая адгезионная прочность цинкового покрытия по сравнению с полимерным, позволяет рассматривать металл с цинковым покрытием как мономатериал.

1.1.3. Системы покрытий на металлических подложках

Под системой покрытий понимается сочетание слоев, составляющих материал с покрытием (подложка, покрытие, грунт). В табл. 1.5 приведены наиболее распространенные системы покрытий и характерные сферы применения. На рис. 1.3 приведен разрез материала с покрытием, применяемого в строительной индустрии.

Применение полимерного покрытия совместно с цинковым (так называемым “дуплекс”) позволяет увеличить срок службы такого материала и улучшить его декоративные свойства по сравнению с материалами, имеющими раздельное покрытие [25, 29, 30]. Наличие цинкового подслоя в дуплекс-покрытии лучше защищает торцы ленты после ее разрезания [31], хотя адгезия полимерного покрытия с холоднокатаным листом выше, чем с оцинкованным листом.

Практически все системы покрытий, применяемые на рулонном материале, специально спроектированы для возможности дальнейшей переработки такого материала. Например, система ЛКП на основе акрилсиликоновой эмали АС-1171 создана специально для обеспечения возможности обработки листа или ленты с таким покрытием гибкой, штамповкой и т. д. [32].

Для систем покрытий № (3-6, см. табл. 1.5) характерно отсутствие защитного металлического покрытия, что связано с достаточной толщиной покрытия (системы Ст-Пл, Ст-Пленка) или сама подложка выполняет защитные функции (системы Ал-ЛКП, Ал-Пленка). В качестве исходного материала подложки применяют пластичные марки металлов (для стали – 08 кп (пс, ю), для алюминия АМц, АМг).

Для системы покрытий Ал-Ал (№7, см. табл. 1.5) в качестве подложки применяют высокопрочные сплавы алюминия (Д16, В95, 1163), а в качестве покрытия чистый алюминий (98-99)%. Толщина покрытия на сторону составляет 4% от толщины подложки. Материал нашел применение в авиастроении [33].

В некоторых случаях для дополнительной защиты материала (при транспортировке, формообразовании) на лицевую поверхность наносят полиэтиленовую пленку (толщиной 0,1 мм), которую снимают только с готовой детали.

Таблица 1.5

Применяемые системы покрытий

№	Основные слои*			Название	Применение	
	Подложка	Металлич. покрытие	Полимер. покрытие			
1	Ст	Zn	-	Оцинкованная сталь	Строительство	Автостроение
2	Ст	Zn	ЛКП	Оцинкованная сталь с полимерным ЛКП		
3	Ст	-	Пл	Сталь с полиэтиленовым покрытием		Бытовая техника
4	Ст	-	Пленка-ПВХ	Сталь с пленкой ПВХ		
5	Ал	-	ЛКП	Алюминиевая подложка с полимерным ЛКП		
6	Ал	-	Пленка-пропил.	Алюминиевая подложка с декоративной пленкой		
7	Ал	Al	-	Алюминий лакированный		Авиастроение

* – условимся тип подложки обозначать русскими буквами: сталь (Ст), алюминий (Ал), а тип металлического покрытия латинскими буквами: цинковое (Zn), алюминиевое (Al)

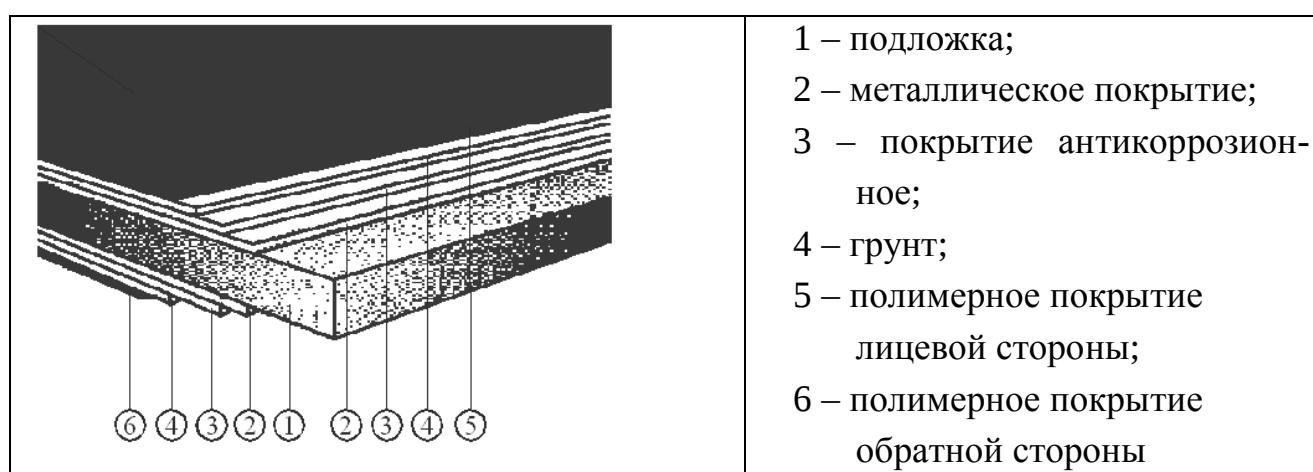


Рис. 1.3. Структура листового материала с покрытием

Покрытия улучшают деформационную способность металла. Оцинкованные стали имеют лучшую деформационную способность по сравнению со сталями без покрытия, что связано с уменьшением трения между материалом и инструментом за счет того, что слой покрытия сам подвергается пластической

деформации и удерживает смазку [22, 34, 35]. Полимерные покрытия также снижают трение заготовки о поверхность инструмента, что дает возможность достижения больших степеней деформации.

К сожалению, современные материалы с покрытием еще недостаточно изучены в плане технологичности применительно к профилированию. Поэтому представляется интересным исследовать материалы с цинковым, комбинированным “цинково-полимерным” и плакированным алюминием покрытиями.

1.2. Испытания листовых материалов с покрытием

Применительно к процессу профилирования технологические испытания материала с покрытием практически не отличаются от соответствующих испытаний мономатериала. Однако при жестких схемах формообразования надлежит учитывать ряд свойств покрытий, таких как: прочность, адгезия, характеристики толщины и твердости покрытия (рис. 1.4).

1.2.1. Определение прочностных характеристик и толщины покрытия

Методы определения прочностных характеристик покрытия на ударную прочность основываются на деформации металлической пластинки с покрытием от свободного падения груза на боек [36]. Ударная прочность может иметь значение при скорости более 120 м/мин., поэтому для низких скоростей влиянием ударной прочности можно пренебречь. Остальные виды испытания имеют существенное значение для технологии профилирования.

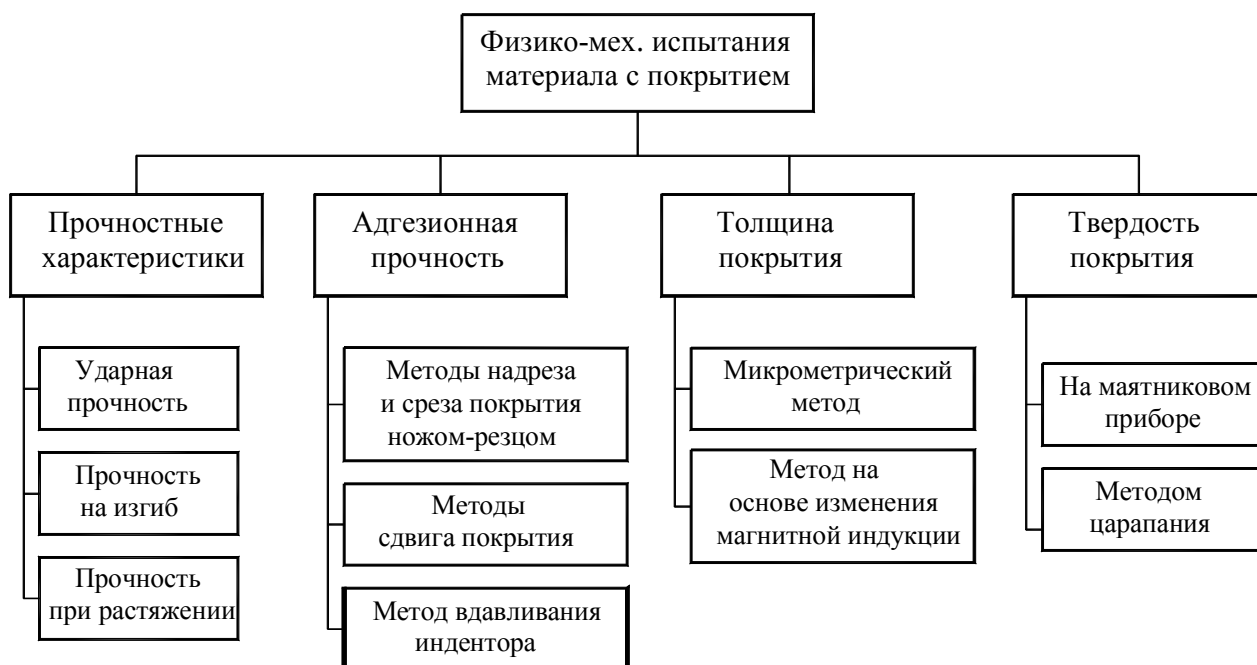


Рис. 1.4. Физико-механические испытания материала с покрытием

Прочность на изгиб определяют по методу “Т”, предусматривающему изгиб образца от минимально возможного радиуса сгиба (наружный радиус соответствует двум толщинам металла) до радиуса, при котором трещины на покрытии при 10-кратном увеличении отсутствуют [37] (рис. 1.5.а). Испытания на изгиб металлической пластины с покрытием позволяет определять максимальную прочность покрытия при растяжении на наружном контуре зоны сгиба. По результатам испытаний можно назначить допустимый радиус изгиба материала с покрытием.

Метод испытания прочности при растяжении [38] основан на измерении глубины выдавливания металлической пластины с покрытием в момент его разрушения при вдавливании сферического пуансона (рис. 1.5.б). Результаты испытаний можно использовать при рассмотрении процесса деформации полки и наружной поверхности зоны сгиба.

Метод определения толщины покрытия по микрометру [7, 8, 37] основан на разности показаний значения микрометра толщины листа с покрытием, и после удаления покрытия. Метод определения толщины покрытия магнитным методом [7, 8] основан на изменении магнитного сопротивления в зависимости от толщины покрытия. Оба метода могут применяться для определения толщины покрытия, но второй метод имеет меньшую погрешность измерения, особенно для тонких покрытий.

1.2.2. Определение адгезионной прочности покрытия

Из существующих методов оценки адгезионной прочности покрытия на рулонном материале [8, 39] наиболее распространенными являются: 1) методы надреза (среза) покрытия; 2) методы сдвига покрытия; 3) метод вдавливания индентора.

К первой группе относится определение адгезии методом решетчатых и крестообразных надрезов [40]. Наличие отслоения покрытия производится визуально и оценивается по балльной системе или по числу квадратов пленки, отслоившихся от подложки в результате воздействия на надрезанное покрытие усилия сдвиг липкой лентой или удара при падении бойка на покрытие. В некоторых случаях измеряют глубину погружения пуансона на прессе Эриксона, при котором начинается отслоение покрытия подложки [8]. Методом надреза можно определять адгезионные свойства покрытий после изгиба на 90^0 , 180^0 [41]. Метод не позволяет количественно измерить значение адгезии, но дает первоначальные данные о состоянии покрытия.

Сущность метода среза покрытия с подложки заключается в снятии пленки с подложки приспособлением: ножом или бритвой, действующими по принципу клина [42, 43]. Адгезионная прочность характеризуется силой, прикладываемой к ножу в направлении его движения для снятия пленки (рис. 1.5.в). Метод может применяться для покрытий толщиной не менее 0,1-0,2 мм и не подходит для большинства материалов, применяемых при профилировании.

Еще одним методом оценки качества сцепления покрытия с подложкой является внедрение индентора под нагрузкой в покрытие [44, 45], однако эти методы не имитируют условия приложения сил, действующих на покрытие при профилировании.

Наилучшим методом определения адгезии является тот, который воссоздает напряжения, возникающие при профилировании, где преобладают касательные напряжения [46]. Однако существующие методы испытания на сдвиг покрытий (метод штифтов, метод механического отслаивания покрытия от подложки) не подходят, поскольку применяемые в настоящее время покрытия обладают большими значениями адгезионной прочности.

Подходящим является метод, использующийся для определения твердости покрытий по устойчивости к царапанию (рис. 1.5.г), который заключается в фиксировании силы, при которой индентор полностью проникает в покрытие при параллельном движении относительно заготовки. Данный метод позволяет в первом приближении оценить стойкость покрытия при формообразовании в роликах. Однако числовые значения при этом будут отличаться от реального процесса в связи с различием контактных условий в данном методе и в реальном процессе.

Наиболее подходящим методом, как было отмечено ранее, будет метод, позволяющий имитировать нагрузки, имеющие место в реальном процессе. При литературном и патентном поиске такого метода или способа выявлено не было. Однако было найдено устройство, предназначенное для определения прочности сцепления покрытия с подложкой при отслоении [47], которое содержит подвижную каретку, отслаивающий ролик, нагрузочный и измеритель нагрузки (рис. 1.5.д). Однако это устройство, наиболее “правдоподобно” имитирующее контактные нагрузки при профилировании, создает большие зоны контакта между заготовкой и инструментом, что приводит к существенным погрешностям.

Нужно отметить, что описанные методы и способы определения адгезионных характеристик пригодны в основном только для полимерных покрытий.

1.2.3. Определение технологических характеристик покрытия

К технологическим характеристикам покрытия можно отнести испытание на стойкость покрытия при протягивании через инструмент, определение коэффициента трения и износостойкости покрытия.

Способ испытания на стойкость материала с покрытием, основанный на сочетании гибки с протягиванием образца через ребро инструмента (рис. 1.5.е) [48], и способ определения коэффициента трения и перенос покрытия при протягивании полос через модульную систему из 3-х валков (рис. 1.5.ж) [49] можно использовать для определения технологических свойств покрытия. Схемы нагружения образца в этих способах позволяют имитировать нагрузку, имеющую место при формообразующих операциях листовой штамповки.

В работах [50, 51] для определения коэффициента трения в зависимости от контактных напряжений измерялась сила протягивания полосы от силы сжа-

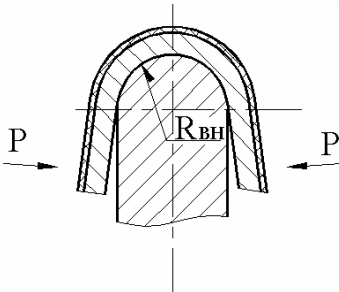
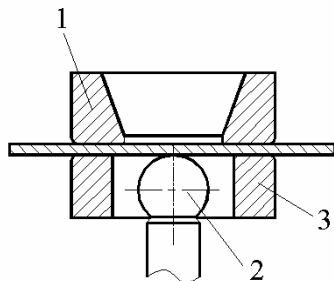
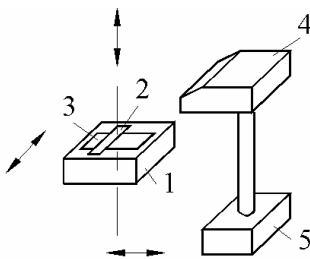
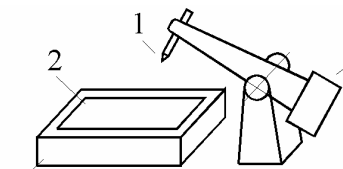
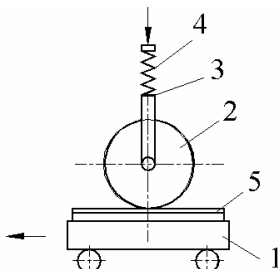
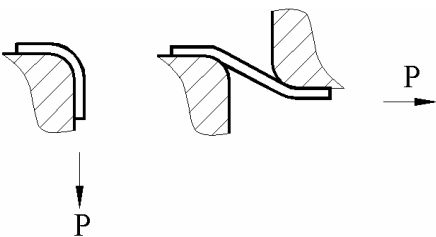
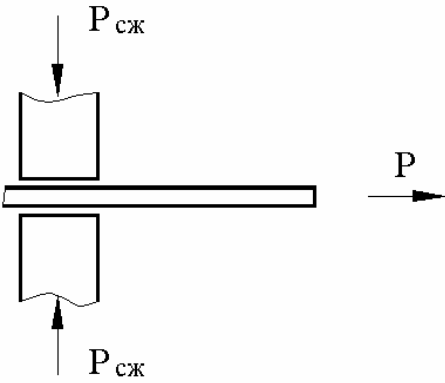
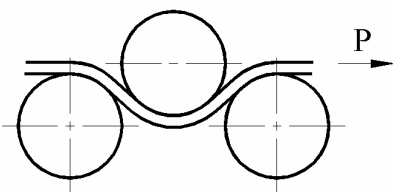
Определение прочности покрытия			
а на изгиб		б при растяжении	
		 1 – матрица; 2 – пуансон; 3 – зажим	
Определение адгезионной прочности покрытия			
в при срезе		г царапанием	д при отслаивании
 1-зажимное устройство; 2-фиксирующее устройство; 3-заготовка с покрытием; 4-головка среза; 5-измерительное устройство.		 1-игла; 2-заготовка с покрытием; 3-скользящая плита; 4-противовес	 1-подвижная каретка; 2-отслаивающий ролик; 3-нагрузатель; 4-измеритель нагрузки; 5-испытуемая заготовка с покрытием
Определение технологических характеристик покрытий:			
Стойкость покрытий при протягивании		Коэффициент трения покрытия	
е 		з 	
ж 			

Рис. 1.5. Методы физико-механических испытаний материалов с покрытием применительно к процессу профилирования

тия инструмента (рис. 1.5.з). Данный эксперимент позволяет определить общий коэффициент трения и применим только для материала с одинаковым покрытием на лицевой и обратной стороне.

Оценка износостойкости покрытия основана на определении количества песка, необходимого для разрушения покрытия до подложки или рядом других методов, где в качестве контртел используются шарики, стальная проволока, шлифовальная шкурка и др. [8].

1.2.4. Определение антикоррозионных свойств и атмосферостойкости покрытия

Существующие методы определения антикоррозионных свойств покрытия (электрохимические методы, методы определения пористости, скорости проникновения агрессивных веществ, водостойкости и влагостойкости покрытия и др.) [8, 52] сложны и предназначены в основном для испытания плоских заготовок. Наиболее применимым методом является оценка состояния покрытия в жидких агрессивных средах [53], где изменение характеристик на исходном образце и образце, подвергнутом деформированию, указывает на уменьшение защитных свойств покрытия. Данный метод позволяет количественно определить состояние покрытия профиля после деформации и возможность его дальнейшей эксплуатации.

Из методов испытания атмосферостойкости полимерных покрытий наиболее применимыми являются методы ускоренных испытаний [7, 8, 29], в частности, метод определения устойчивости к солевому туману. По результатам этого испытания можно сделать окончательные выводы о пригодности профилей с покрытием к эксплуатации.

Практически все приведенные испытания позволяют определять общие свойства покрытия, однако методов или устройств, которые позволяли бы имитировать нагрузки, имеющие место при профилировании, при контакте с инструментом, найдено не было.

1.3. Область применения профилей с покрытием

В последнее время отмечается значительный рост использования изделий с покрытием во многих областях хозяйства. Они находят широкое применение (табл. 1.6) в строительстве [3, 9, 21, 54, 55], в автомобилестроении при производстве кузовов [15, 16, 56, 57] и отделки узлов автомобиля [6, 31, 54, 58], в авиастроении [33, 59, 60], при производстве бытовой техники [3, 18, 61].

В настоящее время осуществляется переход от окраски готового изделия к окраске рулонного материала на производственных линиях с последующим получением детали, что позволяет экономить энергию, материал, время и получить высококачественные покрытия. При этом затраты на нанесение покрытия на ленту будут меньше на 10 – 15 % по сравнению с нанесением покрытия на готовую деталь [5, 6, 23, 31, 62]. В то же время это предъявляет особые требо-

вания к технологии обработки такого материала, в частности, требования отсутствия нарушения покрытия и сохранения им своих защитно-декоративных свойств.

В отечественном автомобилестроении осуществляется перевод части деталей машин УАЗ, ВАЗ, ГАЗ, изготавливаемых из тонколистового материала, на оцинкованный [www.autufa.ru]. За рубежом все больше производителей автомобилей используют оцинкованные стали для защиты кузовов [56] и материалы с полимерными покрытиями для защиты других деталей автомобиля [6, 31, 54].

Таблица 1.6

Применения изделий с покрытием

Отрасль хозяйства	Изделие или узел	Применяемое покрытие
Строительство	Декоративные облицовочные профили	ПЭ, ПУ, Пл, Акрил, Пленки
	Несущие конструкции	Zn
Автомобилестроение	Кузов, рама (лонжероны, поперечины, усилители)	Zn
	Отдельные узлы	ПУ, Zn
Авиастроение	Несущие силовые элементы каркаса (стрингеры, шпангоуты, лонжероны)	Плакированные алюминием
	Ограждающие и декор. элементы	
Бытовая техника	Корпуса приборов	ПВХ
	Корпуса холодильников	ПЭ, Акрил, ПВХ

1.3.1. Применение профилей с покрытием в строительстве

В настоящее время наибольшая часть изготавливаемых профилей (80-90)% приходится на строительство, где доля всего полимерного проката составляет до 70%, а оцинкованного до 60%.

Профили, применяемые в строительстве (рис. 1.6), можно классифицировать на 3 основных типа: гофропрофили, швеллерные П и С-образные профили, профили сложной конфигурации с элементами жесткости (ЭЖ) [63]. Гофропрофили представляют собой отдельный тип профилей, состоящий из одинаковых, повторяющихся элементов по ширине профиля. Поскольку при их изготовлении применяется несколько отличная технология, то рассматривать мы их не будем. Но и остальных профилей существует большое число типоразмеров. Для примера, количество армирующих профилей, преимущественно П и С-образного сечения, в одной только ООО “Аркада” составляет 80 типоразмеров [www.arkada.ru/Pages_Rus/armpr1.htm].

При изготовлении профилей из материала с покрытием возможно возникновение различных дефектов покрытия. Некоторые дефекты покрытия (по-

тертости, риски, царапины, не нарушающие сплошность покрытия) допускаются по ГОСТ [24, 37, 55], хотя и вызывают снижение защитных свойств покрытия. Однако, трещины и отслаивания в местах изгиба, а также нарушение покрытия вплоть до основного металла в предугловых зонах, характерных для элементов жесткости, не допускаются.

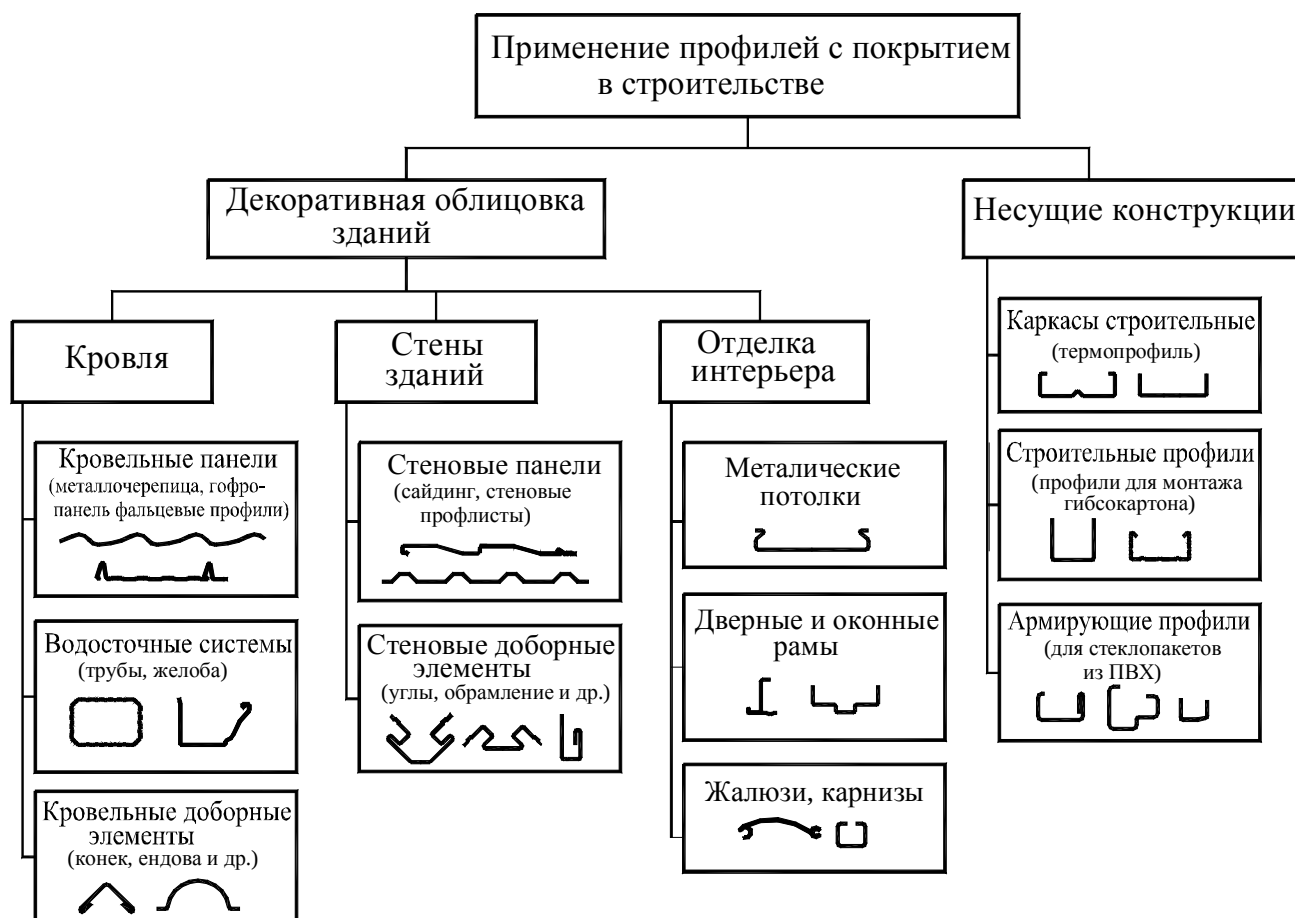


Рис. 1.6. Применение профилей с покрытием в строительстве

Широкое применение в строительной индустрии находят профили со сложным поперечным сечением, которые в процессе изготовления наиболее подвержены нарушению покрытия. К таким профилям относятся и профили с ЭЖ (петельные элементы, элементы двойной толщины – ЭДТ, рифты), которые, как правило, изготавливают из материала толщиной (0,4÷1,0) мм с полимерным покрытием. Профили несущих конструкций, как правило, имеют простое сечение (П и С-образного вида) и стойкое цинковое покрытие, но в связи с относительно большей толщиной подложки (1,5 – 2 мм), они также подвержены дефекту нарушения покрытия.

1.3.2. Требования к гнутым профилям с покрытием

Среди требований к гнутым профилям с покрытием можно выделить требования к геометрическим параметрам профиля и к качеству его поверхности.

В машиностроении и строительстве применяют требования, сведенные в табл. 1.7, а по качеству поверхности профиля – в табл. 1.8.

Таблица 1.7

Требования к гнутым профилям согласно ГОСТ 11414-76 [64]

Параметры	Размеры, мм	Предельное отклонение
Габариты сечения	до 50	$\pm 1,0$ мм
	50-100	$\pm 1,5$ мм
	101-200	$\pm 2,0$ мм
	более 200	$\pm 3,0$ мм
Толщина	1,0	$\pm 0,11$ мм
	1,5	$\pm 0,15$ мм
	2,0	$+ 0,17/-0,21$ мм
Волнистость кромки	любые	до 2 мм
Продольный прогиб	любые	до 1 мм/м
Скрутка	любые	до 1 град/м

Таблица 1.8

Требования к качеству поверхности (ГОСТ 14918-80 и ГОСТ 24045-86)

Покрытие	Допускаются	Не допускается
Цинковое покрытие	следы от перегибов полосы и роликов, местная шероховатость покрытия (сыпь), легкие царапины и потертости, не нарушающие сплошность покрытия	нарушение сплошности в виде растрескивания
Полимерное покрытие	потертости, риски, следы формирующих валков, не нарушающие сплошность покрытия	наличие микротрещин в ЛКП в местах изгиба, видимые через лупу $10^{\times}$

Таким образом, для дальнейшего рассмотрения остановимся на профилях применяемых в строительстве, сложной конфигурации, в частности с ЭЖ, изготавливаемых из материала толщиной $(0,4 \div 1,0)$ мм с полимерным покрытием, и профилей П и С-образного типов, изготавливаемых из материала толщиной $(0,5 \div 2,0)$ мм с цинковым покрытием.

1.4. Теоретические исследования процесса формообразования профилей из листового материала с покрытием

Теоретическому анализу процессов гибки, лежащему в основе процессов профилирования, посвящено значительное количество работ: И.П. Ренне [65], Е.П. Попова [66], В.И. Давыдова [67], В.В. Соколовского [68], В.И. Ершова [69], И.С. Тришевского [70] и др.

1.4.1. Анализ методов изготовления профилей

Изготовление профилей из листового материала с покрытиями может производиться теми же способами и методами, что и без покрытий: в кромкогибочных машинах [71, 72], штампах [73-76]. Наиболее прогрессивным способом является изготовление профилей в роликах профилированием. Существующие методы изготовления профилированием можно подразделить на традиционное профилирование (ТП), стесненный изгиб (СИ) и метод интенсивного деформирования (МИД). Схемы реализации и характерные особенности различных методов приведены в табл. 1.9, табл. 1.10.

Таблица 1.9

Схемы реализации методов профилирования

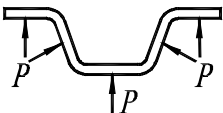
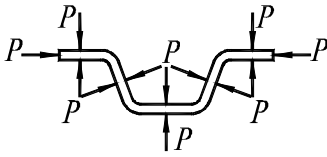
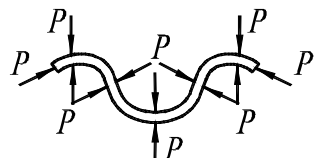
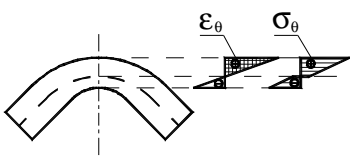
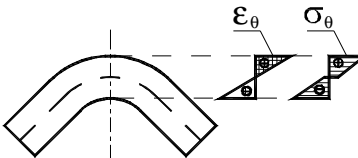
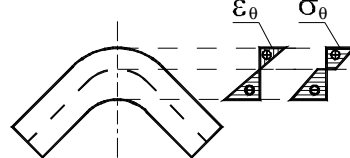
	Традиционное профилирование	Метод интенсивного деформирования	Стесненный изгиб
Схема реализации процесса			
НДС в зоне сгиба			

Таблица 1.10

Характерные особенности различных методов

Параметры	Метод		
	ТП	МИД	СИ
Количество переходов	12-22	4-8	3-4
Количество зон сгиба	до 12	до 12	до 8
Угол подгибки за один переход, град	8-12	20-45	20-45
Система калибровки	последовательная	параллельная	параллельная
Тип калибра	открытый	закрытый	закрытый
Ширина заготовки	$L_{теор} > L_{прак}$	$L_{теор} = L_{прак}$	$L_{теор} < L_{прак}$
Размерная точность по сечению	низкая	высокая	повышенная

Традиционное профилирование [70, 77] предусматривает малые углы подгибки за переход, что способствует наилучшему сохранению покрытия. Однако количество переходов велико (20 – 52), что обуславливает высокую стоимость оснастки и оборудования и неэффективность использования в серийном и мелкосерийном производстве.

Метод СИ заключается в осадке волнообразной заготовки с утолщением металла в зоне сгиба [78, 79, 80]. Метод разработан для труднодеформируемых и малопластичных материалов, применяемых в авиационных конструкциях и содержит 2-4 перехода для профилей типа швеллер, корытный, Z-образный. Стесненный изгиб характеризуется тем, что в процессе гибки к листовой заготовке прикладываются дополнительные силы сжатия в тангенциальном, радиальном и аксиальном направлениях [80]. В отличие от обычной гибки (традиционного профилирования), где нейтральный слой смещается в сторону внутреннего контура (см. табл. 1.9), под действием дополнительных сил сжатия в зоне сгиба происходит смещение нейтрального слоя от средней линии в сторону наружного контура. Уменьшение деформаций растяжения снижает растягивающие напряжения и деформации наружного контура, устраняет опасность его разрушения при гибке с малыми относительными радиусами. Метод СИ позволяет получить радиусы гибки $r_b = (0,5 - 2)$ мм, которые меньше предельно допустимых при обычной гибке.

Относительно сохранения покрытия метод СИ является наименее пригодным, поскольку поперечное обжатие профиля, утолщение в зоне сгиба сопровождается высокими контактными напряжениями и деформациями, что не способствует сохранению покрытия.

Метод интенсивного деформирования является промежуточным между традиционным профилированием и методом СИ и представляет более прогрессивный метод изготовления профилей практически любого сечения [81, 82, 83]. Преимущество МИД по сравнению с традиционным профилированием заключается в максимальном использовании упругопластических свойств металла, что позволяет использовать минимальное количество переходов и обеспечить снижение стоимости оборудования и продукции.

Принципиальными технологическими особенностями, реализующими идею метода интенсивного деформирования в роликах, являются [81]:

- уменьшенное число переходов по сравнению с традиционным профилированием;
- проведение по особым схемам процесса формообразования с использованием дополнительных средств настройки и воздействия на заготовку;
- применение роликового инструмента с замкнутым рабочим контуром;
- совмещение процесса окончательного формообразования с правкой.

Однако от стесненного изгиба этот метод унаследовал высокие контактные нагрузки, действующие на заготовку, что сдерживает его внедрение в производство для профилей из листовых материалов с покрытием.

1.4.2. Контактные воздействия при профилировании

При профилировании на заготовку в калибре воздействуют различные силы, превышение которых на некоторой контактной зоне может вызвать нарушение покрытия. Проанализируем действующие силы и давления в различных способах изготовления профилей в роликах (табл. 1.11).

Высокие контактные напряжения $q_{\text{угл}}$ сосредоточены на внутреннем радиусе зоны сгиба со стороны криволинейной формирующей части верхнего ролика. Контактные напряжения трения в активной зоне контакта полосы с валком в месте изгиба могут быть описаны по распределению Игнатенко [85]:

$$t = 1,15 f \left\{ s_s \ln \frac{R_H}{R_g} + \frac{2}{2 \cdot R_{BK} + S_0} \left[s_s r \ln \frac{R_H}{R_g} - \frac{\Pi_2}{2} \left(R_H \ln \frac{R_H}{r} + R_g \ln \frac{R_g}{r} \right) \right] \right\}, \quad (1.1)$$

где f - коэффициент трения; s_s - напряжение текучести материала, МПа; R_H - наружный радиус гиба уголковой зоны, мм; R_B - внутренний радиус гиба уголковой зоны, мм; R_{BK} - величина скругления на криволинейной части верхнего ролика; S_0 - исходная толщина заготовки, мм; r - радиус гиба в нейтральном слое зоны сгиба, мм; Π_2 - модуль упругости.

График рис. 1.7, построенный по формуле (1.1), показывает, что контактные напряжения возрастают с уменьшением радиуса гиба уголковой зоны профиля и увеличением толщины металла.

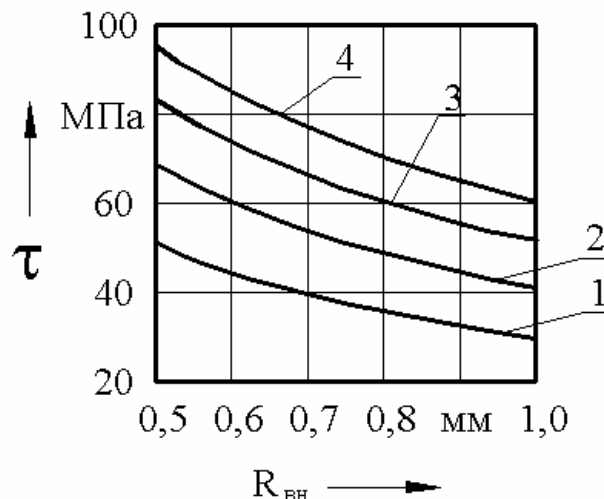


Рис. 1.7. Зависимость контактного напряжения t от внутреннего радиуса зоны сгиба $R_{\text{вн}}$ в зависимости от толщины заготовки: 1 - $s = 0,4$ мм; 2 - $s = 0,6$ мм; 3 - $s = 0,8$ мм; 4 - $s = 1,0$ мм

Контактные силы $P_{\text{кон}}$ (см. табл. 1.11) характерны для всех видов калибров и возникают по конической части ролика при подгибке полок профиля [86], при этом расчетная зависимость имеет вид:

$$P_{\text{кон}} = \frac{s_s S^2}{4x} + 3,52 \cdot 10^{-4} E a_k^{\frac{7}{5}} S^{\frac{13}{5}} b^{\frac{-13}{5}} x, \quad (1.2)$$

где a_k - угол подгибки полки, град; b - высота полки, мм; x - текущее расстояние полки от радиуса сгиба, мм;

График распределения контактных сил согласно формуле (1.2) по ширине полки, относящийся к профилю швеллерного типа, показывает, что наибольшие контактные силы имеют место вблизи зоныгиба профиля (рис. 1.8).

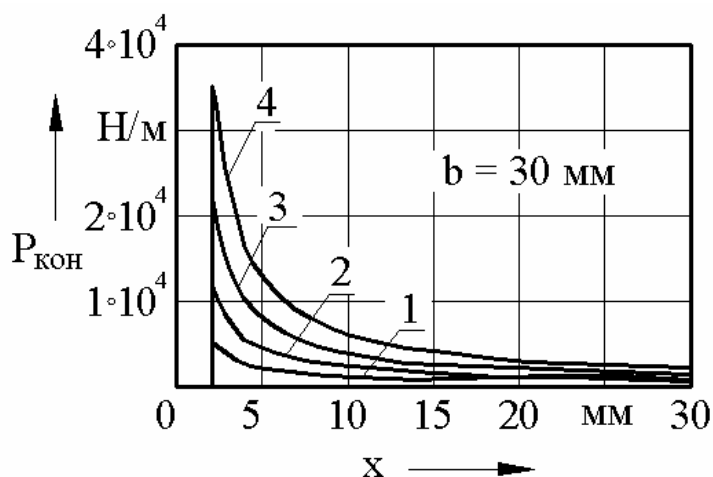


Рис. 1.8. Распределение контактных сил $P_{\text{кон}}$ по ширине полки x и толщине заготовки: 1 – $s = 0,4$ мм; 2 – $s = 0,6$ мм; 3 – $s = 0,8$ мм; 4 – $s = 1,0$ мм

Силы по срединным участкам $P_{\text{сред}}$ характерны для калибра, применяемого при СИ, но они характерны и для МИД, где на последних переходах для получения заданных размеров может производиться калибровка (обжатие) сечения профиля. Силы $P_{\text{сред}}$ при этом будут действовать посередине будущих прямолинейных зон профиля, они могут появляться и при контакте дугообразной части заготовки с прямолинейным участком ролика.

При заходе профиля в калибр происходит начальная подгибка полки скруглением бурта посадочного места, в результате чего профиль приобретает некоторую поперечную кривизну. Результаты исследования сил $P_{\text{сред}}$ и $P_{\text{тор}}$ представлены в работе [87], где описана технология, по которой на предварительных переходах получали заготовку с большой поперечной кривизной полок, а в окончательном переходе производили осадку последних.

Распорная сила (рис. 1.9) в роликах окончательного формообразования определяется формулой:

$$P_N = \frac{s_s}{fl} \left[\sqrt{2R_1(s_0 - s_K)} \cdot (1 + fl) - 2x_H s_0 \right] (b_1 + 2b_2 \cos a + 2b_3), \quad (1.3)$$

где l - геометрические характеристики профиля; R_1 - радиус заготовки до захода в калибр, мм; b_1 , b_2 , b_3 - размеры стенок профиля, мм

Использование данной формулы сложно в связи с трудоемкостью определения некоторых параметров, однако по ней можно выявить общую зависимость силы от радиуса и толщины. Торцевые силы $P_{\text{тор}}$ могут применяться как для удержания профиля в калибре, так и для получения утолщения в зоне сгиба (характерно для СИ). При МИД торцевые силы могут применяться, как для пре-

дотвращения смещения профиля в калибре, так и для некоторого “подпора” пол-
лок.

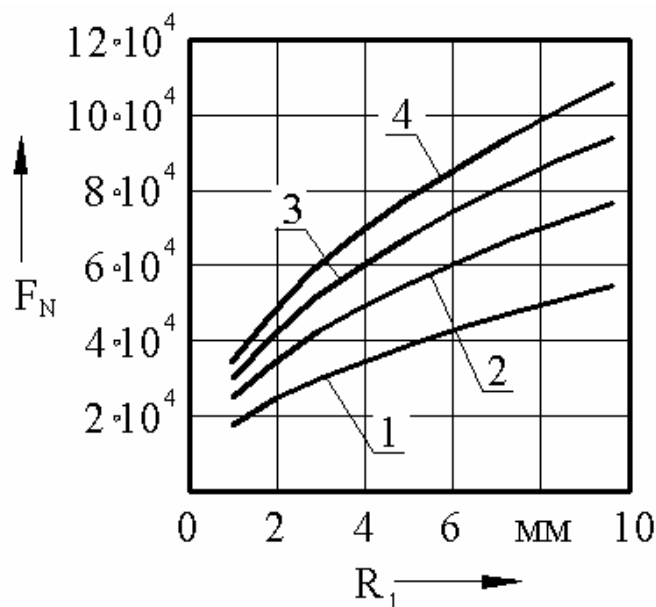


Рис. 1.9. Зависимость распорной силы F_N на окончательном переходе от радиуса криволинейной части R_1 на предварительном переходе и толщины заготовки: 1 – $S = 0,5$ мм; 2 – $S = 1,0$ мм; 3 – $S = 1,5$ мм; 4 – $S = 2,0$ мм.

Для закрытого калибра с цилиндрическими буртами, применяемого при СИ и МИД, характерно присутствие дополнительного воздействия на заготовку, а именно, приложение сил со стороны бурта посадочных мест роликов практически при любых углах подгибки. Такой контакт проявляется и при применении открытых калибров при углах подгибки близких к 90° . Данный контакт характерен при наличии в калибре цилиндрических буртов и осуществляется до захода полки в основной (формующий) калибр по скруглениям буртов $R_{бур}$, в результате чего контакт полки осуществляется по малой радиусной зоне инструмента, что может привести к нарушению покрытия. Такой контакт можно представить в виде взаимодействия сферического тела (радиус на инструменте) с цилиндрической (полка, имеющая поперечную кривизну) или плоской поверхностью. При этом упругий контакт сферы с поверхностью описывает формула Герца:

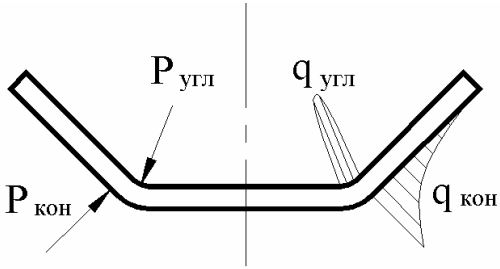
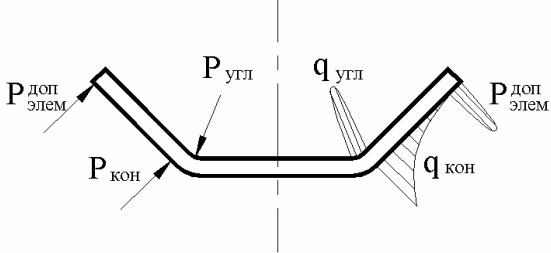
$$b_K = 1.43 \sqrt{\frac{PV}{E}}, \quad (1.4)$$

где b_K - площадка контакта, P - нагрузка, V - приведенный объем, E - приведенный модуль упругости.

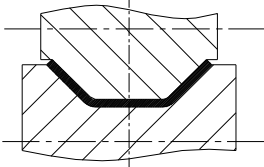
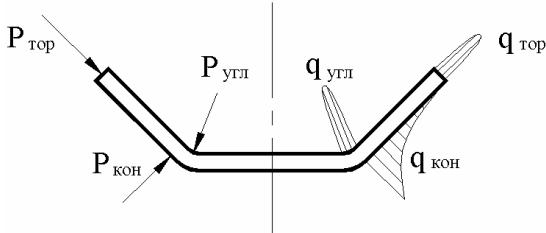
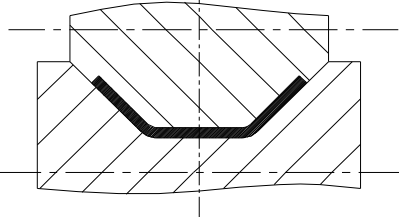
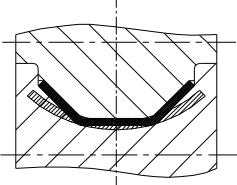
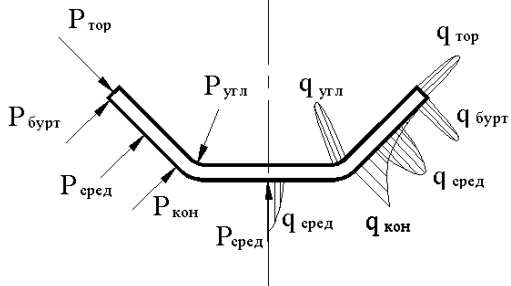
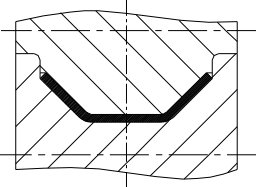
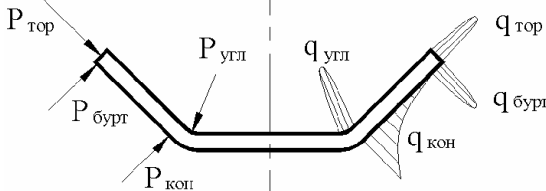
Формула (1.4) не отражает упруго-пластическое взаимодействие контактирующих тел и авторам представляется необходимым разработать более подходящую теорию для этого вида взаимодействия.

Таблица 1.11

Виды калибров, точки приложения максимальных сил, распределение давлений и характеристики калибров

№	Метод	Тип калибра	Вид калибра	Точки приложения максимальных сил (слева от осевой) и распределение давлений (справа от осевой)	Характеристики					Ссылка
					Ширина калибра ($V_{\text{кал}}$) и ширина заготовки ($V_{\text{заг}}$)	Толщина изготавливаемого профиля	Наличие поперечного смещения профиля	Наличие смятия кромки	Удобство настройки	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Традиционное профилирование	Открытый	Типовой		$V_{\text{кал}} > V_{\text{заг}}$	>3	+	-	-	[88]
2	Традиционное профилирование	Открытый	с направляющим участком		$V_{\text{кал}} > V_{\text{заг}}$	>(2-3)	± (50%)	-	-	[89]

Продолжение табл. 1.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3		с выступом на верхнем ролике				>2	-	-	-	[90]
4		с коническим участком на нижнем ролике и выступом на верхнем				>(1-1,5)	-	-	+	[91]
5	СИ	с цилиндрическими буртами			$V_{\text{кал}} < V_{\text{заг}}$	0,5-3	-	+	+	[80]
6	МИД				$V_{\text{кал}} = V_{\text{заг}}$	0,5-3	-	+	+	[81]

1.4.3. Формовка уголкового зон профиля

Слабым местом относительно сохранности покрытия является зона сгиба, что представляет собой отдельный предмет исследований.

Изучению уголкового зоны при обычной гибке посвящены работы [65, 66, 92], в которых определено напряженно-деформированное состояние в зонах растяжения и сжатия при пластическом и упруго-пластическом изгибе; их можно использовать при оценке покрытия на предмет трещиностойкости.

При изготовлении профилей их материала с покрытием превышение допустимой деформации растяжения в уголкового зонах приводит к разрыхлению и разрушению покрытия, что является причиной потери защитных и декоративных свойств покрытия [93, 94, 95].

Деформацию растяжения на наружном контуре зоны сгиба можно определить по следующей формуле [94]:

$$e_{pac} = \ln \frac{R_n}{r}. \quad (1.5)$$

При наличии данных о предельной деформаций покрытия по графику рис. 1.10 можно определить минимальный радиус гибки профиля при различной толщине заготовки.

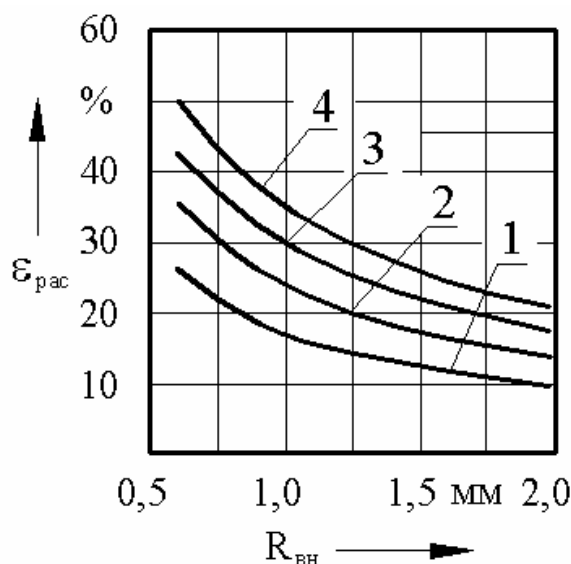


Рис. 1.10. Зависимость величины относительных деформаций e_{pac} на наружной зоне сгиба профиля от внутреннего радиуса гибки и толщины S : 1, 2, 3, 4 – $S = 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ мм соответственно

Применительно к процессу профилирования из методов формования радиуса по переходам, согласно источникам [93, 94], наибольшую сохранность покрытия с наружной стороны обеспечивает изгиб с постоянным радиусом. Однако это приводит к значительным контактным нагрузкам со стороны инструмента с внутренней части зоны сгиба. Поэтому при анализе процесса формо-

образования следует одновременно рассматривать наружную и внутреннюю стороны зоны сгиба.

При формовании необходимо избегать знакопеременной деформации металла с покрытием [96, 97], которая может привести к нарушению покрытия. В частности, вероятность отслаивания покрытия резко увеличивается, если после растяжения происходит сжатие металла с покрытием. Особенно плохо выдерживают такие деформации пленочные покрытия.

Необходимо отметить, что деформация сжатия в большей степени ухудшает защитные свойства покрытия [98], чем деформация растяжения, поэтому в технологических схемах желательно преобладание растягивающих деформаций.

1.4.4. Деформационные свойства полимеров

Рассмотрение свойств материала будет не полным без рассмотрения деформационных свойств полимеров, входящих в состав покрытий. Деформационные свойства полимеров и металлов различаются, прежде всего, тем, что полимеры имеют меньшие значения напряжения текучести и модуля упругости, но они более пластичны и способны принимать значительные растягивающие и сжимающие деформации. Точное определение характеристик покрытий затруднено в связи с их непостоянством, и зависимостью от деформированного состояния, и величины прикладываемых сил [99]. На рис. 1.11 и 1.12 представлены экспериментальные зависимости некоторых характеристик для полиуретановых полимеров, из которых видно, что при увеличении сжимающих сил модуль Юнга и напряжение текучести увеличиваются. Свойства и характеристики одних полимеров могут существенно отличаться от свойств и характеристик других полимеров. Это вызывает трудности описания общих деформационных свойств полимеров и использования их в дальнейших теоретических исследованиях.

Деформационные свойства покрытий отличаются от деформационных свойств самих полимеров в связи с воздействием дополнительных факторов:

- в состав покрытий кроме полимеров входят дополнительные компоненты: пленкообразующие, растворители и т.д., которые несколько изменяют свойства полимеров;

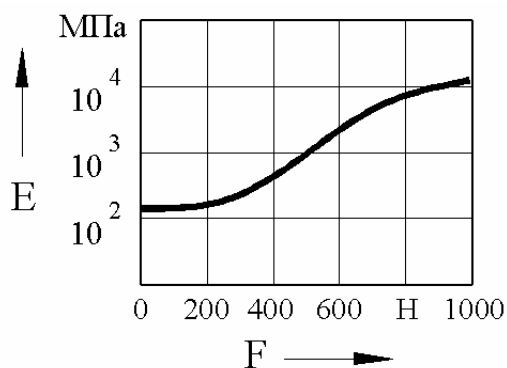


Рис. 1.11. Экспериментальные зависимости модуля юнга E от силы сжатия F для полиуретановых полимеров

- в процессе сушки в покрытии образуются внутренние напряжения, значения которых зависят не только от вида, но и технологии изготовления покрытия;
- в зависимости от толщины покрытия изменяется и прочность покрытия в связи с ориентирующим действием сил адгезии.

При формовке из материала с покрытием изделий совместно с металлической подложкой покрытие также испытывает различные виды деформаций (изгиб, растяжения, сдвиг и др.) [100]. При профилировании характерен изгиб заготовки, который сопровождается большими деформациями по зоне сгиба. При этом для описания процесса нарушения покрытия часто пользуются понятием внутренних напряжений [14]. Такие напряжения могут образовываться как в процессе формирования, так и в процессе эксплуатации покрытий [101], они снижают адгезионную и когезионную прочность покрытия [98], вызывая нарушение сплошности в виде растрескивания и отслаивания покрытия [102]. В работе [101] установлено, что в процессе гибки с наружной стороны зоны сгиба внутренние напряжения в покрытии увеличиваются с увеличением степени деформации образца (уменьшением радиуса гибки) (рис. 1.13).

Повышенные внутренние напряжения являются причиной интенсивных релаксационных процессов в покрытиях, которые снижают защитные свойства последних [100] и через некоторое время могут вызвать нарушение их целостности. В работе [14] отмечено общее падение разрушающих напряжений и относительного удлинения при растяжении с течением времени, что также является следствием действия релаксационных процессов.

Внутренние напряжения по-разному воздействуют на тонкие (терморезистивные) и толстые (термопластичные) покрытия. Отмечено, что тон-

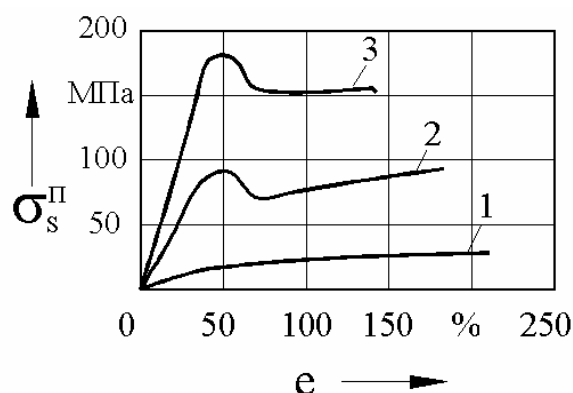


Рис. 1.12. Экспериментальные зависимости напряжения текучести $\sigma_s^П$ для ПУ полимера от максимальной деформации ϵ и напряжения сжатия: 1 – 0,1 МПа; 2 – 210 МПа; 3 – 690 МПа

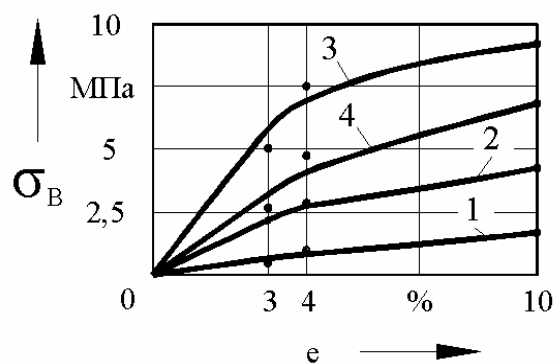


Рис. 1.13. Зависимость величины внутренних напряжений от относительной деформации наружной зоны сгиба ϵ для следующих покрытий: 1 – ХВ-785; 2 – ХС-059; 3 – ЭП-773; 4 – ЭП-525

кие покрытия более устойчивы к растрескиванию, чем толстые [14]. С одной стороны, снижение прочности покрытия с ростом его толщины объясняется увеличением количества дефектов, ростом усадочных напряжений и т.п. [14]. С другой стороны, сказывается ориентирующее действие сил адгезии на прилегающий слой [8, 103], которое снижается по мере возрастания толщины покрытия.

Толстые и тонкие покрытия отличаются по деформационным характеристикам (табл. 1.12). Толстые покрытия более пластичны и способны выдерживать значительные деформации. Тонкие лучше выдерживают контактные нагрузки, но менее устойчивы к большим деформациям.

Можно отметить, что у обоих видов покрытий адгезионный и прилегающий слой имеет сходную структуру и деформационные характеристики, что позволяет использовать их общие характеристики для выполнения расчетов.

Таблица 1.12

Деформационные характеристики полимерных покрытий

	Толщина покрытия, мкм	Характерные деформационные характеристики	Тип разрушения	Пример покрытия
Термо-реактивные	5-35	Выдерживает высокие контактные напряжения	Хрупкое	ПЭ, Акрил, ЭП
Термопластичные	50-200	Наилучшая пластичность	Вынужденно-эластичное	ПУ, ПВХ

1.5. Экспериментальные исследования в области технологии формообразования профилей из листа

1.5.1. Схемы формования профилей различной конфигурации

Производство уголковых профилей из материалов без покрытий с умеренной шириной полок практически не ставит технологических проблем перед разработчиком. Однако разработка технологии изготовления широкополочных уголков, уголков с элементами жесткости типа рифтов, элементами двойной толщины, отбортовками [104] из материала с покрытием вызывает необходимость изучения возможностей применения специальных схем формообразования с целью предотвращения нарушения покрытия на таких элементах.

Симметричные равнополочные профили с соотношением ширины дна и полки более двух, можно изготавливать по схеме стесненного изгиба [80] осадкой заготовки с большими радиусами зон сгиба в окончательном переходе до получения требуемых значений (рис. 1.14). Указанным способом можно изготавливать профили с шириной полки до 20–25 толщин заготовки при толщине металла более 0,8 мм. При выходе из этого диапазона наблюдается повреждение кромки (особенно у профилей из пластичных материалов с плакированием) или потеря устойчивости вертикальной полки при осадке с отклонением от

плоскостности на готовом профиле. При изготовлении из материала с покрытием возможно нарушение покрытия в местах зон сгиба готового профиля в результате осадки профиля и наличия больших контактных напряжений.

Повышение точности сечения симметричного С-образного профиля из оцинкованной стали толщиной 0,5-1,0 мм в способе [105] достигается путем выдерживания заданного расстояния между центрами кривизны зон сгиба с радиусами R_1 и R_2 за счет перехода материала в зону изгиба с краевых и средних участков (рис. 1.15). Переформовка создает значительные контактные напряжения, являющиеся препятствием при изготовлении профилей с покрытием.

В способе изготовления гнутых тонкостенных профилей [106] при производстве профиля 8x11,5x0,7 мм из оцинкованной стали 08пс с полимерным покрытием на стане 0,5-2x20-300 со скоростью 20 м/мин используется восемь переходов. В последнем переходе предусматривают осадку полок с удержанием кромки (рис. 1.16). Данная схема при осадке может приводить к нарушению покрытия на торцах и местах изгиба между стенками и полками при сравнительно большой относительной ширине полки.

В результате исследования деформации металла на наружной поверхности места изгиба на 180° установлено, что с увеличением толщины заготовки деформация растяжения равномерно увеличивается, достигая максимума в средней части места закругления: 60% для толщины металла 2 мм и 90% для толщины металла 6 мм [86]. На внутренней поверхности металл подвержен сжатию (70% приходится на среднюю часть места закругления). При недостаточной адгезионной и когезионной прочности покрытия будет происходить нарушение покрытия в виде образования трещин или отслоения покрытия от металла на средней части места закругления. При этом формовка от 0 до 90° сопровождается утонением металла, а с 90 до 180° – утолщением металла в месте изгиба в результате осадки, т.е. при формовании элемента двойной толщины (ЭДТ) будет происходить знакопеременная деформация, что отрицательно влияет на адгезию покрытия к металлу [93].

При разработке технологии формовки гнутых профилей с защитно-декоративными покрытиями со сложной формой поперечного сечения (наличие ЭДТ, мест изгиба на 90° , 180° , а также участков, формообразование которых произведено местной вытяжкой), необходимо учитывать поведение покрытия при различных сочетаниях деформации растяжения, сжатия и изгиба. Изготовление швеллерных профилей с элементами жесткости типа продольных рифтов в донной части может вызвать растяжение покрытия в зонах сгиба рифтов в результате вытяжки, что может привести к снижению защитных свойств покрытия [93].

На рис. 1.17 изображена схема формообразования равнополочного профиля с гофрами жесткости, предназначенная для исключения трещинообразования у основания гофр и предупреждения волнистости подгибаемых полок [107].

Здесь формование гофров осуществляется в предчистовом переходе радиусом у основания гофра на 20 – 30% меньше конечного радиуса мест изгиба

профиля при освобождении подогнутых элементов от зажатия валками, а в чистовом переходе освобождают от зажатия гофры. Данная схема пригодна лишь для формовки гофр небольших размеров, в то время как увеличение размеров гофр приводит к переформовке зон сгиба и возможности нарушения покрытия, а также к кромковой волнистости в результате большой боковой утяжки материала.

При изготовлении профилей с ЭДТ на стенках профиля [108] места изгиба элементов сдвоенных полок сначала отформовывают по дугам больших радиусов (рис. 1.18), а в последующих переходах эти радиусы постепенно уменьшают ($R_1 > R_2 > \dots > R_5$).

Однако, в случае применения тонкого покрытия в результате обжатия на последних переходах возможно нарушение покрытия в связи с большими контактными напряжениями. При изгибе заготовки с лакирующим покрытием на 90° происходит его разрыхление как с внутренней, так и с наружной поверхности, а при изгибе на 180° – нарушение его сплошности [93]. В случае схемы формовки ЭДТ с постоянными радиусами R_1 подобных изменений в местах изгиба не выявлено.

При наличии на профиле дугообразных отбортовок формовку осуществляют последовательно от периферии к центру по дугам с постоянными радиусами [109] (рис. 1.19). Способ может обеспечить хорошее качество покрытия на наружной поверхности дугообразных отбортовок.

1.5.2. Формование угловых зон профилей

В способе производства гнутых профилей [110] с целью предотвращения утонения в местах изгиба заготовку формуют на предварительных переходах до швеллерного профиля с завышенной шириной донной части, а затем отгибают горизонтальные полки с одновременным сжатием боковых полок до получения профилем окончательных размеров. Способ реализуется в 13 технологических переходов и позволяет уменьшить утонение с 13-15% до 2,2-3,7%. Однако, в случае изготовления профиля с покрытием знакопеременная деформация в угловой зоне ухудшает качество покрытия, а обжатие заготовки может привести к нарушению последнего.

При изготовлении профилей с покрытием предотвращение нарушения покрытия можно достичь за счет увеличения площади контакта заготовки и инструмента [111] с уменьшением ширины мест изгиба по переходам в соответствии с формулой:

$$b_k = b_n (h - [(h-1)(k-1)] / (N-1)), \quad (1.6)$$

где b_k , b_n – ширина мест изгиба в текущем и окончательном переходе соответственно, мм; h – коэффициент увеличения ширины; k – номер текущего перехода; N – число технологических переходов.

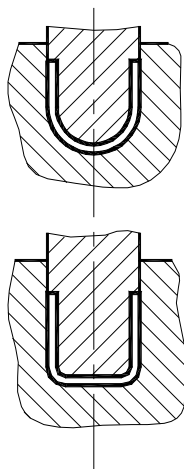


Рис. 1.14. Схема формообразования симметричного равнополочного профиля

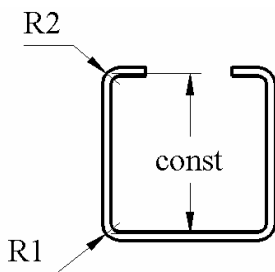


Рис. 1.15. Схема формообразования по способу [105]

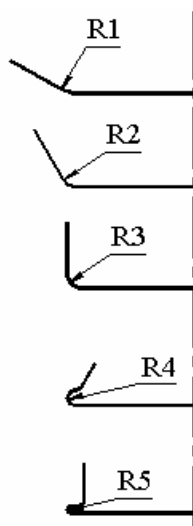


Рис. 1.18. Формообразование профиля с ЭДТ с переменным радиусом

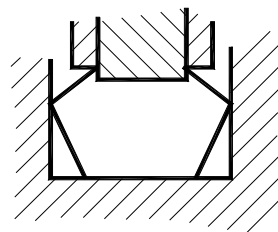


Рис. 1.16. Схема посадки профиля в способе [106]

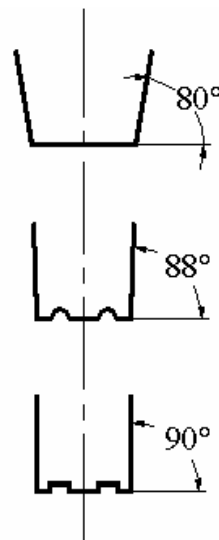


Рис. 1.17. Схема формовки гофр на швеллерном профиле

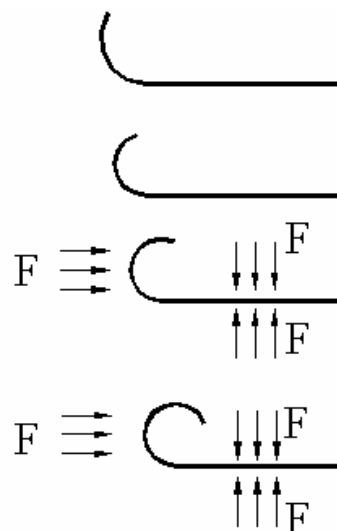


Рис. 1.19. Формообразование дугообразных отбортовок

Однако в этом случае увеличивается количество необходимых технологических переходов. Если же количество переходов оставить прежним, возможно нарушение покрытия со стороны верхнего ролика в зоне сгиба при углах близких к $\rho/2$.

Повышение качества уголковой зоны достигается применением схемы с высвобождением внутреннего контура на каждом из переходов (рис. 1.20) и приложением к торцам заготовки нормальной сжимающей силы P_i , которая определяется формулой [112]:

$$0,9P_{кр} \geq P_i \geq \frac{0,65Q_i}{\sin a_i}, P_{кр} = \frac{4pD}{b}, \quad (1.7)$$

где $P_{кр}$ – критическая сила потери устойчивости полки, Н; Q_i – полное давление стенки на i -м переходе, Н; D – цилиндрическая жесткость полки профиля, Нм;

Однако высвобождение зон сгиба на формирующем ролике может вызвать недоформовку мест изгиба и изменение геометрических размеров профиля.

Для предотвращения нарушения покрытия с внутренней стороны зоны сгиба профиль формируют с переменными радиусами сгиба [113] (рис. 1.21), при $R_1 > R_2 > R_3$; уменьшение ширины мест изгиба до заданной осуществляется во всех переходах на равные величины. Недостаток способа – необходимость калибровки радиуса гiba на последнем переходе.

При изготовлении швеллерных профилей для уменьшения утонения мест изгиба дно профиля предварительно прогибают (рис. 1.22), что улучшает доступ к формовке мест изгиба, а на последнем переходе дно профиля распрямляют [114]. Однако, знакопеременная деформация, которая будет присутствовать на дне профиля, может отрицательно сказаться на стойкости покрытия.

При изготовлении швеллерных профилей [115] для уменьшения пружинения мест изгиба, их формируют с большей кривизной, чем заданная, а в последнем переходе места изгиба переформовывают до заданной кривизны. Переформовка зон сгиба отрицательно влияет на качество покрытия и его последующую стойкость.

При изготовлении профилей по способу [116] с минимально возможными радиусами сопряжения полок и стенок профиля к предварительно отформованной заготовке прикладывают тангенциальные силы (рис. 1.23). В случае изготовления профилей с покрытием в уголковой зоне будут действовать знакопеременные деформации растяжения с последующим сжатием, что отрицательно влияет на качество покрытия.

1.5.3. Изменение свойств покрытия при изгибе

В статье [101] исследована зависимость внутренних напряжений покрытия, измеряемых с помощью рентгеновских линий, от степени деформации. Установлено, что при увеличении деформации внутренние напряжения увеличиваются, а когезионная прочность покрытия уменьшается [98].

В статье [52] предложен способ оценки защитных свойств покрытия на листовом металле после его деформирования, заключающийся в изгибе заго-

товки с покрытием по радиусу, измерении деформации, приведении зоны с покрытием в контакт с агрессивной средой и изучении кинетики изменения электрических характеристик покрытия (сопротивление, емкости, тангенса угла диэлектрических потерь). Резкое изменение свойств покрытия говорит о потере защитных свойств и ставит ограничение на предельную деформацию.

Важным свойством полимерных покрытий является присутствие в них релаксационных процессов [8, 117] после деформации. Это приводит к тому, что при превышении допустимых деформаций нарушение покрытия происходит не сразу, а в течение некоторого времени. Поэтому при анализе устойчивости покрытия к деформациям необходимо учитывать время на прохождение в них релаксационных процессов.

Любая деформация заготовки с покрытием вызывает снижение адгезионных и когезионных характеристик покрытия, что, в свою очередь, ухудшает декоративные и защитные свойства покрытия, уменьшает срок эксплуатации покрытия. Но при этом влияние деформации и прикладываемых сил к покрытию, вызывающих изменение его свойств, может быть различным. В качестве критерия может быть принято резкое (скачкообразное) изменение свойств покрытия.

1.5.4. Влияние технологических факторов на стойкость покрытия

Из дополнительных технологических факторов, влияющих на стойкость покрытия, можно выделить наличие сил трения между заготовкой и инструментом. Максимальная мощность сил трения создается в зонах, где одновременно имеют место максимальное нормальное давление и максимальная разность линейных скоростей инструмента и заготовки [118], поэтому необходимо снижать контактные напряжения и разность линейных скоростей между заготовкой и инструментом путем применения соответствующих схем и режимов профилирования.

При изготовлении профиля с V-образными отгибами по краям полок [119] предусматривают формовку V-образных отгибов на первых переходах с последующей подгибкой сопряженной полки (рис. 1.24). Способ пригоден для производства профилей с покрытием и позволяет по сравнению с прототипом уменьшить радиусгиба с 2,5 – 2,8 мм до 1,8 – 2,0 мм при сохранении покрытия и уменьшить кромковую волнистость с 1,8 – 2 мм до 0,3 – 0,5 мм.

Сила трения оказывает большое влияние на величину касательных напряжений в покрытии при профилировании. При этом коэффициент трения m может зависеть от таких факторов как: шероховатость роликов и заготовки, скольжение между ними, налипание материала на инструмент [120] (рис. 1.25).

Величина коэффициента трения увеличивается при увеличении шероховатости соприкасающихся поверхностей, особенно при налипании материала на одну из контактных поверхностей и мало зависит от взаимного проскальзывания инструмента и заготовки. Наименьший коэффициент трения и минимальное налипание материала на инструмент будет при использовании соответствующих антифрикционных покрытий на формирующем инструменте.

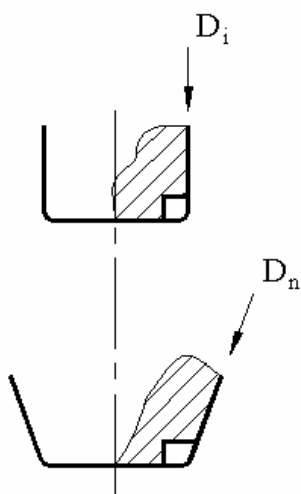


Рис. 1.20. Схема гибки швеллера с освобождением в ролике

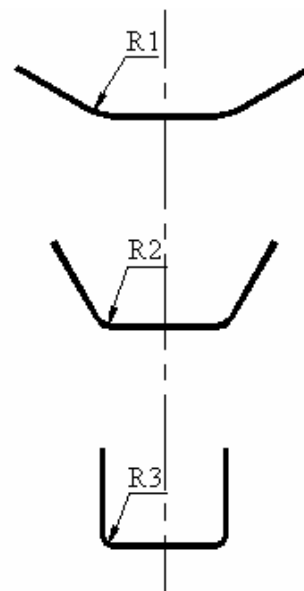


Рис. 1.21. Гибка профиля с переменным радиусом

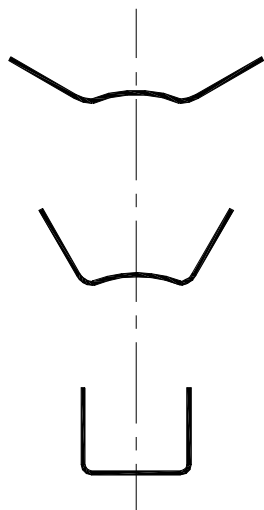


Рис. 1.22. Изготовление профиля с промежуточным формованием выпуклого дна

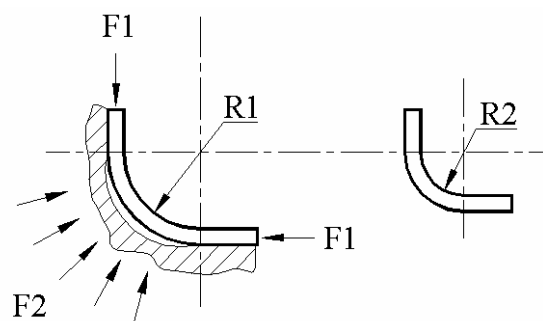


Рис.1.23. Формовка уголковых зон профиля с приложением тангенциальных сил

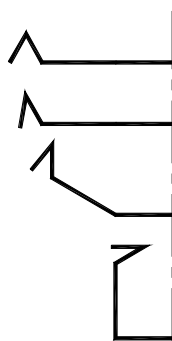


Рис. 1.24. Реализация способа [119]

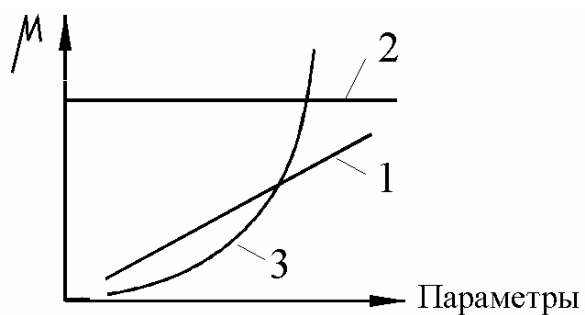


Рис. 1.25. Зависимость коэффициента трения от параметров:

- 1 – шероховатость;
- 2 – скольжение;
- 3 – налипание.

1.6. Возможности применения технологических смазок

Так как при нарушении покрытия основную роль выполняют касательные напряжения, то снижение коэффициента трения становится приоритетной задачей для предотвращения данного дефекта, решение которой дополнительно позволит уменьшить износ калибров, предотвратить механические повреждения поверхности профилей и налипание металла на валки [120], а также обеспечить оптимальный коэффициент трения, предотвратить пробуксовку полосы в валках, исключить большие потери на преодоление сил трения, предохранить валки от преждевременного износа, а профилируемый металл – от царапин и задиров в момент профилирования [86]. В первую очередь решению этой проблемы способствует применение технологических смазок.

Наибольшее применение в профилировании нашли следующие смазки [120]:

- масла (минеральные, растительные);
- производные масел, в основе которых содержатся спирты, кислоты, эфиры;
- эмульсии (смесь масла и воды) с добавлением присадок.

Наличие защитно-декоративного покрытия на листовых металлах ограничивает применение некоторых из них из-за возможности химического взаимодействия смазок (смазочные составы на основе кислот и щелочей) с покрытием, а также сложности удаления смазочных составов после формования. Некоторые покрытия на металле сами выступают в роли смазки и уменьшают коэффициент трения с формующим инструментом. Согласно источнику [121] коэффициент трения при применении 5%-ной эмульсии на основе полимеризованного хлопкового масла при формовке профилей без металлических покрытий составляет 0,1 – 0,16, а с металлическим покрытием 0,09 – 0,14. Рекомендуемые смазки УкрНИИМет при формовке профилей с металлическим лакирующим покрытием, склонным к налипанию: полимеризованное хлопковое масло ($f = 0,08 - 0,1$), цилиндрическое масло № 24 ($f = 0,1 - 0,12$), 5%-ная эмульсия СП-3 ($f = 0,1$), солидол с добавкой молибдена ($f = 0,1$) [121].

Некоторые покрытия имеют повышенную склонность к налипанию на формующий инструмент (что в первую очередь относится к цинковым покрытиям), в этом случае могут применяться смазки на основе натриевой селитры (77 – 84%) [122].

Некоторые виды смазок, помимо снижения коэффициента трения заготовки об инструмент, дают возможность использования готовых изделий без удаления смазки. К таким смазкам можно отнести: водорастворимые смазки на основе спирта или эфира, которые не взаимодействуют с покрытием и легко удаляются [56, 123, 124, 125], водорастворимые смазки на мыльной основе [120], а также смазки с растительными маслами [126].

В последнее время большой популярностью пользуются эмульсолы с различными присадками (антикоррозионными, полирующими и др.). Такие сма-

зочные системы одновременно выполняют дополнительные функции: осуществляют охлаждение формующего инструмента, убирают отслоившиеся частицы покрытия и др.

Понизить коэффициент трения при профилировании можно, к примеру, хромированием поверхности инструмента и применением покрытий на основе нитридов титана, дисульфидов молибдена [126]. Применение данных покрытий также позволит уменьшить перенос покрытий, склонных к налипанию (цинковых), на формующий инструмент.

1.7. Оборудование и технологическое оснащение для изготовления профилей

В настоящее время производимое за рубежом оборудование для профилирования ориентировано в основном на серийное производство профилей для строительства и машиностроения, является громоздким и содержит большое количество профилирующих клеток. Профилегибочные машины многих зарубежных фирм специально спроектированы под производство определенного сортамента профилей в узких диапазонах толщины и ширины профилируемых полос.

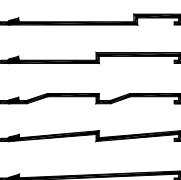
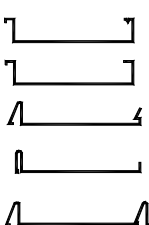
Фирма “KNUDSON MANUFACTURING” (США) изготавливает оборудование для производства панелей фальцевой кровли, металлического сайдинга, водосточных систем и труб из стали, алюминия, цинка, меди толщиной (0,4 – 0,8) мм и рамочных профилей U и C типов, применяемых в конструкциях несущих стен, перегородок, каркасов для киосков и павильонов, изготавливаемых из стали толщиной (0,7 – 1,8) мм. Технические характеристики станков приведены в табл. 1.13. Характерной особенностью станков является расположение на одной станине всех компонентов (от перфоратора до отрезного устройства), для станков KR-21VP, KR-18B, KR-84N, KR-56A характерна компактность и мобильность (перфорация осуществляется в роликах, количество формующих переходов 7 – 10, гидравлический или ручной отрубной нож).

Фирма “PIEMME” (Италия) изготавливает автоматизированные линии состоящие из рулонницы подающей, станка профилирующего, правильных роликов, штампа перфорирующего, роллинга направляющего, штампа отрубного, стола со сбрасывателем. Особенности: станок 20- или 40- клетьевой, передача крутящего момента на клеть крестовиной, серьга регулируемая эксцентриковая, наличие датчиков измерения отклонения профиля от заданных параметров, рукоятки управления – маховики, возможность смещения серьги и замена валов для профилирования заготовок шириной от 100 до 1500 мм.

Фирма “DREISTERN” (Германия) выпускает профилирующие станки имеющие следующие особенности: количество клеток – до 39, привод на каждый вал – крестовина, клеть включает себя ролики с серьгами, регулировка клетки ведется тремя маховиками (два – для смещения ролика в горизонтальном направлении, один – в вертикальном), перемещение верхнего вала, клеть снабжена маслоподающей системой.

Таблица 1.13

Технические характеристики профилегибочных станков “KNUDSON”

Knudson					Модель	Сечение профиля	Кол-во клетей, шт	Производ-сть, м/мин	Потребляемая мощн., кВт	Толщина материала, мм	Привод на валы	Возмож-ть переналадки на другой профиль	Вид станка
KS-246A	KR-56A	KR-84N	KR-18B	KR-21 VP	Габариты, м								
4,2*0,81*0,63	3,55*0,62 *1,3	4,57*0,84*1,5	3,84*0,97*1,3	2,8 *1,05* 0,55									
													
10		8÷10	7	10									
12,2	15,2	12,2	12,7	12,2									
5,5		1,1	11,8	1,5									
0,7÷1,8	0,4÷0,8	0,3÷0,8	0,5÷1,1	0,4÷0,8									
Гидравлич.	Гидравлич.	Механич.	Гидравлич.	Гидравлич.									
В пределах ширины на С и U проф.	На 2 проф. разн. ширины	До 5 проф. без замены оснастки	Отсутств.	До 5 видов профилей									
													

Фирма “SAMCO” (Канада) производит профилегибочное оборудование различных конфигураций с количеством клеток от 8 до 18, что позволяет изготавливать профили различного сечения (толщины материала, глубины формовки). Конструкция клеток классическая (рис. 1.26.а) или блочная (рис. 1.26.б). Особенности станков: жесткая фиксация конца валов клеток, наличие правильного устройства у малоклетьевых станков, формовка (удержание) только краевых элементов у профилей с широким дном, привод может осуществляться как при помощи карданов, так и от общего вала при помощи конических передач.



а



б

Рис. 1.26. Станки фирмы “Samco”: а – классические клетки, б – блочные клетки

Фирма “SYNTECH OY” (Финляндия) производит автоматические линии по профилированию тонкого металлического листа (металлочерепица, сайдинг и др.). Линия профилирования панелей типа “Сайдинг” позволяет профилировать стальную полосу толщиной 0,4-0,6 мм с различными полимерными покрытиями. Особенности линии: роликовый блок состоит из 13 вальцовочных пар, нижние вальцы не приводные, привод верхних вальцов цепной, скорость прокатки 0-80 м/мин.

Фирма “ROLL FORMING ENGINEERING” (Южная Корея) производит профилегибочное оборудование для изготовления профилей из различного материала толщиной 0,5 – 3,0 мм, количество клеток 7 – 30, скорость профилирования 5 – 20 м/мин, формующие ролики имеют хромированное покрытие, привод осуществляется посредством крестовины, имеется правильное устройство.

Фирма “DYNARORM” (Сингапур) производит оборудование для изготовления профилей толщиной 0,2 – 3,5 мм из заготовки шириной 100 – 350 мм. Станки оснащены дисплеем, имеется возможность автоматического и ручного управления, связи с компьютером. Характеристики станков приведены в табл. 1.14.

Таблица 1.14

Технические характеристики станков фирмы “DYNAFORM”

Модель	3R	4R	6R	8R
Толщина ленты, мм	0,2 - 0,8	0,4 - 1,5	1,2 - 2,0	1,8 - 3,5
Ширина ленты, мм	100/200/300		150/250/350	
Количество клеток, шт	6 - 23			
Диаметр валов, мм	30	40	60	80
Межклетьеовое расстояние, мм	120/150	190/210	150/300	320/360
Межосевое расстояние, мм	78 - 96	70 - 120	96 - 140	115 - 150
Диаметр валов, мм	30	40	60	80
Мощность двигателя, кВт	4 - 18	7,5 - 18	15 - 30	18 - 35
Производительность, м/мин	20/30/40			

Фирма “DALLAN” (Италия) изготавливает профилирующие станки и автоматизированные линии для производства готовых профилей толщиной от 0,2 до 2,0 мм из лент с покрытием и других материалов. Станки с количеством клеток 12 (рис. 1.27) позволяют изготавливать профили строительной номенклатуры (для подвесных потолков, жалюзей и др.).



Рис. 1.27. Станок фирмы “Dallan”

Из отечественных производителей профилирующего оборудования наиболее известен УкрНИИМет – разработчик и производитель мощных высокопроизводительных станков, предназначенных для производства широкой номенклатуры профилей различного поперечного сечения с толщиной от 0,5 до 8,0 мм из различных материалов, используемых в разнообразных конструкциях и сооружениях [77, 88, 127]. Технические характеристики некоторых станков, выпускаемых УкрНИИМет, приведены в табл. 1.15.

Таблица 1.15

Технические характеристики станков УкрНИИМета

Технические характеристики	1-7х80 - 500	1-4х400- 1500	1-8х60- 730	2-6х50- 500
Толщина полосы, мм	2 - 7	1 - 4	1 - 8	2 – 6
Длина профилей, м	3 -12	2,5 -12	2 -12	2 –12
Максимальная высота сечения, мм	160	200	115	115
Производительность, м/мин	30 -150	30 -180	7,2 - 20	3,5 – 9
Количество клетей, шт	14	20	10	14
Мощность привода, кВт	800	600	58	46
Диаметр верхних валков, мм	540	614 - 658	375	375
Диаметр нижних валков, мм	230	302	150	150
Диаметр валов стана, мм	170	230	110	110
Макс. давление металла на валки, кН	300	200	120	160
Макс. крутящий момент, кН·м	9,55	3,15	2,4	2,4
Межклетьеовое расстояние, мм	1400	1200	1060	1060

Среди современных отечественных производителей нужно отметить оборудование, производимое ООО “Аркада”, которое выпускает автоматизированные линии по изготовлению гнутых профилей и несколько видов профилирующего оборудования (станок без блоков, станок с блоками). Характеристики оборудования приведены в табл. 1.16.

Отечественное оборудование УкрНИИМет и “Аркада” в основном рассчитано на крупносерийное производство, что обуславливает большое количество клетей и соответствующую цену оборудования. Зарубежное оборудование, как правило, специализированное и рассчитано на изготовление определенного типа (или номенклатуры) профилей.

Однако в настоящее время необходимо оборудование, позволяющее осуществлять быструю переналадку с одного профиля на другой, сравнительно недорогое и рассчитанное на мелкосерийное или серийное производство.

Таблица 1.16

Характеристики и стоимость оборудования производимое ООО “Аркада” (2002 г.)

Тип а/л	Шири- на за- готов- ки, мм	Потреб- ляемая мощность, кВт	Кол-во клетей, шт	Произ- водитель ность, м/мин	Стоимость, тыс. у.е.		
					а/л без инст. наладки	стана с од- ной инст. наладкой	инст-ой наладки
1	200	25-45	10-15	до 40	120-140	35-51	10-18
2	400	40-60	10-15	до 40	150-185	50-65	16-25
3	1200	50-75	15-25	до 30	190-220	75-95	21-35

Станки, производимые ОАО “Ульяновский НИАТ”, предварительно были разработаны под авиационную номенклатуру профилей [81, 128, 129], но в настоящее время применяются и для изготовления профилей разнообразного сечения за минимальное количество переходов (4-8). В табл. 1.17 приведен перечень профилегибочных станков, используемых при производстве профилей для авиастроения в ОАО “УлНИАТ” в 1982 – 2001 гг.

Таблица 1.17

Станки семейства ГПС (ОАО "Ульяновский НИАТ") [81]

Станок	Год разработки	Число клеток	Профили для ЛА	Диаметр валов, мм
ЭГПС-1	1983	2	-	32
ГПС-200	1986	4	“Бурянь”	65
ГПС-200 М	1987	1+4*	ТУ-204	65
ГПС-200М1	1989	1+4*	ИЛ-114	50
ГПС-300	1991	4	ЯК-48	50
ГПС-300М	1993	4	ТУ-334	50
ГПС-300М6	1995	6	БЕ-200	50
ГПС-500	1997	6	-	-
ГПС-500М6	1999	6	АН-70	50

* – Подающая клетъ с приводными валами.

Большое разнообразие типов профилегибочного оборудования отчасти определяет необходимость применения и соответствующих видов технологического оснащения, не говоря уже о размерных параметрах.

В табл. 1.18 приведены виды переналадок профилегибочного оборудования на основе анализа станков отечественного и зарубежного производства.

Применяемые калибры отличаются по виду (открытые, закрытые), по толщине профилируемого металла, удобству настройки и т.д. (см. табл.1.11). Первые 3 типа калибров рассчитаны на толщину более 2 мм, поэтому для меньших толщин заготовок их не применяют из-за необходимости использования большого числа технологических переходов и поперечного смещения профиля. Наиболее применим закрытый калибр с цилиндрическими буртами, а также закрытый калибр с коническими участками. Закрытый калибр с цилиндрическими буртами позволяет интенсифицировать процесс путем увеличения размеров зон пластических деформаций в результате контакта с радиусом бурта вследствие торцевого поджатия и аксиального натяга заготовки, а также предотвращает поперечное смещение профиля в калибре.

Однако при этом увеличиваются контактные силы, действующие на заготовку, что может отрицательно сказаться на качестве покрытия.

Виды переналадок технологического оснащения

№	Вид переналадки	Примечание
1	Полная замена роликовой оснастки	Применяется на универсальных станках
2	Регулировка положения на один тип профиля роликовой оснастки вдоль вала клетки	Позволяет изготавливать один тип профиля с различной шириной донной части
3	Переналадка универсальной оснастки под несколько видов профилей на один из видов	Например: изготовление на одной оснастки 5 видов сайдинга. Переналадка осуществляется смещением отдельных формирующих частей ролика в станке
4	Настройка оснастки под несколько типов профилей с одним характерным размером	Изготовление С-образного или швеллерного профиля с различными размерами стенок и полок при одинаковой ширине донной части
5	Отсутствие переналадки	Станок предназначен для выпуска одного типа профилей

Закрытый калибр с коническим участком на нижнем ролике и выступом на верхнем предотвращает поперечное смещение профиля и смятие кромки, но степень деформации и аксиальный натяг менее интенсивны, чем в предыдущем варианте.

Выводы

1. Хорошая весовая отдача, высокое качество наряду с высокими защитно-декоративными свойствами профилей с покрытием предопределяет широкое распространение их в строительной, автомобильной индустрии, при производстве бытовой техники; при этом стоимость профилей, получаемых из материала с покрытием ниже на 10-15% по сравнению со стоимостью профилей окрашенных после изготовления.

2. В качестве покрытий листовых материалов применяют металлические (цинковые, алюминиевые) и полимерные (полиэфирные, акриловые, пластизольные и др.) покрытия. При этом материалы с покрытием еще недостаточно изучены применительно к процессу профилирования.

3. Изготовление профилей методом интенсивного деформирования в серийном и мелкосерийном производстве имеет явные преимущества перед другими методами, а именно, перед традиционным профилированием и стесненным изгибом и является более экономически оправданным. Однако наличие высоких контактных напряжений, возникающих при изготовлении профилей МИД, сдерживает применение этого метода при получении профилей из мате-

риала с покрытием, при этом существующие теоретические расчеты или сложны в применение или дают большую погрешность.

4. Основным потребителем профилей с покрытием является строительная индустрия, где наибольшее применение нашли профили П и С-образного сечения с цинковым покрытием и профили с элементами жесткости с полимерными покрытиями.

5. При оценке качества покрытия наибольшее применение нашли способы оценки декоративных свойств по балльной системе, защитных свойств - испытанием в жидких агрессивных средах, атмосферостойкости - по устойчивости в камере солевого тумана. При оценке адгезионной прочности не было найдено устройства, позволяющего имитировать нагрузки, имеющие место в процессе профилирования.

6. Анализ работ по исследованию процесса изготовления профилей МИД показывает, что имеющиеся материалы не позволяют разработать технологический процесс, обеспечивающий отсутствие НП. Поэтому данная книга посвящена решению проблемы получения профилей из материала с покрытием непосредственно в роликах методом интенсивного деформирования на гибочно-прокатных станках.

ГЛАВА 2

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПРЕДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для установления технологических параметров НП при профилировании необходимо проанализировать воздействия, осуществляемые на заготовку с покрытием в процессе изготовления профиля, и установить допустимые значения этого воздействия для покрытия.

2.1. Классификация видов воздействия на заготовку при профилировании

В процессе профилирования покрытие заготовки подвержено воздействию:

- растягивающих или сжимающих деформаций, вызванных изгибом;
- контактных напряжений;
- деформаций изгиба и контактных напряжений.

Деформации, вызванные изгибом, имеют место по угловым и криволинейным зонам профиля. На рис. 2.1 приведены характерные зоны контакта при профилировании МИД.

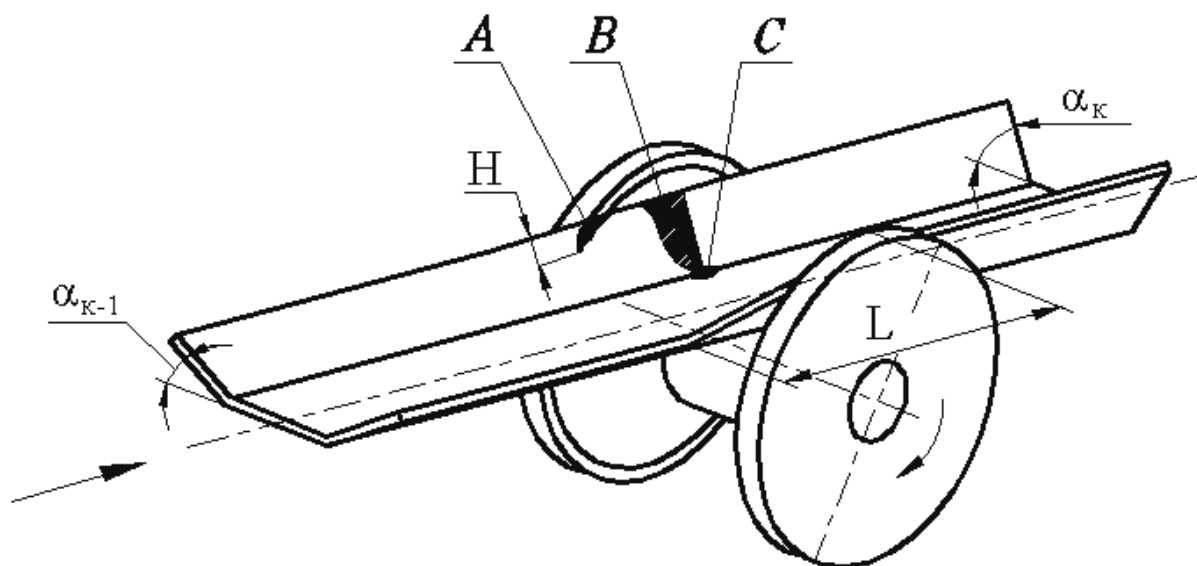


Рис. 2.1. Характерные зоны контакта роликового инструмента с заготовкой при профилировании МИД: А – контакт с буртом нижнего ролика; В – контакт с коническими частями нижнего ролика; С – контакт с формирующей частью верхнего ролика (условно не показан).

Зона А характерна для профилирования МИД и связана с наличием вертикального бурта, обеспечивающего замыкание роликовой пары.

Зона В характерна практически для любых калибров и применяемых методов профилирования; в “чистом виде” характерна для открытого калибра при углах подгибки до 70° .

Зона С характерна для любых калибров и связана с формовкой угловых зон профиля.

В начале подгибки перед очередным роликовым калибром полка профиля занимает положение 1 (см. рис. 2.2), что соответствует ее положение после предыдущего перехода. На участке плавного перехода L (см. рис. 2.1) положение полки изменяется и в зоне А полка занимает промежуточное положение 2 (см. рис. 2.2). В этом положении полка уже практически подогнута на окончательный, в данном переходе, угол. Окончательная подгибка полки и формовка угловой зоны осуществляется в зонах В и С (см. рис. 2.1), в результате чего полка занимает положение 3 (см. рис. 2.2).

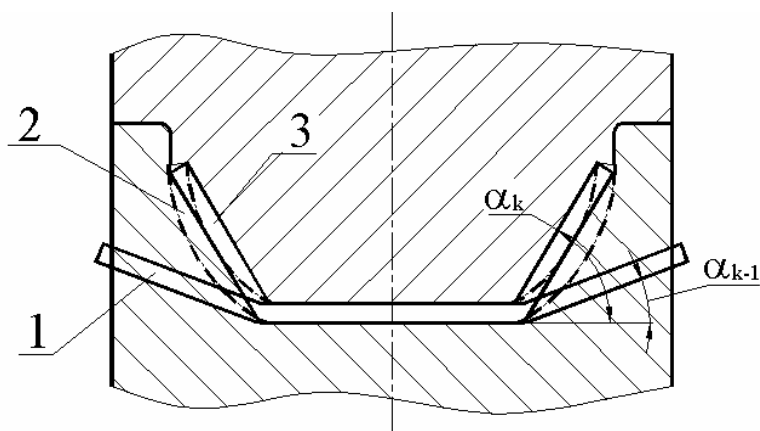


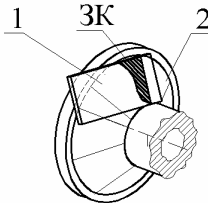
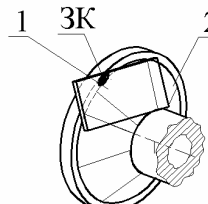
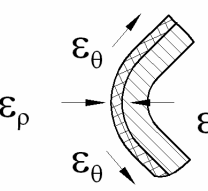
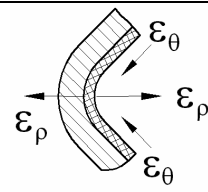
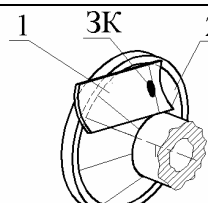
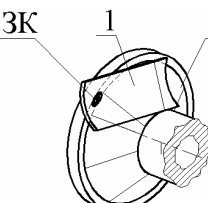
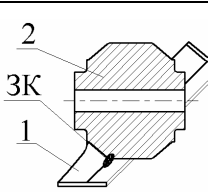
Рис. 2.2. Основные положения полки при подгибке в роликовом калибре:
1 – положение полки после предыдущего перехода; 2 – положение полки после подгибки зоной А (см. рис. 2.1), 3 – положение полки после подгибки зоной В и С

В положении 2 полка может приобрести некоторую поперечную кривизну, что связано с гибкой по свободной схеме (без удержания полки) с приложением силы вблизи предторцевой части профиля. При углах подгибки, близких к 90° , вся сила будет передаваться посредством скругления бурта, при этом будет происходить смещение контакта с предторцевой части профиля к предугловой, что вызовет увеличение прилагаемых сил и рост контактных напряжений (рассмотрено далее). Расположение контактных зон, приведенных на рис. 2.1, характерно и для профилей сложных конфигураций.

Роликовый инструмент в зоне контакта может имеет [132] криволинейную (сферическую или цилиндрическую) форму, а заготовка при этом может иметь прямолинейную № 1-2 (табл. 2.1), выпуклую № 5-6 или вогнутую №7 форму. При контакте с соответствующей зоной на инструменте (А, В, С) (см. рис. 2.1) на поверхность заготовки действуют контактные напряжения: со стороны бурта $S_K^{бур}$, со стороны конической части ролика $S_K^{кон}$, со стороны формирующего радиуса $S_K^{крив}$. Также нужно отметить наличие проскальзывания меж-

Таблица 2.1

Классификатор видов воздействия на поверхность заготовки при МИД

№	Участок заготовки	Вид элемента ролика (условно) (рис. 2.1)	Характерные зоны	Схема взаимодействия	
1	Прямолинейный*	Криволинейный (цилиндрический) В	Контакт с коническими и цилиндрическими участками ролика	$s_K^{кон}$	
2		Криволинейный (сферический) А	Контакт со скруглением на буртах	$s_K^{бур}$	
3	Криволинейный	наружный	Наружная зона сгиба (криволинейного элемента)	e_P	
4		внутренн.	Внутренняя зона сгиба (криволинейного элемента)	$e_{сж}$	
5		наружный	Криволинейный (цилиндрический) В	$s_K^{кон}$ e_P	
6			Криволинейный (сферический) А	$s_K^{бур}$ e_P	
7		внутренн.	Контакт с формующей частью (верхнего) ролика	$s_K^{крив}$ $e_{сж}$	

1 – заготовка, 2 – ролик, 3К – зона контакта

* - для упрощения классификации

ду инструментом и заготовкой, при этом линейная скорость инструмента в зоне контакта, как правило, превышает линейную скорость заготовки.

Другой вид воздействия – изгиб заготовки без приложения в зоне сгиба сил, в результате чего на наружной №3 и внутренней №4 поверхностях уголко-вых зон появляются соответственно растягивающие e_p и сжимающие $e_{сж}$ деформации.

При наличии контакта инструмента с криволинейной частью заготовки одновременно возникают контактные напряжения S_K и деформации e_p ($e_{сж}$). Данный тип взаимодействия наименее желателен, поскольку изгиб заготовки вызывает возникновение (увеличение) внутренних напряжений в покрытии, в результате чего нарушение покрытия может иметь место при более низких значениях S_K .

2.2. Исследуемые материалы и критерии оценки качества покрытия

2.2.1. Материалы с покрытием, исследуемые в работе

Исследуемые материалы с покрытием приведены на рис. 2.3, 2.4 и в табл. 2.2. Использовали материал различных производителей, поскольку одна и та же марка материала у различных производителей может отличаться по свойствам (в связи с отличием технологии нанесения покрытия, использовании различных компонентов и т.д.). Исследование проводили на материалах как отечественных производителей НЛМК, ЛМЗ, Северсталь, так и материалах зарубежного производства SSAB (Швеция). Исследовали 7 типов ПЭ покрытий № 1-7 4-х производителей, включая различную толщину стальных подложек, 2 типа ПУ № 8-9 и Пл № 10-11 покрытий, оцинкованную сталь 3-х производителей № 12-14 с различной толщиной подложки и покрытия, пленочное покрытие №16 зарубежного производства, а также полиэфировое №18, пленочное №17 и металлическое №15 покрытие на алюминиевых подложках.

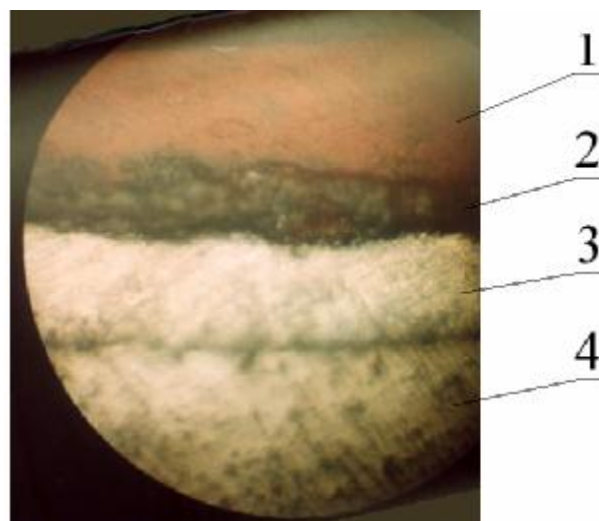


Рис. 2.3. Слои (система) покрытия на подложке: 1 – наружное полимерное покрытие, 2 – грунт, 3 – металлическое цинковое покрытие, 4 – подложка



Рис. 2.4. Виды систем покрытий, применяемых при исследовании: А – ПЭ покрытие на стальной подложке, Б – Пл, ПУ покрытие на стальной подложке, В – Zn (Al) покрытие на металлической подложке, Г – пленочное покрытие на металлической подложке

Таблица 2.2

Исследуемый материал с покрытием

Система	№ поз.	Тип подлож.	Вид нар. покр.	Цвет покрытия	Цвет по RAL, PRELAQ	Толщина подложки, мм	Толщина покр, мкм	Производитель
А	1	Ст	ПЭ	зеленый	RAL 6002	0,55	10-20	НЛМК
	2	Ст	ПЭ	белый	RAL 9003	0,55	10-20	НЛМК
	3	Ст	ПЭ	красный	RAL 3003	0,55	10-20	ЛМЗ
	4	Ст	ПЭ	синий	RAL 5005	0,55	10-20	ЛМЗ
	5	Ст	ПЭ	красный	PRELAQ742	0,55	10-20	SSAB
	6	Ст	ПЭ	оранжев	RAL 2004	1,0	10-20	Электрош
	7	Ст	ПЭ	зеленый	RAL 6002	1,5	10-20	НЛМК
Б	8	Ст	ПУ	зеленый	PRELAQ830	0,7	50-70	SSAB
	9	Ст	ПУ	красный	PRELAQ747	0,7	50-70	SSAB
	10	Ст	Пл	зеленый	PRELAQ925	0,7	90-110	SSAB
	11	Ст	Пл	черный	PRELAQ015	0,7	90-110	SSAB
В	12	Ст	Zn (гор)	-	-	0,5/1,0/1,5	20-40	НЛМК
	13	Ст	Zn (гор)	-	-	0,5/1,0/1,5	20-40	Северст.
	14	Ст	Zn (элек)	-	-	0,5	3-5	ИСПАТ-КАРМЕТ
	15	Ал	Ал	-	-	1,0	40-60	КрАМЗ
Г	16	Ст	Пленка ПВХ	под цвет дерева	-	0,7	100-200	SSAB
	17	Ал	Пленка	под цвет золота	-	0,4	40-60	SSAB
	18	Ал	ПЭ	белый	RAL 9003	0,4	10-20	КрАМЗ

Основные исследования проведены для покрытий № 1 – 14, для покрытий № 15 – 18 проведены только постановочные эксперименты.

2.2.2. Критерии оценки качества покрытия

В процессе изготовления профиля происходит снижение качества его покрытия (уменьшение декоративных и защитных свойств покрытия). Поэтому необходимо ввести критерии оценки качества покрытия после изготовления профиля.

Приняты следующие способы оценки качества покрытия:

1. Балльная система оценки покрытия или сравнение с эталоном уровня снижения декоративных свойств покрытия (рис. 2.5);
2. Сравнение времени отслаивания деформированного T_d и недеформированного (исходного) T_n покрытия в агрессивных средах;
3. Сравнение толщины деформированного S_d и недеформированного (исходного) S_n покрытия;

В свою очередь выбор способа оценки качества покрытия будет зависеть от назначения профиля (т.е. покрытие профиля выполняет декоративную и/или защитную функцию) и вида покрытия (табл. 2.3). Основным способом оценки является балльная система, где номер балла присваивается в зависимости от видимости дефекта (при оценке декоративных свойств) или снижения соответствующего параметра $\frac{T_d}{T_n}$ или $\frac{S_d}{S_n}$ (при оценке защитных свойств). При этом

вводим параметр “а” как показатель состояния покрытия после деформации. В табл. 2.4 приведена балльная система оценки декоративных свойств покрытия в зависимости от его состояния после изготовления профиля.

Качество покрытия оценивается по палетке-индикатору (см. рис. 2.5) с образцами покрытий, соответствующих табл. 2.4.

Таблица 2.3

Способы оценки качества покрытия после деформирования

Способ оценки		Характерные покрытия	Параметр	Качество покрытия, балл	Величина параметра “а”
1		2	3	4	5
По декоративным свойствам					
Д ₁	По видимости дефектов	Зп, ПЭ, ПУ, Пл	a_1^d	5	0,95-1
				4	0,8-0,95
				3	0,5-0,8
				2	<0,5

Табл. 2.4

1		2	3	4	5
По защитным свойствам					
З ₁	Сравнением времени от- слаивания	ПЭ	$a_1^3 = \frac{T_{\text{д}}}{T_{\text{п}}}$	5	0,95-1
				4	0,8-0,95
				3	0,5-0,8
				2	<0.5
З ₂	По уменьше- нию толщины покрытия (сди- ра покрытия)	Zn, ПУ, Пл	$a_2^3 = \frac{S_{\text{д}}}{S_{\text{п}}}$	5	0,8-1
				4	0,6-0,8
				3	0,4-0,6
				2	<0,4

Таблица 2.4

Оценка декоративных свойств D_1 покрытия по видимости дефекта

Балл	Обобщенный показатель a_1^D	Декоративные свойства
5	0,95-1	Без изменений
4	0,8-0,95	Незначительные изменения цвета, наличие рисок, трещин, видимых при увеличении (ЛП-1-10х)
3	0,5-0,8	Изменение цвета, наличие рисок, трещин видимых без увеличения (вблизи)
2	0,3-0,5	Изменение цвета, наличие рисок, трещин, потертостей, видимых на расстоянии (300-500) мм
1	<0,3	Изменение цвета, наличие грубых рисок, трещин, сдилов и отслаивания покрытия

При исследовании покрытия на защитные свойства $З_1$ применяется метод оценки состояния покрытия при испытании в жидких агрессивных средах [53]. В качестве агрессивной среды используется 30%-ый раствор серной кислоты, что связано в первую очередь со значительным влиянием сернистых включений в атмосфере воздуха на состояние (срок службы) покрытия при эксплуатации.

Методика исследования включает следующие этапы:

1. Из деформируемого и исходного материала с покрытием вырезаются образцы размером 20х20 мм.



Рис. 2.5. Палетка-индикатор для оценки качества декоративных свойств полимерных покрытий

2. Образцы приводят в контакт с агрессивной средой.

3. Фиксируют время, в течение которого происходит отслоение покрытия от подложки.

4. Сравнивают время отслоения деформируемого T_d и недеформируемого T_n покрытия; рассчитывают коэффициент $a_1^3 = T_d / T_n$ и присваивают соответствующий балл по табл. 2.3.

Указанный химический раствор воздействует только на ПЭ (и сходные) покрытия. На ПУ и Пл покрытия наблюдалось полное отслоение покрытия от подложки без нарушения сплошности покрытия.

При исследовании защитных свойств Z_2 измеряют толщину покрытия на деформируемой S_d и исходной S_n заготовке, рассчитывают коэффициент $a_2^3 = S_d / S_n$ и присваивают соответствующий балл (табл. 2.3).

Требования, предъявляемые к покрытию на профиле после деформирования, зависят от назначения профиля и дополнительных условий, предъявляемых к нему, и представлены в табл. 2.5 в виде баллов, оценочные значения которых приведены ранее (см. табл. 2.3).

Таблица 2.5

Требования, предъявляемые к качеству покрытия, в зависимости от назначения профиля

Назначение профиля	Дополнительное условие к качеству покрытия	Требования качества покрытия		Возможные области применения
		по декоративным свойствам*	по защитным свойствам*	
Декоративное	Особое	5	4 (3)	Внутри жилых помещений (лицевые элементы)
	Среднее	4	3	
	Низкое	3	3 (2)**	
Защитное	Особое	4 (3)	5	Внутри помещений (не лицевые элементы)
	Среднее	3	4	
	Низкое	3 (2)**	3	
Защитно-декоративное	Особое	5	5	Снаружи помещений (лицевые элементы)
	Среднее	4	4	
	Низкое	3	3	

* - в случаях требования среднего и низкого качества профиля могут не контролироваться защитные свойства при декоративном назначении и декоративные свойства при защитном назначении покрытия профиля;

** – в особо сложных случаях.

Таким образом, в зависимости от назначения профиля к качеству покрытия будут предъявляться различные требования по декоративным и защитным свойствам; при этом определяются значения параметра a (a^3 и a^1), исходя из ко-

торых определяются минимальные требования к декоративным и защитным свойствам покрытия при испытании.

2.3. Изгиб заготовки с покрытием

Моделирование воздействия изгиба позволяет определить допустимые значения деформации при изгибе и минимальные радиусыгиба угловых зон профиля.

2.3.1. Методика, применяемая при исследовании материала с покрытием на изгиб

Как правило, при изгибе (без контакта) наибольшее внимание уделяют наружной поверхности зоны сгиба, подверженной наибольшим деформациям растяжения. Для определения допустимых деформаций растяжения использовали ГОСТированный метод [37] (п. 1.2.1) испытания прочности покрытия при изгибе “Т” и прокаткой предварительно согнутой заготовки в цилиндрических роликах (табл. 2.6, рис. 2.6, 2.7).

Наружную сторону зон сгиба образцов оценивали по остаточным декоративным и защитным характеристикам согласно ранее принятой балльной системе (п.2.2.2) и в зависимости от назначения профиля (см. табл. 2.5) определяли минимальный радиусгиба для уголковой зоны профиля. Для повышения точности оценки испытанию были подвергнуты по 5 образцов из каждого материала с последующим усреднением результатов.

Оба варианта исследований показали практически одинаковые результаты.

В качестве дополнительного испытания производили контакт покрытия на наружной части зоны сгиба с неметаллическим материалом (фторопластом, деревом, войлоком), при этом декоративные свойства после одноразового контакта не должны меняться в пределах установленного балла.

2.3.2. Минимальные значения радиусов и допустимые значения деформации при изгибе

Допустимую деформацию растяжения определяли по формуле [133]:

$$[e] = \frac{S}{2R_{BH} + S}. \quad (2.1)$$

На рис. 2.8 и 2.9 представлены минимальные радиусыгиба материала с покрытием и значения допустимой деформации, усредненной от обоих вариантов и рассчитанной по формуле (2.1).

Выбор минимального радиуса или допустимой деформации зависит от требований к профилю по декоративно-защитным свойствам (см. табл. 2.5). В зависимости от необходимого значения балла и вида покрытия выбирается зна-

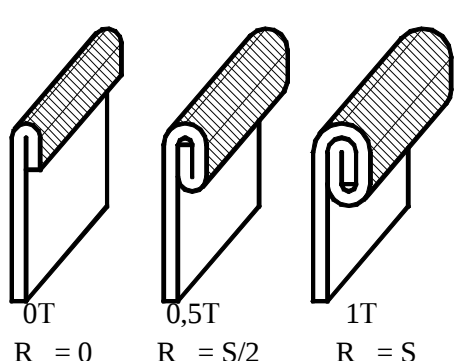
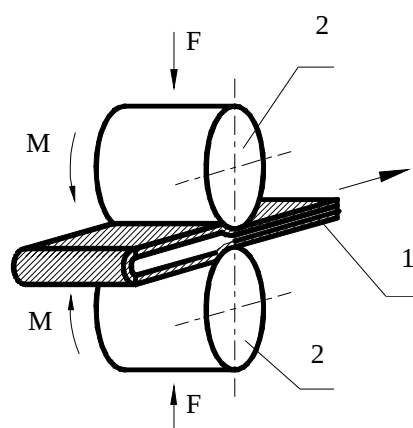
чение минимального радиуса или максимальной деформации по декоративным (рис. 2.8) или по защитным (рис. 2.9) свойствам.

В общем случае не отмечена характерная зависимость между декоративными и защитными свойствами.

При применении систем покрытия ЛКП-Zn некоторая потеря защитных свойств ЛКП не вызывает значительного ухудшения качества профиля в связи с наличием цинкового подслоя. Поэтому в некоторых случаях значение минимального радиуса по защитным свойствам можно уменьшить.

Таблица 2.6

Этапы испытания материала с покрытием на изгиб

Испытание на изгиб “Т”: 1. Из исходного материала вырезаются образцы в количестве $3 \times T$ (где T – количество предполагаемых изгибов) размером 20x250 мм. 2. Образцы (5 шт) изгибают на 180° на расстоянии 25 мм от его края (исследуемым покрытием сверху) и затем сплющивают в тисках. При этом дополнительно фиксируют силу сжатия тисков при первом сплющивании. 3. Первому изгибу присваивают значение $0T$. Откладывают 3 образца и продолжают изгибать указанным выше способом, откладывая при каждом изгибе по 3 образца. Общее количество образцов зависит от стойкости покрытия.  Рис. 2.6. Схема формовки профиля при определении минимального радиусагиба заготовки с покрытием при использовании метода “Т”	Прокатка предварительно согнутой заготовки в роликах: 1. Из исходного материала вырезают $3 \times T$ образцов. 2. Образцы изгибают на 180° на оправке на расстоянии 25 мм от его края (исследуемым покрытием сверху) на радиус, соответствующий $(5-8)T$ (т.е. в 2-3 раза превышающий минимальный радиусгиба для данного покрытия). 3. Данные образцы прокатывают через цилиндрические валки с зазором $(T-1)$, откладывают 3 образца и продолжают прокатывать, уменьшая при каждом опыте зазор между роликом на T.  Рис. 2.7. Схема формовки профиля при определении минимального радиусагиба заготовки с покрытием: 1 – прокатываемая заготовка, 2 – цилиндрические валки
---	--

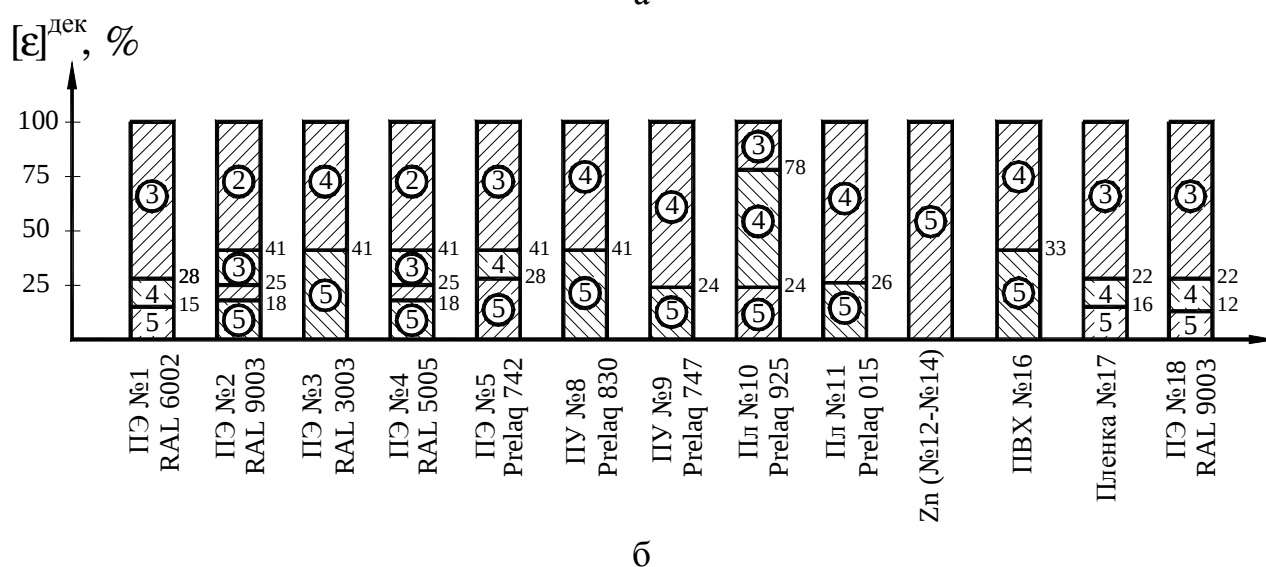
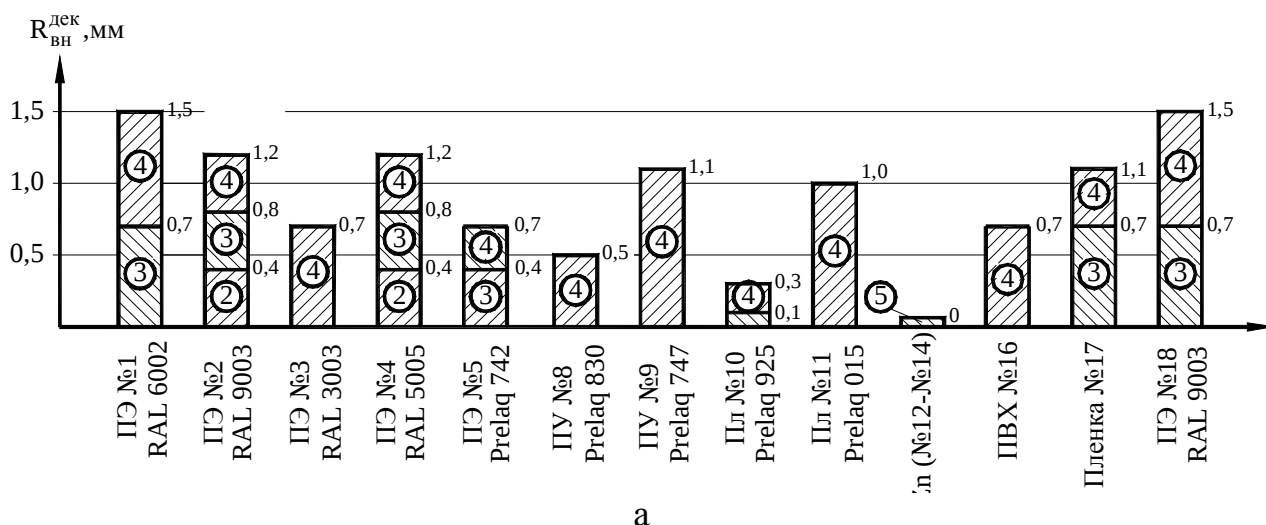


Рис. 2.8. Значение минимального радиуса $R_{вн}$ (а) и допустимой деформации $[ε]$ (б) при изгибе на 180° , исходя из условия сохранности декоративных свойств покрытия

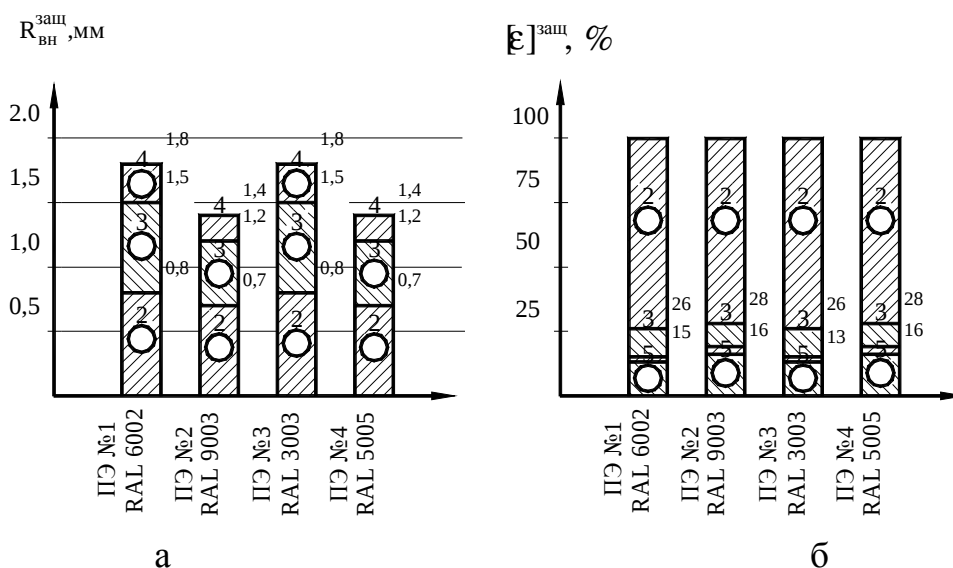


Рис. 2.9. Значение минимального радиуса $R_{вн}$ (а) и допустимой деформации $[ε]$ (б) при изгибе на 180° , исходя из условия сохранности защитных свойств ПЭ покрытия

2.3.3. Исследование образцов при формовке ЭДТ

Особый интерес представляет формовка заготовки на ЭДТ, поскольку такая номенклатура профилей занимает отдельную позицию из профилей с ЭЖ.

Как было отмечено ранее, при испытании на изгиб “Т” фиксировали силу сжатия губок в тисках. На рис. 2.10 представлена зависимость силы формовки ЭДТ от зазора между смыкаемыми элементами и толщины исходной подложки.

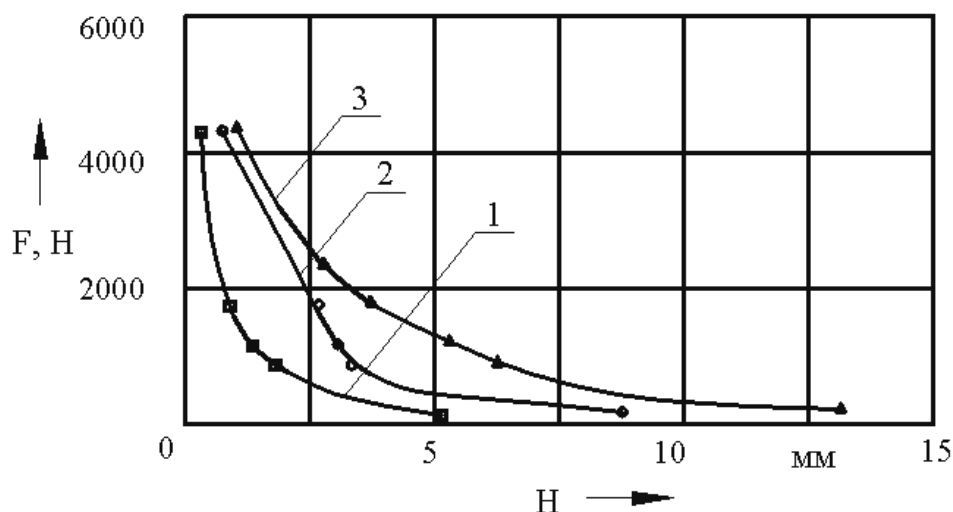


Рис. 2.10. Зависимость силы F при формовке ЭДТ от зазора $H=2R_{\text{вн}}$ и толщины материала: 1 – $S = 0,5$ мм; 2 – $S = 0,75$ мм; 3 – $S = 1$ мм

При приближении зазора к нулю (образование ЭДТ) резко увеличиваются значения прикладываемых сил, которые могут привести к НП [134]. Наличие некоторого зазора (0,2-0,3) мм между смыкаемыми элементами позволяет значительно (до 2-3 раз) снизить величину прилагаемых сил.

Далее образцы заливали в эпоксидную смолу, шлифовали, полировали (рис. 2.11) и подвергали исследованию на предмет состояния поверхностного слоя на микроскопе МИМ-8М (см. рис. 2.13) с увеличением в пределах от 40 до 1000, поверхность исследовали с помощью трубки МПБ-2 с 24-кратным увеличением.

Основные результаты исследования формования ЭДТ:

1. Нарушение цинкового покрытия (№12-№14) по наружной зоне сгиба не отмечено.



Рис. 2.11. Исследуемые образцы после прокатки в обжимных роликах

2. Остаточные декоративные свойства полимерного покрытия (№1-№11, 18) в зависимости от его вида составляют 2-4 балла. При этом из дефекта НП характерно образование продольных трещин на ПЭ или сетки трещин на ПУ, Пл покрытия (рис. 2.12).

3. Для пленочного покрытия (№16-17) характерно изменение цвета пленки по наружной уголковой зоне. Адгезию клеевого подслоя не измеряли.

4. Для плакирующего покрытия (Ал-Ал) №15 характерно образование трещин на подложке Д16 при радиусахгиба менее (5-8)s из-за ее малой пластичности.

5. Форма уголковой зоны ЭДТ отличается от скругленной формы; по углам, соответствующим 45^0 от биссектрисы, отмечено утолщение материала подложки (рис. 2.13.а), что говорит о немонотонности процесса формования ЭДТ.

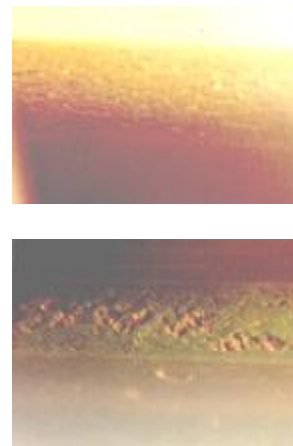
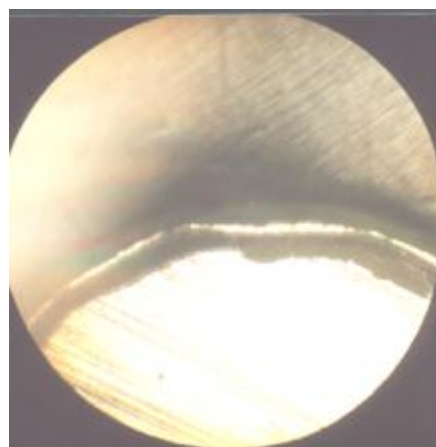


Рис. 2.12. Трещины на покрытии из ПЭ (№3) и Пл (№10) при формовании ЭДТ



а



б

Рис. 2.13. Элементы ДТ при увеличении а - $20^{\times}$; б - $60^{\times}$, материал №11 – Пл (чер)

Значения допустимых деформаций, приведенные ранее, можно использовать и для других процессов формообразования, где имеет место изгиб заготовки, например, в листовой штамповке.

2.3.4. Контрольный элемент для замера деформации при изгибе из материала с алюминиевым покрытием

Для определения величины деформации поверхности профиля в зоне сгиба в ОАО “УлНИАТ” [135] предложена оценка величины деформации по толщине покрытия, связанная с восприятием покрытием деформации материала в исследуемом сечении.

Значение деформации определяется по формуле:

$$e_i = -\ln \frac{a_i}{a_0}, \quad (2.2)$$

где e_i – деформация в i -ой точке сечения детали;

a_i – толщина покрытия в i -ой точке сечения детали;

a_0 – средняя толщина покрытия в исходном листе.

При исследовании использовали материал №15 (плакированный сплав Д16АТ) толщиной 1,0 мм. Из исходного листа и готового профиля берут образцы, из которых изготавливают шлифы. Для выявления плакированного слоя образцы протравливают реактивом Келлера. После травления на шлифе четко видны слои плакировки и основного металла (рис. 2.14).

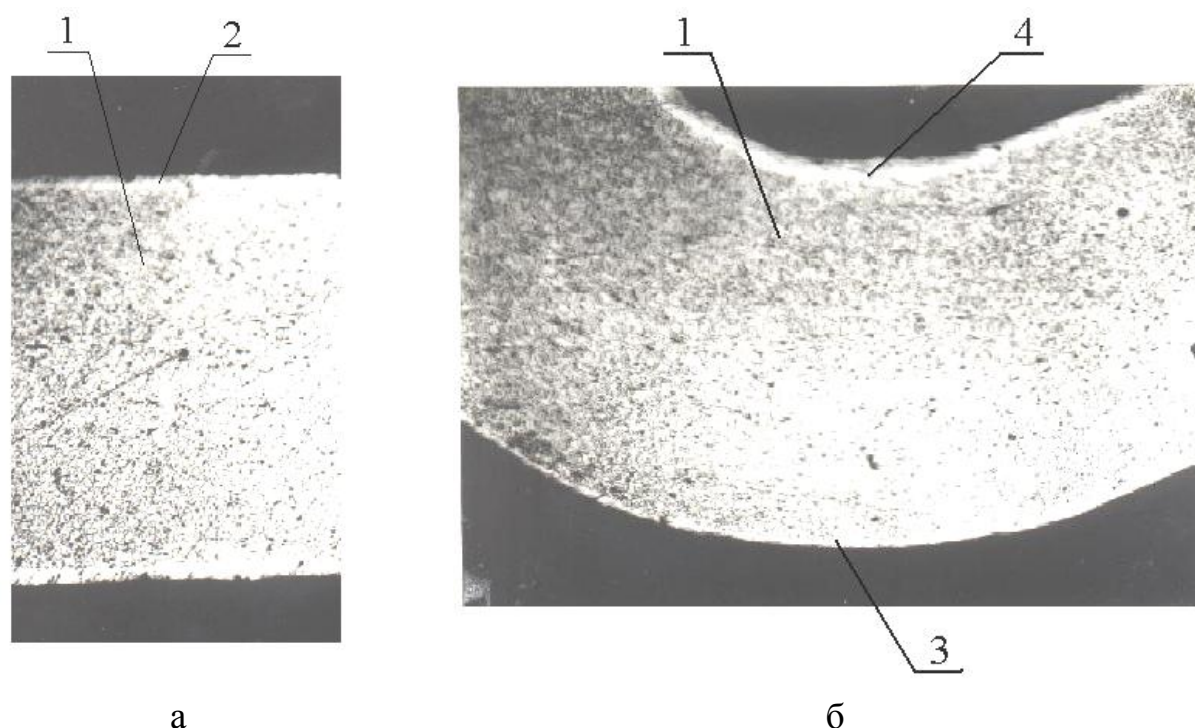


Рис. 2.14. Слоистая модель плакированного материала Д16АТ (№15) исходного (а) и подверженного деформированию (б): 1 – основной материал, 2 – исходное покрытие, 3 – утонение плакирующего слоя в зоне сгиба, 4 – утолщение плакирующего слоя в зоне сгиба

Для определения деформированного состояния поверхностных слоев металла измеряют толщины плакированного слоя исходного листа и в исследуемых зонах детали с помощью микроскопа МИМ-8М. Значение деформации рассчитывают по формуле (2.2). Для получения картины распределения деформации по поверхности детали на шлифе проводят реперные линии, вдоль которых измеряют толщины плакирующего слоя. Для повышения точности исследования проводят многократное измерение на нескольких образцах. В ряде случаев для проверки адекватности исследования рассчитывают среднеквадратичное отклонение и доверительный интервал. Рассчитанные значения деформации представлены в табл. 2.7. Их наносят на соответствующие контуры детали (рис. 2.15).

Результаты исследования

№ точки	a_0 , усл. ед.	a_{ir} , усл. ед.	e_{ir} , %	a_{iR} , усл. ед.	e_{iR} , %	Примечание
1	20	21	-5	19	+5	“+” – растяжение; “-” – сжатие; e_{iR} – зона наружного радиуса сгиба; e_{ir} – зона внутреннего радиуса сгиба.
2	20	26	-25	19	+5	
3	20	27	-30	18	+10	
4	20	24	-20	19	+5	
5	20	21	-5	20	0	

Данный способ определения деформаций можно применить и на других материалах с металлическими покрытиями. Основным вопросом является начальная подготовка образцов для более точного определения толщины покрытия.

Предложено использовать плакированный материал (полученный в промышленных условиях) в качестве контрольного элемента для замера деформации поверхности металла на изгиб вместо изготовления слоистой модели.

Возможно использование материала с покрытием в качестве контрольного элемента, как при изгибе материала, так и при контакте с инструментом.

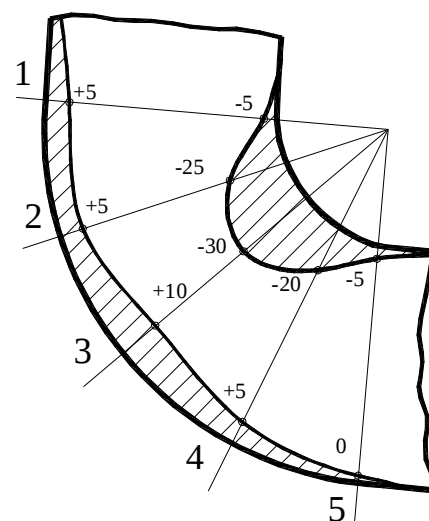


Рис. 2.15. Схема детали и значения деформации в характерных точках

2.4. Моделирование контактных воздействий на заготовке с покрытием

Под контактными воздействиями подразумеваем воздействие на покрытие царапающих ($R_{инст} < 1$) и сдирающих (сдвиговых) воздействий ($R_{инст} > 1$), где $R_{инст}$ – радиус скругления инструмента в зоне контакта.

Хотя испытания на устойчивость к царапанию используют для определения твердости покрытия, эти данные можно также использовать для оценки пригодности покрытия к приложению контактных сил от формирующего инструмента.

Устройство для испытания покрытия на устойчивость к царапанию приведена на рис. 2.16.

Установка состоит из корпуса 1, в котором закреплена ось 2, на которой установлен с возможностью вращения ролик 10. На заготовку с покрытием 4 воздействует игла 3 закрепленная на штоке 5, в который упирается пружина 6.

Имеется прижимная гайка 7 и ручной прижим 8. Для измерения перемещения служит измерительная линейка 9.

Устройство работает следующим образом: заготовка с покрытием 4 пропускается через специальные пазы в корпусе 1. При помощи прижимной гайки 8 пружина 6 сжимается и давит на поршень 5, в результате чего игла 3 воздействует на покрытие заготовки 4. Значение сжатия пружины снимаются по измерительной линейке 9 и далее, по тарировочному графику, определяется приложенная сила. Определяют значение силы, при которой происходит нарушение покрытия, например, при проникновении иглы до подложки.

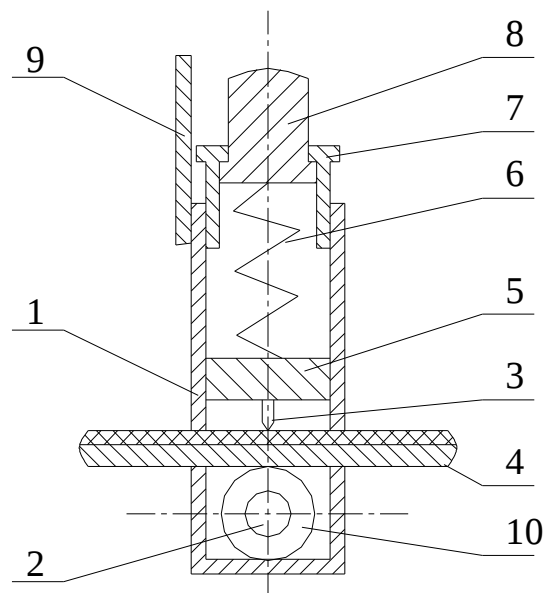


Рис. 2.16. Устройство для испытания покрытия на царапание

На устройстве можно задавать как фиксируемые значения сжатия пружины, так и изменять их в процессе испытания. Фиксируемое значение сжатия пружины задается при помощи прижимной гайки 7.

Для изменения сжатия пружины в процессе испытания необходимо приложить нагрузку к ручному прижиму 8.

Данный способ позволяет при небольшой силе и компактном устройстве определить приблизительно характеристики стойкости покрытия к контактным воздействиям инструмента.

Главным недостатком данного способа испытания является отличие воздействий, действующих при царапании, от воздействий, действующих при реальном процессе профилирования.

Для моделирования процесса воздействий в условиях сходных с условиями реального процесса предложено использовать вместо царапающей иглы шарик-инденторы, радиусы которых приближены к радиусам на контактных поверхностях формующего ролика. Процесс может быть представлен как прижатие и сдвиг шарового индентора по заготовке (рис. 2.17), причем отсутствует возможность проворота его вокруг своей оси.

Шаровой индентор 1 диаметром $2R_{ш}$ прижимается с силой $F_{сж}$ к покрытию 2, расположенному на подложке 3. Индентор сдвигается силой $F_{вол}$ по покрытию в направлении Z. В процессе движения (скольжения) индентор внедряется в покрытие на величину $S_{сд}$, в результате чего образуется зона контакта между индентором и покрытием, представляющая собой эллипс с осями l_x и l_z , а распределение давлений в покрытии P_x и P_z условно можно представить в параболическом виде.

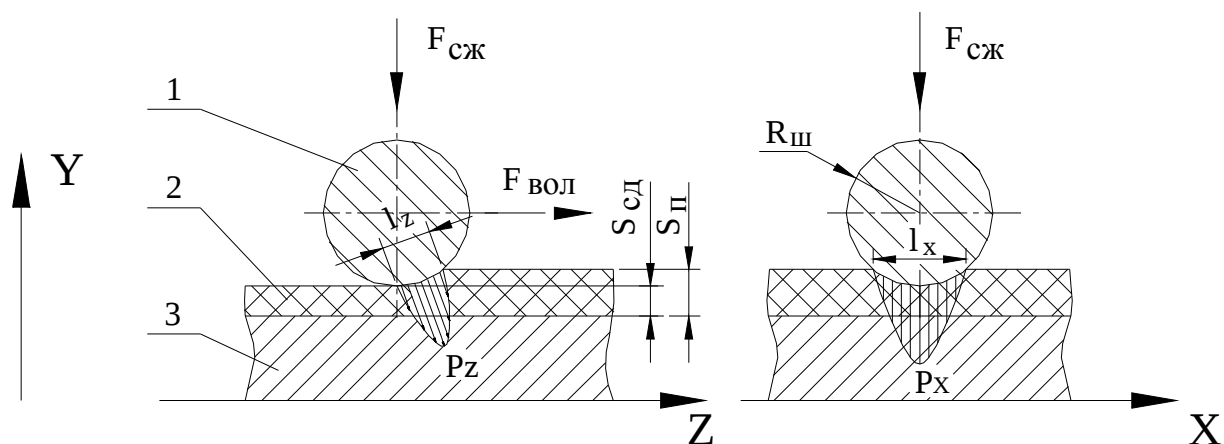


Рис. 2.17. Схема взаимодействия инструмента и заготовки с покрытием при моделировании процесса сдир покрытия: 1-шаровой индентор; 2-покрытие; 3-подложка

В зависимости от величины прижима шарового индентора к заготовке изменяется толщина покрытия $S_{сд}$ в зоне контакта (рис. 2.18).

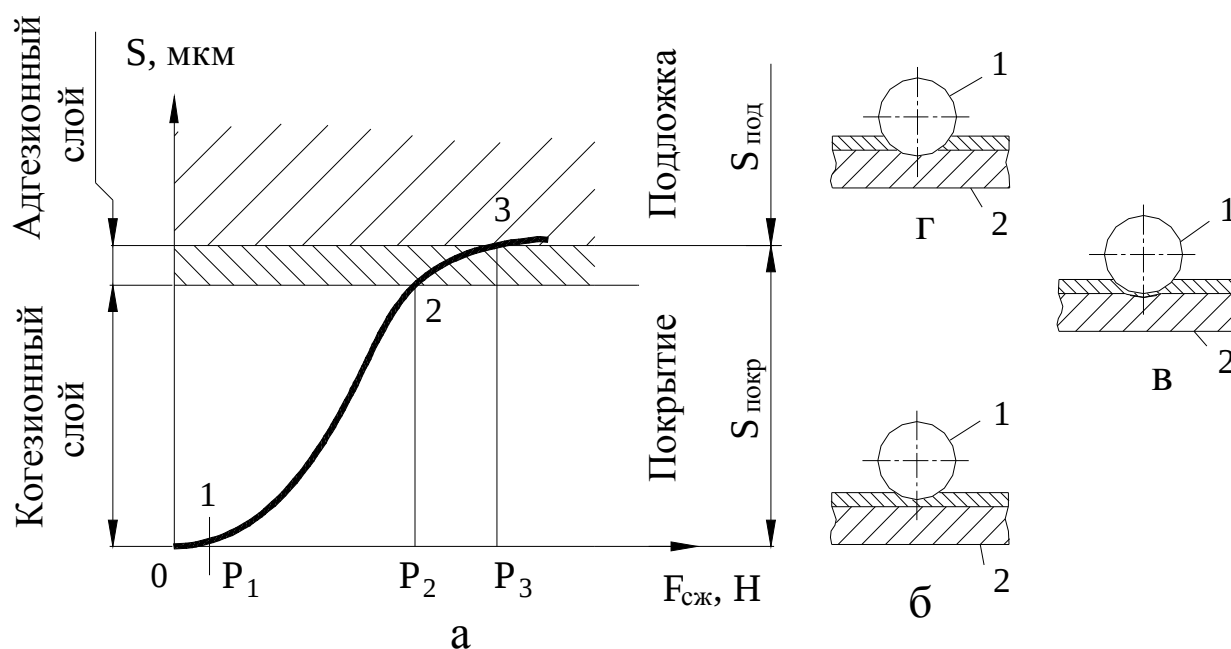


Рис. 2.18. Изменение толщины покрытия на подложке в зависимости от величины приложенной силы (а) и схемы взаимодействия между индентором 1 и заготовкой с покрытием 2 по когезионному типу (б), адгезионному типу (в) и адгезионному типу с выдавливанием канавки в подложке (г)

При начальном вдавливании и сдвиге индентора (участок 0-1) происходит упругое сжатие полимерного покрытия без образования канавки. Далее, при увеличении нагрузки (1-2) происходит эластическая (пластическая) деформация покрытия и сдир покрытия по когезионному типу (рис. 2.18.б). Приближаясь к подложке, форма кривой изменяется (участок 2-3), начинают действовать адгезионные силы взаимодействия, при этом происходит небольшой прогиб метал-

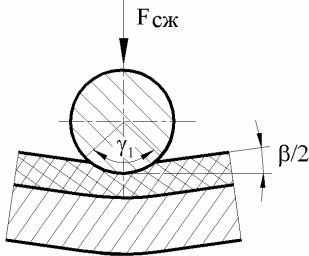
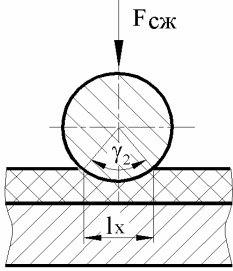
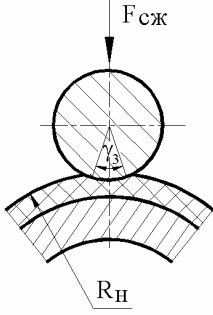
лической подложки и зона контакта увеличивается (рис. 2.18.в). При дальнейшем увеличении нагрузки (выше значения P_3) происходит полный сдир покрытия (рис. 2.18.г). Разница между силами P_3 и P_2 с учетом прогиба металлической подложки можно охарактеризовать как адгезионную прочность покрытия при сдвиге, а величину P_3 – как общую прочность покрытия.

Представленные воздействия имеют место в зонах контакта инструмента с заготовкой (рис. 2.1 А, С) при профилировании и являются наиболее опасными с точки зрения нарушения покрытия.

Схемы воздействия шарового индентора с различными формами подложки, применяемые при испытании, представлены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Моделирование контакта шарового-индентора
с заготовкой различной формы

№	Вид заготовки по отношению к индентору	Плоскость Y-X Варианты взаимодействия	Определение угла контакта с плоскостью Y-X
1	Вогнутая		$g_1 = \sqrt{\frac{8S_{сд}}{R_{ш}}} + b$
2	Плоская		$g_2 = \sqrt{\frac{8S_{сд}}{R_{ш}}}$
3	Выпуклая		$g_3 = \frac{2\sqrt{R_H^2 - \left(\frac{R_H^2 + (R_{ш} + R_H - S_{сд})^2 - R_{ш}^2}{2(R_{ш} + R_H - S_{сд})} \right)^2}}{R_{ш}}$

Коэффициент сдир покрытия будет определяться по формуле (2.3), что соответствует способу оценки качества покрытия 3_2 (см. табл. 2.3):

$$K_{сд} = \frac{S_{сд}}{S_{п}} \cdot 100\% . \quad (2.3)$$

В общем виде значение контактной силы представляется функцией следующих параметров:

$$P_{конт} = f\left(\frac{F_{сж}}{S_{сд} R_{ш}}\right) K_1 K_2 , \quad (2.4)$$

где величина K – коэффициент, зависящий от формы заготовки (K_1) и толщины заготовки (K_2).

Контактная сила $P_{конт}$ является допустимой для данного покрытия. Перенося значение допустимой контактной силы на процесс профилирования при тех же условиях, можно определить предельные геометрические и технологические параметры процесса профилирования.

В случае, когда величина сдира $S_{сд}$ в моделируемом и реальном процессе при прочих равных условиях (величинах НП и толщине материала) одна и та же, можно определить только значение параметра F/R (удельной силы). Тогда общий вид уравнения может быть представлен в следующем виде:

$$P_{конт}(S_{сд}) = F / R \text{ при } S_{сд} = \text{const.}$$

Для моделирования взаимодействия шарового индентора с заготовкой спроектировано и изготовлено устройство для испытания покрытия на отслоение (рис. 2.19, 2.20) [136], которое состоит из сварного каркаса 1, к которому крепится неподвижная пластина 2 с приваренными направляющими уголками 3 и направляющие планки 4. По направляющим уголкам 3 может перемещаться в вертикальном направлении пластина 5, на которой закреплена оправка 6 с шаровым индентором 7. Прижим индентора к испытываемой заготовке с покрытием 8 обеспечивает пружина 9 по шпильке 10 гайкой 11. Величину сжатия пружины отмечают по индикаторной головке 12, которая связана с гайкой 11 посредством шайбы 13. Заготовка с покрытием крепится на подвижной пластине 14, которая имеет возможность перемещаться в горизонтальном направлении посредством рукоятки 15 по направляющим планкам 4.

Устройство работает следующим образом. Заготовку с испытываемым покрытием закрепляют на подвижной пластине 14. Вращая гайку 11, определяют положение, при котором шарик 7 коснется заготовки 8; отмечают нулевую точку отсчета по индикатору 12. Далее, вращая гайку 11, создают некоторую силу со стороны шарика на заготовку и отмечают значение перемещения гайки по индикатору 12. Разница между данным и нулевым значением будет величиной сжатия пружины, а учитывая жесткость пружины, определяют силу прижатия шарика к заготовке. Вращая рукоятку 15, перемещают шарик по покрытию на некоторое расстояние $(5-10)R$. Далее, увеличивая степень сжатия пружины, определяют силу сжатия и вновь перемещают шарик. Материал всех элементов устройства (кроме пружин и инденторов) – сталь 3 или сталь 10; материал шариков инденторов – ШХ15 (рис. 2.21). После окончания эксперимента измеряют глубину нарушения покрытия ($S_{сд}$) и строят график зависимости относительной величины сдира покрытия ($K_{сд} = S_{сд}/S_{п}$) от силы прижима $F_{сж}$ (рис. 2.22).

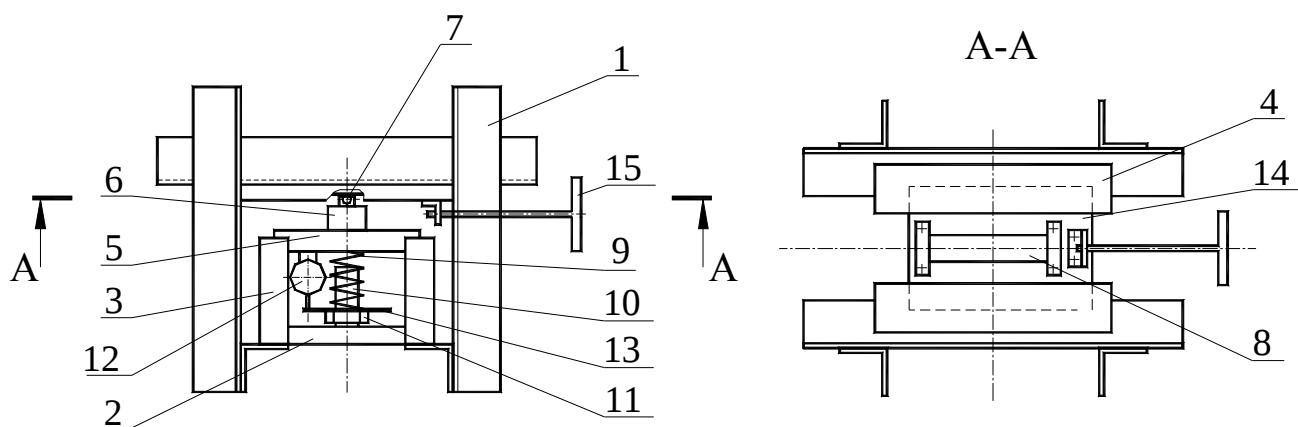


Рис. 2.19. Общий вид устройства для испытания покрытия на отслоение (Патент №37221)

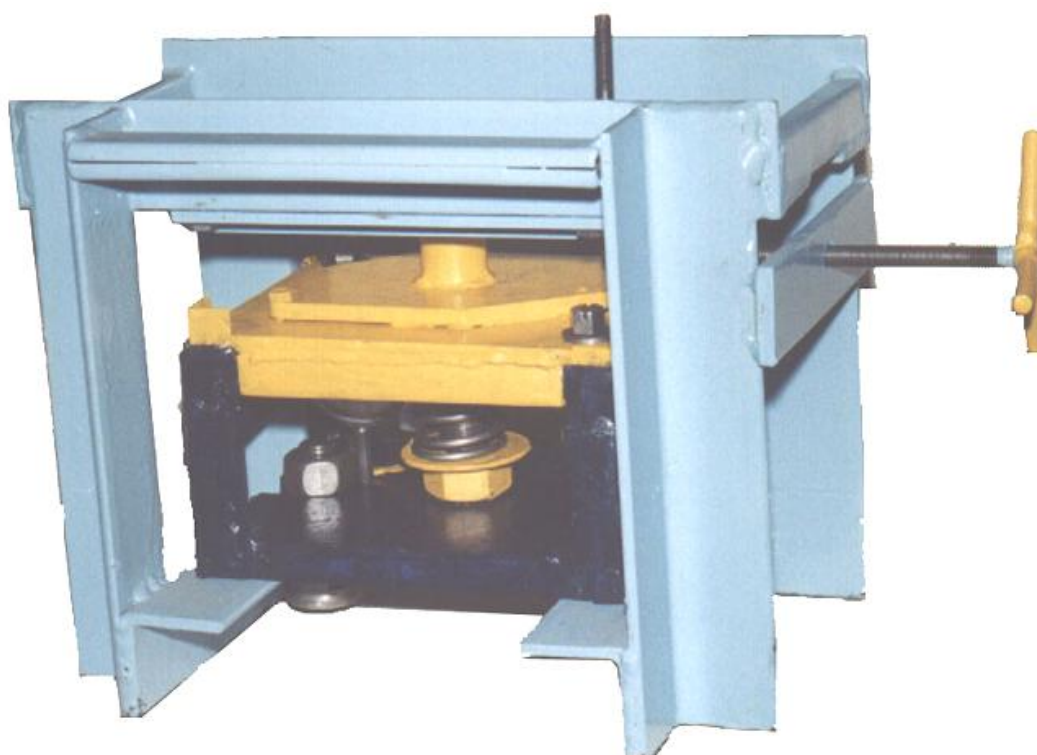


Рис. 2.20. Фотография устройства для испытания покрытия на отслоение



Рис. 2.21. Оправки с шариками-инденторами

На основе полученных результатов определяют допустимые значения параметра F/R [137] на различных видах покрытия при величине сдира 20, 50 и 100% (табл. 2.9).

Таблица 2.9

Допустимые значения параметра $P_{\text{конт}}(S_{\text{сд}}) = F/R$ при контакте заготовки с шаровым индентором

Тип- взаимодейст- вия	Коэффициент сдира, %	$P_{\text{конт}}(S_{\text{сд}}) = F/R$, Н/мм			
		Zn	ПЭ	ПУ	Пл
Шаровой ин- дентор – пло- ская заготовка	20	28	55-90*	38-50*	38-50*
	50	56	85-125	67-70	70-76
	100	-	137-175*	140-145	113-115

* - отмечено уменьшение значения при увеличении радиуса шарового индентора

Для определения коэффициента K_1 и K_2 были проведены дополнительные испытания: моделировали схемы взаимодействия №1, №3 (см. табл. 2.8) соответственно при $b = 5; 10^0$ и $R_H = 5; 1,5$ мм. Значение коэффициента K_1 и K_2 приведены на рис. 2.23. Для повышения точности исследования производили многократное измерение исследуемых параметров на нескольких образцах одного и того же материала с последующим усреднением результатов.

Данные значения позволяют сравнить стойкость различных покрытий при воздействии контактных нагрузок, а также использовать их в качестве допустимых значений при теоретических расчетах.

2.5. Обжим заготовки с покрытием в роликах

Часто в процессе профилирования происходит обжим заготовки, например, при создании аксиального натяжения с целью выравнивания деформаций по сечению. Поэтому необходимо определить допустимую степень обжима образцов, изготавливаемых из материала с покрытием [138, 139]. Для этого образец с исследуемым покрытием прокатывают между цилиндрическими роликами (рис. 2.24).

В качестве параметра оценки принята максимальная степень обжима образца с покрытием в зависимости от остаточных свойств покрытия и требований, принятых ранее (см. табл. 2.5).

Испытание на обжим включает следующие этапы:

1. Локальный обжим заготовок с покрытием в цилиндрических роликах со степенью обжима 2, 10, 20 и 50 %.
2. Изготовление темплетов размером 15x20 мм, у которых с целью повышения точности производится многократное измерение толщины с точностью 0,01 мм с последующим осреднением.

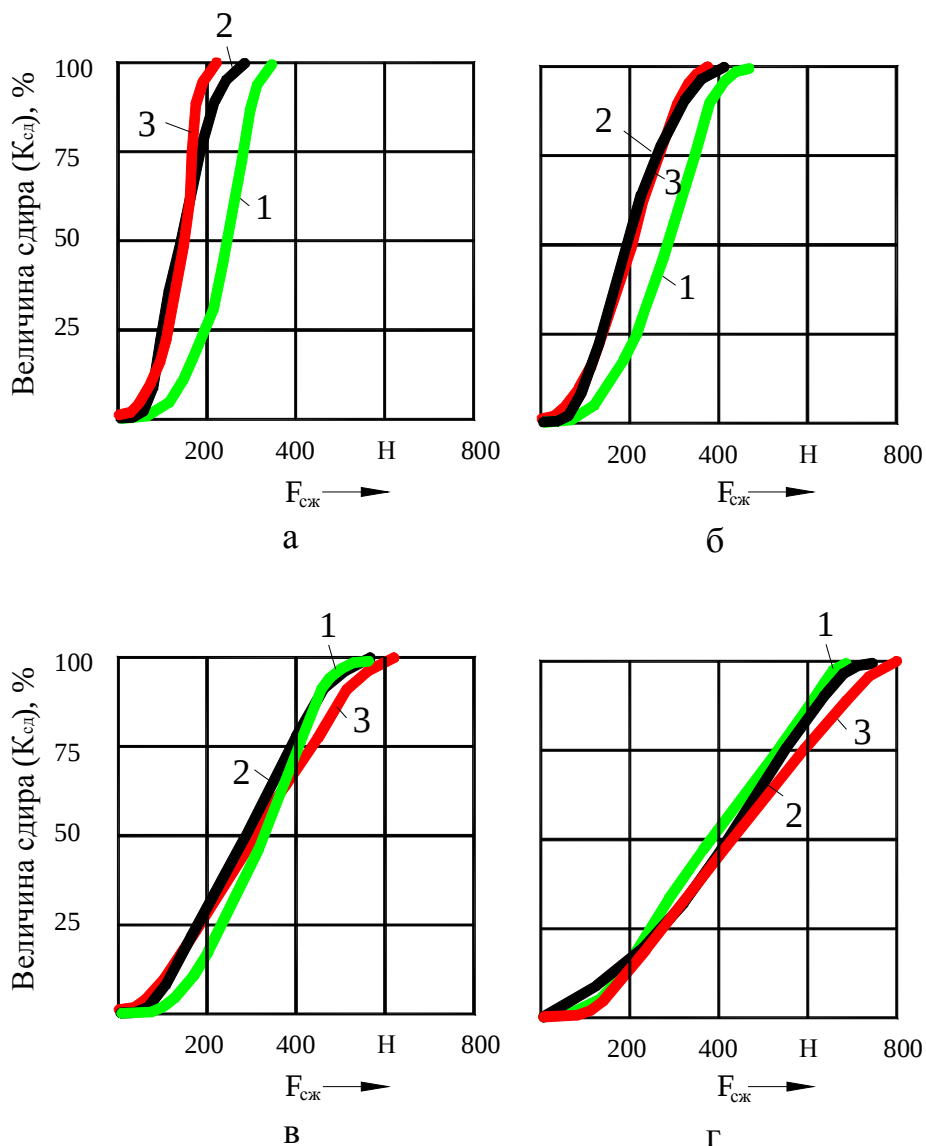


Рис. 2.22. Зависимость величины сдира покрытия $K_{сд}$ от силы прижима шарика-индентора $F_{сж}$ при величине радиуса шарика: а – $R = 2$ мм; б – $R = 3$ мм; в – $R = 4$ мм; г – $R = 5$ мм для следующих покрытий: 1-ПЭ (№3), 2-ПУ (№9), 3-Пл (№11)

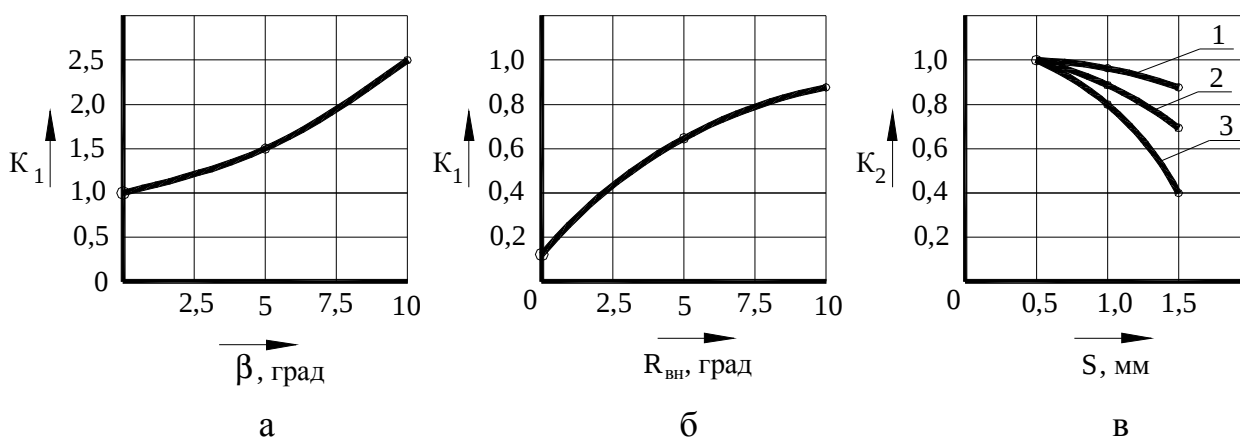


Рис. 2.23. Величина коэффициента K_1 : а - для схемы взаимодействия №1 (табл. 2.8), б – для схемы взаимодействия №3; в – значение коэффициента K_2 от толщины исходной заготовки и величины сдира покрытия: 1 – 20%, 2 – 50%, 3 – 100%

3. Исследование темплетов на предмет сохранности остаточных декоративных и защитных свойств покрытия.

4. Подготовка и исследование шлифов. Темплеты по группам материалов заливают в эпоксидную смолу, шлифуют (рис. 2.25) и подвергают исследованию на предмет состояния поверхностного слоя на микроскопе МИМ-8М с увеличением в пределах от 340 до 1000. Поверхность исследуется с помощью трубки МПБ-2 с 24 кратным увеличением.

При исследовании декоративных и защитных свойств используется балльная система оценки (приведена ранее).

На рис. 2.26 приведены значения допустимых деформаций при обжиге для полимерных покрытий. В зависимости от назначения профиля и требований к нему (т.е. величины балла) выбирают максимальную степень обжига материала.

Полученные данные указывают на слабую зависимость прочности покрытия от толщины подложки. На рис. 2.27 показан микрошлиф образца №1 при степени обжига 37%, откуда видно, что отслоение покрытия отсутствует

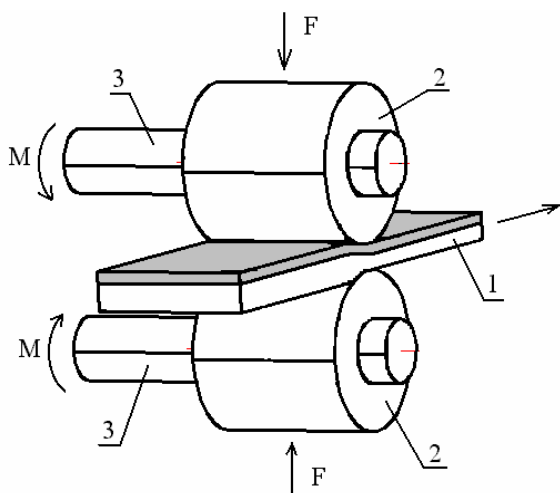


Рис. 2.24. Схема испытания материала с покрытием на обжим в цилиндрических роликах: 1 – заготовка с покрытием; 2 – цилиндрические ролики; 3 – приводные валы, F – сила сжатия валков, M – крутящий момент



Рис. 2.25. Образцы после испытания на обжим

Однако испытание на защитные свойства показало значительное снижение начальных характеристик покрытия, в результате чего, такие степени обжига не могут быть рекомендованы при производстве профилей, предназначенных для эксплуатации в условиях, где защитные свойства покрытия являются определяющими.

Толщина покрытия при обжиге имеет существенное значение. Контактные давления могут превосходить предел текучести без существенного нарушения покрытия (см. далее п.3.4), если оно относительно тонкое (ПЭ покры-

тие). В случае толщины покрытия более 50 мкм возможно его повреждение в виде наплывов и разрушений (рис. 2.28).

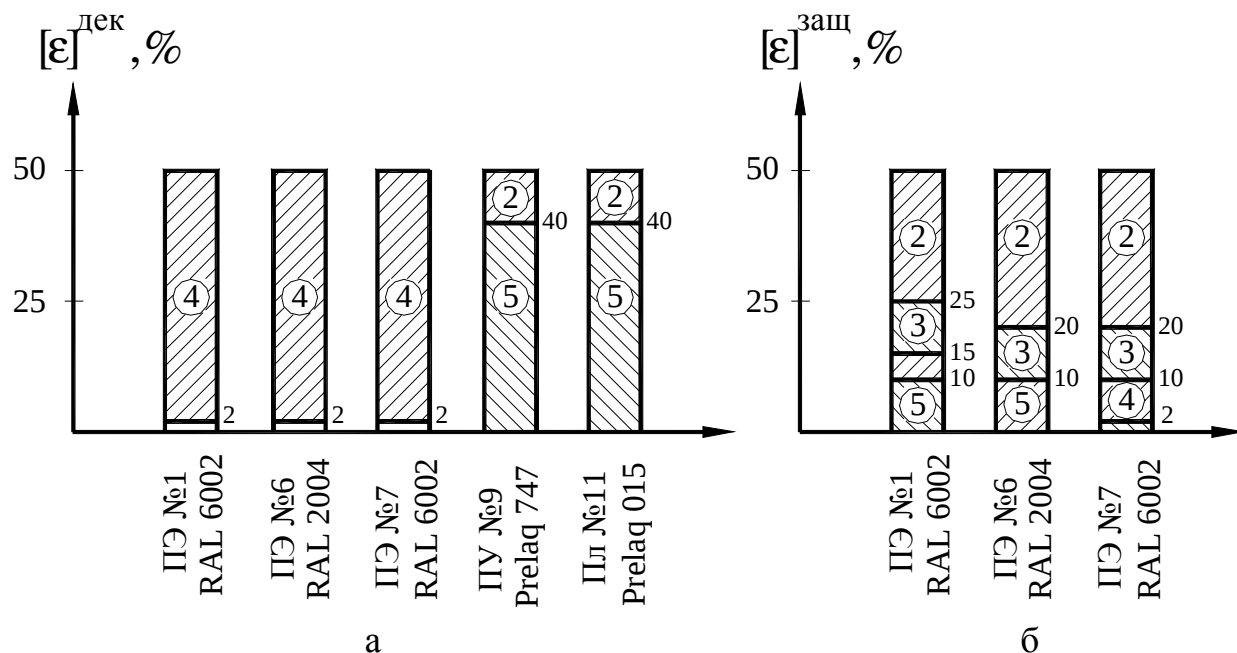


Рис. 2.26. Значение допустимой деформации при обжиге с учетом условия сохранения декоративных (а) и защитных (б) свойств покрытия



Рис. 2.27. Зона сцепления субстрата и покрытия после обжига в роликах (увеличение $400\times$), материал №1 –ПЭ (зел)-обжигание 37%



Рис. 2.28. Наплывы покрытия из полиуретана (№9) и пластизоля (№11) с исходной толщиной соответственно 70 и 100 мкм при обжиге в роликах 50%

Выводы

1. С целью систематизации видов воздействия на поверхность заготовки составлен классификатор контактных и изгибающих воздействий на заготовку, имеющих место при профилировании МИД. Установлено, что зонами максимальных давлений на роликовом инструменте являются участки скругления вертикальных буртов посадочных мест и криволинейные участки, формирующие уголкового зоны профиля.

2. Предложенные критерии оценки качества покрытия после деформирования позволяют оценить декоративные и защитные свойства покрытия в зависимости от назначения профиля.

3. Разработанное и запатентованное устройство для моделирования контактных воздействий на заготовку, позволяет определить допустимые значения контактных нагрузок для материалов с полимерными покрытиями с учетом принятых ранее критериев.

4. Определены значения допустимой деформации изгиба для 4-х видов материала с покрытием и допустимые значения контактных сил для полимерных покрытий. Определено, что наиболее стойкими являются:

- при воздействии деформации изгиба: из металлических покрытий – цинковые; из полимерных покрытий – полиуретановые и пластизолевые;
- при воздействии контактных сил – полиэфирные покрытия.

Определены значения минимальных внутренних радиусовгиба профиля для наиболее распространенных видов материала с покрытием. Показано, что минимальная величина внутреннего радиусагиба профиля (для сохранения покрытия наружного слоя) находится в пределах:

- для полиэфирных покрытий – $(1 - 2)S$;
- для полиуретановых покрытий – $(0 - 2)S$;
- для пластизолиевых покрытий – $(0 - 1,5)S$;
- для цинковых покрытий – 0.

5. Установлено, что при деформировании покрытие быстрее снижает свои защитные свойства, чем декоративные. При обжиге тонкие покрытия более устойчивы к большим степеням деформациям, чем толстые.

ГЛАВА 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ МЕТОДОМ ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ

Дефект нарушения покрытия заготовки в виде отслаивания и растрескивания характерен для (60-70)% профилей на начальной стадии отработки профилей и является наиболее существенным дефектом для профилей сложного сечения (профилей с ЭЖ) с толщиной подложки 0,5-1,0 мм, имеющих декоративное покрытие, и профилей простого сечения (профилей швеллерного и С-образного типа) с толщиной подложки 1,5-2 мм, имеющих защитное покрытие.

Построение математических моделей, отражающих зависимость появления этого дефекта от геометрических и технологических параметров процесса, могло бы способствовать устранению данного дефекта и оптимизации количества переходов на профилегибочных станках ГПС, производимых ОАО “Ульяновский НИАТ”.

3.1. Классификатор причин нарушения покрытий и способы их предотвращения

С целью более систематичного подхода к выбору объектов моделирования составлен классификатор причин нарушения покрытий (рис. 3.1) и на его основе – классификатор способов предотвращения нарушения покрытия (рис. 3.2). Приведенные в классификаторе способы направлены на снижение уровня контактных напряжений между инструментом и заготовкой, оптимизацию их распределения по переходам, уменьшение деформаций растяжения по наружным контурам зоны сгиба и др.

Увеличение межосевого расстояния (схема 1.2, рис. 3.2) позволяет уменьшить скольжение заготовки относительно инструмента, однако приводит к увеличению размеров роликов и, соответственно, их стоимости. Уменьшение скорости профилирования (схема 1.3, рис. 3.2) позволяет снизить ударные воздействия со стороны инструмента на покрытие и существенно интенсифицировать процесс. Невысокие скорости профилирования обеспечивают достаточный временной интервал, в течение которого успевают проходить релаксационные процессы в покрытии, что способствует его сохранности. Однако, требование низкой скорости является конкурирующим фактором по отношению к производительности процесса. Это противоречие можно снять путем оптимизации скоростных характеристик процесса при обеспечении качества производимого профиля.

Контактные давления со стороны инструмента на заготовку можно снизить за счет уменьшения кривизны криволинейных участков контактных поверхностей, однако наличие значительных радиусов может ухудшить жесткость и внешний вид профиля, а также привести к увеличению габаритных размеров

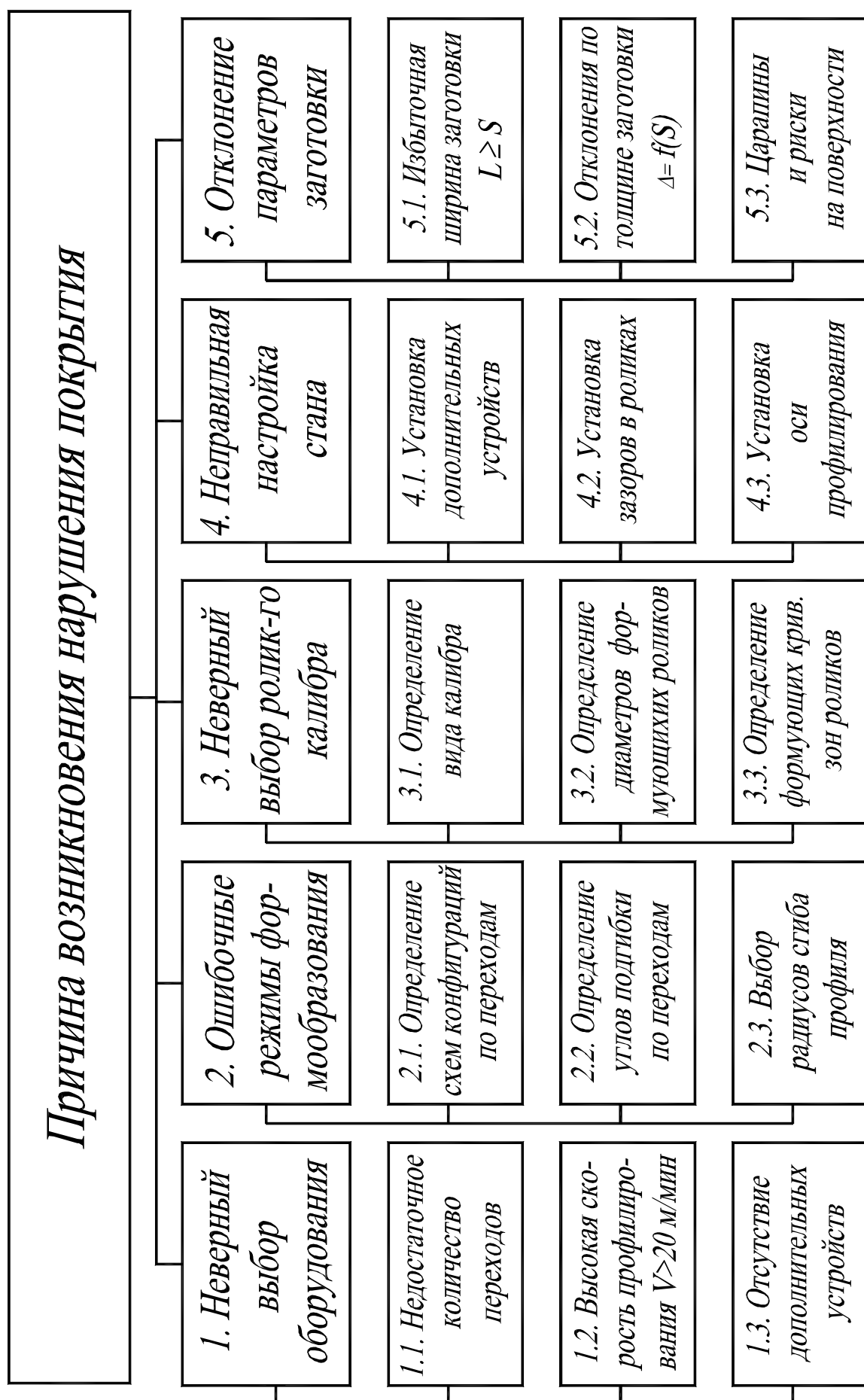


Рис. 3.1. Классификатор причин нарушения покрытия

инструмента. Выходом из этой ситуации является оптимизация радиусных и криволинейных зон рабочего калибра ролика (схема 3.2, рис. 3.2) и радиусовгиба угловых зон профиля, унаследованных от предшествующего перехода (схема 2.3, рис. 3.2).

Применение дополнительных устройств (схемы 5.1, 5.2, 5.3, рис. 3.2) позволяет предварительно отформовать заготовку перед ее входом в калибр основных формующих роликов и уменьшить углы захода в него элементов профиля.

Этот прием позволяет снизить контактные давления в самом рабочем переходе, но при этом дополнительное устройство само должно обеспечивать сохранность покрытия.

Выбор способа предотвращения НП зависит от типа конкретного профиля и стадии разработки технологической оснастки. Так, на стадии проработки на технологичность изготовления профиля с покрытием используется оптимизация конструкции профиля, исходя из требований к нему; на стадии проектирования – оптимизация оборудования (схема 1, рис. 3.2), схем формообразования (схема 2), формы и размеров формующих роликов (схема 3); на стадии отработки и изготовления профиля – настройка оборудования (схема 4), применение дополнительных устройств (схема 5) и смазочных систем (схема 6).

Применение того или иного способа предотвращения НП лучше рассматривать в комплексном подходе в совокупности с другими способами. Наилучшим является применение одновременно нескольких способов предотвращения возникновения НП. Например, оптимизация технологических схем по переходам с одновременной оптимизацией формы рабочего калибра с соответствующей настройкой оборудования и применением смазки позволяют улучшить качество профиля и уменьшить вероятность возникновения НП.

Предпочтительными являются способы, позволяющие в наибольшей мере снизить контактные давления, а именно, способы, приводящие к оптимизации радиусов уголкового профиля по переходам (схема 2.3, рис. 3.2), оптимизации радиусных и криволинейных зон роликов (схема 3.2), использованию приводных и нажимных устройств (схема 5.2) и смазочных систем (схема 6). Эти способы приняты в качестве основных для предотвращения НП.

3.2. Основные допущения при теоретическом рассмотрении процесса

Теоретические исследования охватывают вопросы расположения зон максимальных давлений в валках, кривизны инструмента и действующих сил в зонах контакта, контактных давлений при профилировании и предельных параметров процесса.

При рассмотрении этих вопросов приняты следующие основные допущения:

- при определении расположения зон максимальных давлений зону контакта представляем в виде пятна: изменение формы полки профиля в зоне плав-

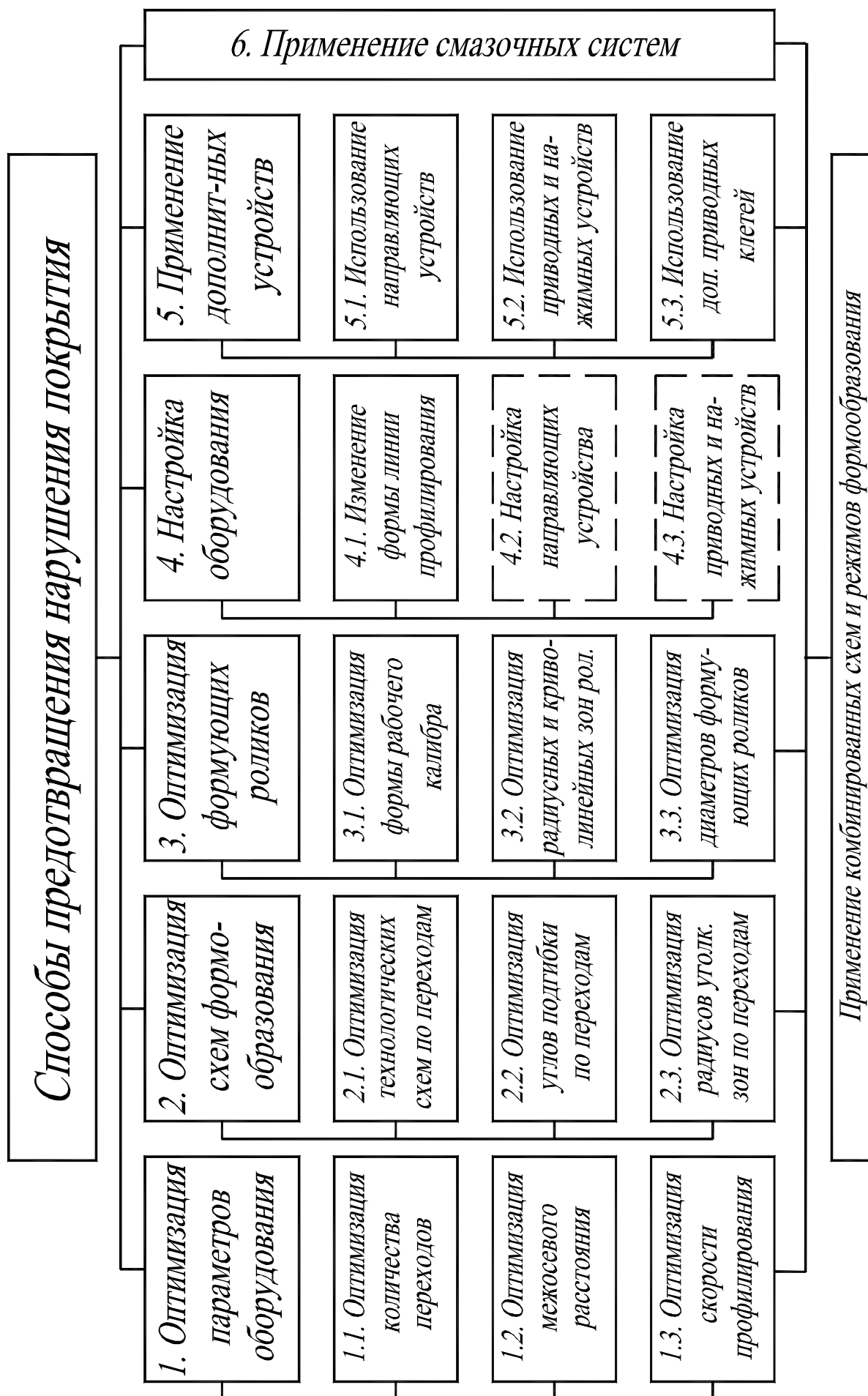


Рис. 3.2. Классификатор способов предотвращения нарушения покрытия

ного перехода - в виде винтовой линейчатой поверхности; радиус скругления бурта ролика при этом считается нулевым;

- при определении величины контактных давлений при профилировании считаем, что материал заготовки изотропный, неупрочняемый, жесткопластичный.

3.3. Моделирование контакта при профилировании

Моделирование контакта при профилировании включает в себя определение зон максимальных давлений, определение кривизны инструмента в зоне контакта, определение контактных сил, сравнение их с допустимыми для покрытия и установление предельных параметров процесса.

3.3.1. *Определение расположения зон максимальных давлений на профиле при контакте с буртом ролика*

Расположение зон максимальных давлений связано с контактными взаимодействиями инструмента и заготовки и зависит не только от механических свойств заготовки, но и от геометрических характеристик инструмента и заготовки, а также применяемых технологических режимов.

На начальной стадии построения модели процесса формообразования профиля из материала с покрытием необходимо разработать модель взаимодействия инструмента с заготовкой при подгибке элементов профиля. Рассмотрим процесс изготовления типичного профиля швеллерного типа.

При профилировании методом интенсивного деформирования между заготовкой и роликом имеют место виды контакта, представленные на рис. 2.1. Указанное расположение зон контакта на ролике характерно для большинства профилей, подгибаемые полки которых направлены вверх.

Одной из особенностей МИД является контакт заготовки с инструментом по радиусному участку (скруглению) бурта нижнего ролика (зона А). При этом от расположения зоны контакта будет зависеть кривизна в месте контакта и, соответственно, величина контактных давлений, возникающих при подгибке элементов профиля. Согласно предварительным исследованиям именно в зоне А действуют наибольшие контактные силы [132].

Рассмотрим случай, когда подгибка полки профиля осуществляется только посредством скругления бурта (зона А на рис. 2.1). При определении расположения зон максимальных давлений считаем, что их размеры намного меньше размеров формующих роликов, а жесткость прямолинейной части полки достаточно велика. Поэтому речь идет об определении положения точки контакта между полками будущего профиля и подгибающими участками формующего ролика.

Расположение точки контакта между скруглением бурта и заготовки зависит от:

- геометрических параметров профиля (ширины полки B , толщины заготовки S , формы профиля);

- геометрических параметров инструмента (диаметра ролика $D_{рол}$, высоты бурта h);
- технологических параметров процесса (угла подгибки a , разницы углов подгибки Δa , угла захода b).

Определим расположение искомой точки контакта (рис. 3.3).

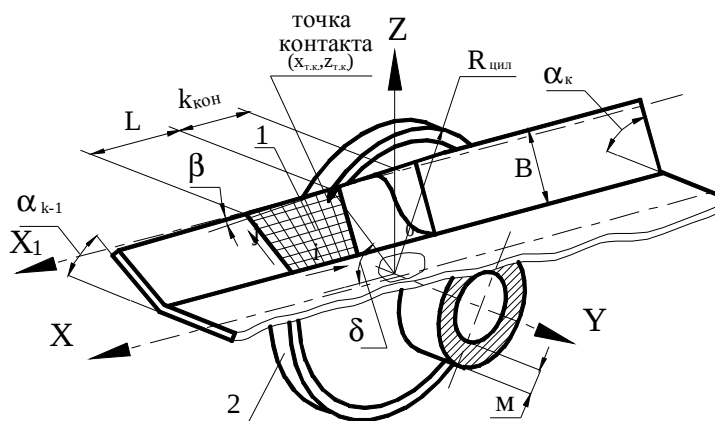


Рис. 3.3. Расчетные параметры для определения точки контакта инструмента с заготовкой

Для этого представим форму подгибаемой полки в межклетьевом пространстве в виде винтовой линейчатой поверхности 1. Произведем разбиение этой поверхности на ряд продольных полос (по ходу движения профиля), обозначив произвольную полосу безразмерным индексом j , и на ряд поперечных полос, среди которых некоторой произвольной полосе будет предписан индекс i , а число участков разбиения полки равно F , тогда значение I и J можно определить таким образом:

$$\begin{cases} \frac{L}{F} = I, & a \ i \in [0, I] \\ \frac{B}{F} = J, & a \ j \in [0, J] \end{cases} \quad (3.1)$$

С учетом углов подгибки координаты точек полки описываются соотношением (3.2):

$$\begin{cases} X_i'' = k_{кон} + L - L_i \\ Y_{i,j}'' = B_j \cdot \cos(a_k) - B_j \cdot \cos(a_i), \\ Z_{i,j}'' = m + B_j \cdot \sin(a_i) \end{cases} \quad (3.2)$$

где $X_j'', Y_{ij}'', Z_{ij}''$ - координаты точек контакта относительно выбранной системы координат; L_i - изменяется от $k_{кон} + L$ до $k_{кон}$ по оси X ; B_j - изменяется от 0 до B ; $k_{кон}$ - расстояние от плоскости ZOY до точки контакта по оси X_1 , мм.

Причем

$$a_i = a_{k-1} + (a_k - a_{k-1}) \cdot i, \quad (3.3)$$

$$L = \frac{B \cdot (\cos(a_{k-1}) - \cos(a_k))}{\operatorname{tg}(b)}, \quad (3.4)$$

где a_{k-1} - начальный угол подгибки, град; a_k - конечный угол подгибки, град; b - угол захода кромки полки, град. (пояснение далее, рис. 4.11)

Пусть формирующий инструмент 2 (рис. 3.3) представляет собой цилиндр, координаты грани которого для одной исследуемой четверти описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} X^U = R^{\text{цил}} \cdot \cos(d), \\ Z^U = R^{\text{цил}} \cdot \sin(d), \\ Y^U = 0, \end{cases} \quad (3.5)$$

$$d \in [0..p/2],$$

где $R^{\text{цил}}$ – радиус цилиндра, мм; d - угол, лежащий в плоскости X_1OZ , расположенный между осью X и линией, проведенной от точки контакта до оси цилиндра.

Совместное решение систем уравнений (3.2) и (3.5) при варьирования величины $k_{\text{кон}}$, доставляющей минимум площади зоны контакта, и будет давать искомую точку контакта (или начала контакта).

Для решения этих уравнений был разработан алгоритм (рис. 3.4) и составлена программа на языке программирования BASIC. Алгоритм состоит из 4-х основных частей. В первой части происходит присвоение переменным соответствующих значений, исходя из геометрических и технологических параметров процесса. Вторая часть - разбивка полки на ячейки и расчет координат этих ячеек по системе уравнений (3.2). В третьей части алгоритма производят сравнение координаты полки и некоторой точки на грани цилиндра; для этого начинаем просчитывать координаты грани цилиндра по формуле (3.5) в исследуемой четверти, изменяя угол d от 0 до $\frac{p}{2}$, например, с шагом $\frac{p}{180}$ (1°). При каждом значении угла d сравнивают расположение координаты грани цилиндра с уже рассчитанными координатами ячеек полки. Для этого осуществляют прогонку по всем узловым точкам ячеек полки. Если точка узловой ячейки плоскости совпадает с координатами точки на грани цилиндра, то говорим, что контакт есть, если нет общих точек соприкосновения, то говорим, что контакта нет. При наличии или отсутствии контакта изменяем расположение плоскости вдоль оси X , варьируя величину $k_{\text{кон}}$. Если контакт есть, то расстояние $k_{\text{кон}}$ увеличивают до тех пор, пока контакта не будет. Если контакта нет, то расстояние $k_{\text{кон}}$ уменьшают до тех пор, пока контакт не появится.

Основным результатом, полученным из данных расчетов, является нахождение расположения точки контакта на полке профиля ($x_{\text{т.к.}}$, $z_{\text{т.к.}}$) или ($x_{\text{т.к.}}$, K_c), где $K_c = \frac{j}{J}$.

Графики зависимостей расположения (смещения) точки контакта по высоте полки от угла подгибки представлены на рис. 3.5, а расположение (смеще-

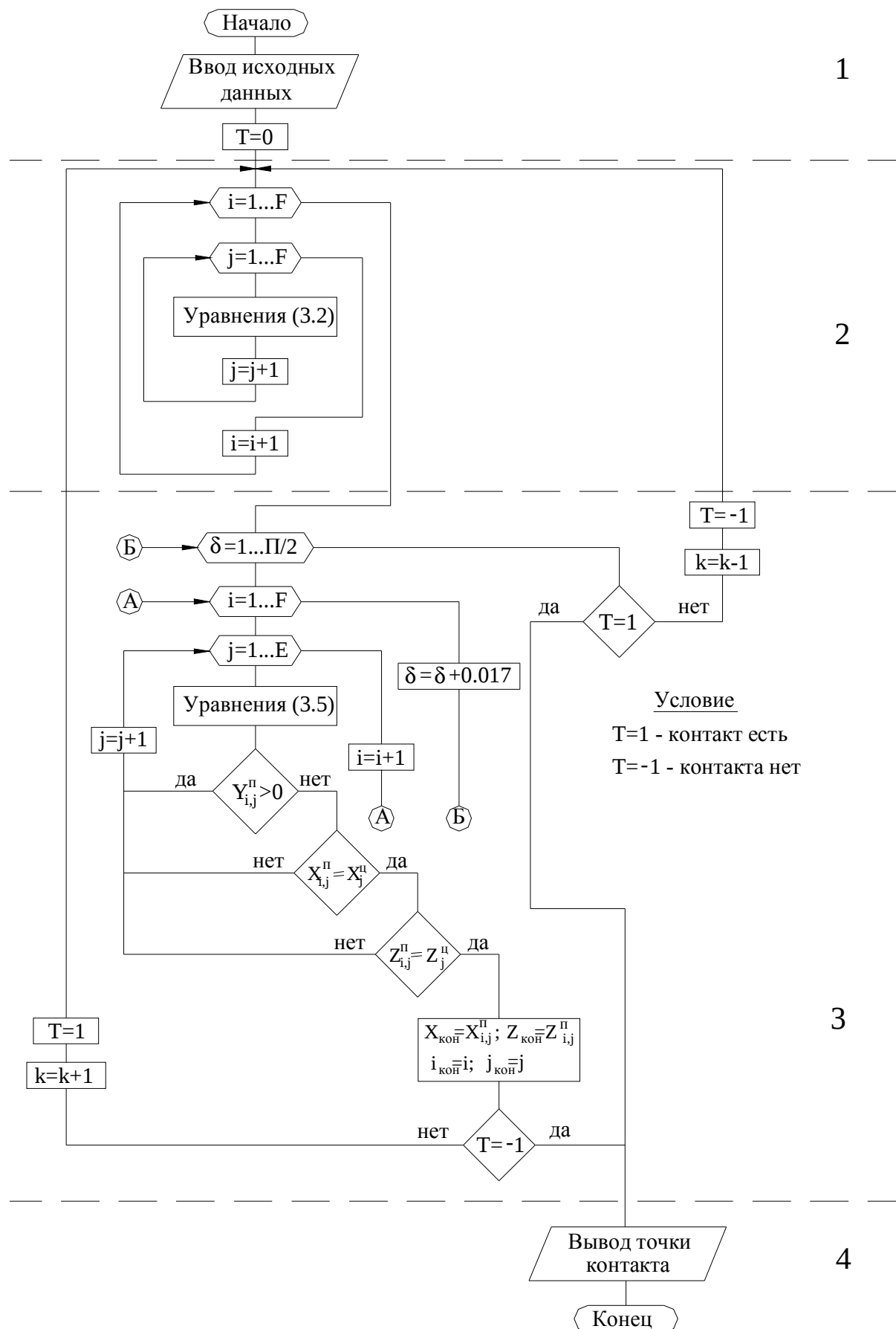


Рис. 3.4. Алгоритм решения задачи по нахождению точки контакта бурта инструмента с полкой профиля

ние) точки контакта по подгибаемой полке от угла подгибки – на рис. 3.6.

Как видно из рис. 3.6, при углах подгибки от 0° до 80° , точка контакта смещается незначительно, однако при приближении к 90° происходит ее резкое смещение в сторону угловой зоны по ширине профиля (по оси Z) и увеличение расстояния $k_{\text{кон}}$ от точки контакта до осевой плоскости вала (по оси X).

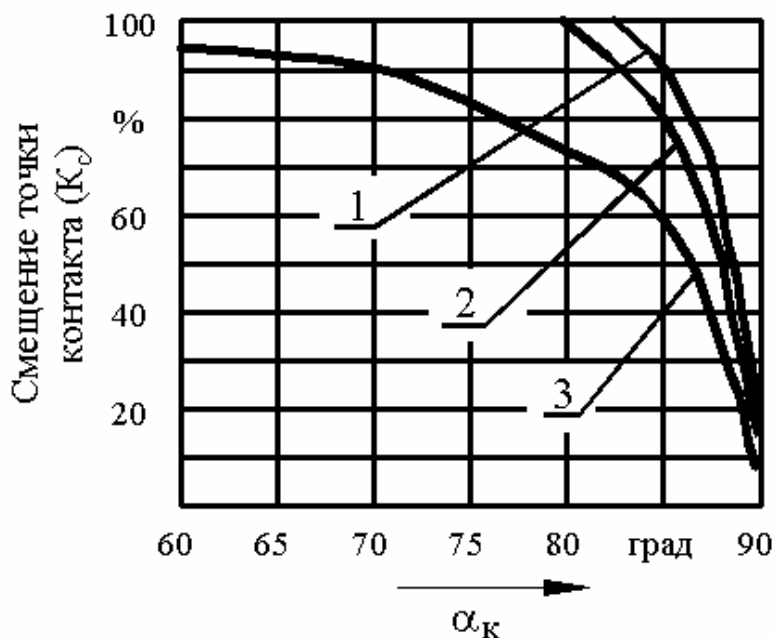


Рис. 3.5. Зависимость расположения точки контакта по ширине полки от угла подгибки a_k и угла захода b : 1, 2, 3 - $b = 3^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ соответственно

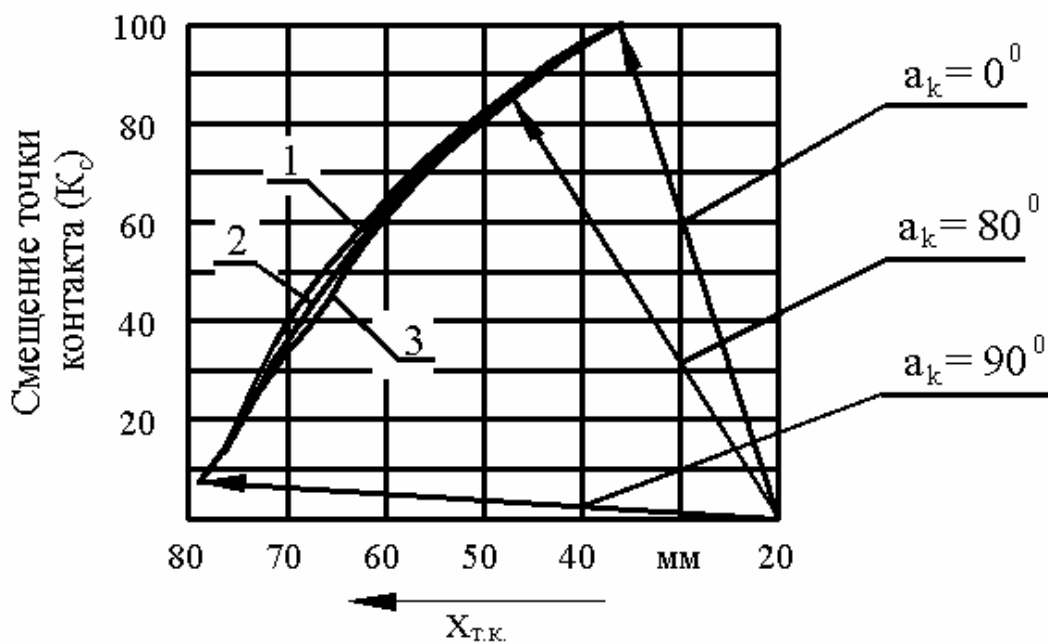


Рис. 3.6. Расположение точки контакта на подгибаемой полке в зависимости от угла подгибки a_k и угла захода b : 1, 2, 3 - $b = 3^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ соответственно

В системе Mathcad 2000 было смоделировано в графическом виде взаимное расположение криволинейной полки и инструмента (рис. 3.7) с использованием зависимостей (3.2) и (3.5), что является визуальным представлением (подтверждением) полученных результатов.

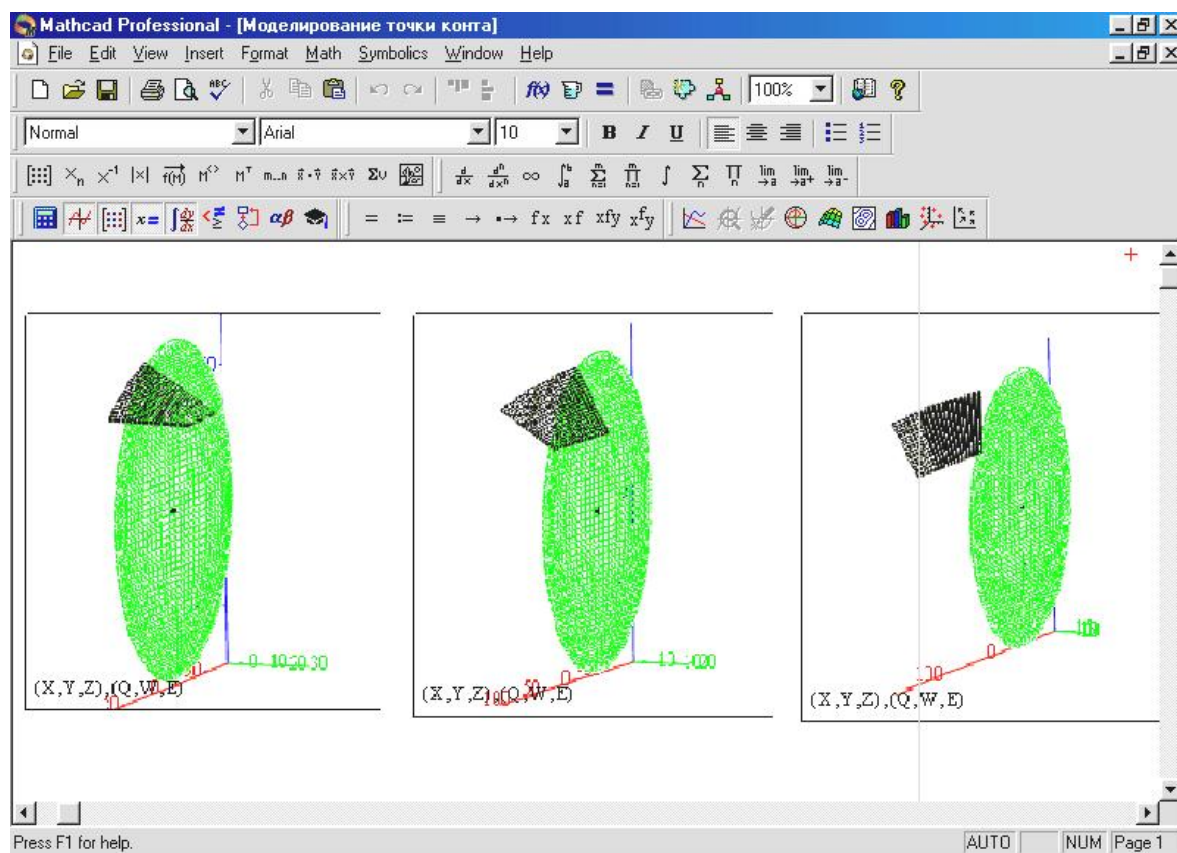


Рис. 3.7. Моделирование в программе Mathcad 2000 положения полки относительно инструмента при угле подгибки (слева направо): 30° , 60° , 90° при $\Delta\alpha = 30^\circ$

Смещение точки контакта на полке профиля при углах подгибки ($70-90^\circ$) приводит к увеличению силы подгибки полки, прикладываемой со стороны инструмента (в результате уменьшения плеча подгибки), что непосредственным образом влияет на распределение контактных давлений между инструментом и заготовкой (рассмотрено далее).

3.3.2. Определение кривизны инструмента в зоне контакта

Определение кривизны инструмента в зоне контакта необходимо для расчета контактных сил, действующих на заготовку, и их сопоставления с допустимыми контактными силами для покрытия.

Кривизна инструмента в зоне контакта отличается от кривизны скругленного участка бурта, что связано с образованием формы эллипса при сечении тора плоскостью, не проходящей через ось симметрии тора (рис. 3.8). В нашем случае скругление бурта представляет $\frac{1}{4}$ часть тора, а плоскость, пересекающая тор, условно представляет собой плоскость, определяемую вектором направле-

ния движения точки контакта по заготовке (вектором скольжения), параллельную оси ОУ. В свою очередь, вектор скольжения является результатом геометрического сложения линейных скоростей профиля и вертикального бурта (рис. 3.8.г). Определим величину продольной и поперечной кривизны инструмента в середине зоны контакта относительно вектора скольжения инструмента по заготовке (рис. 3.8).

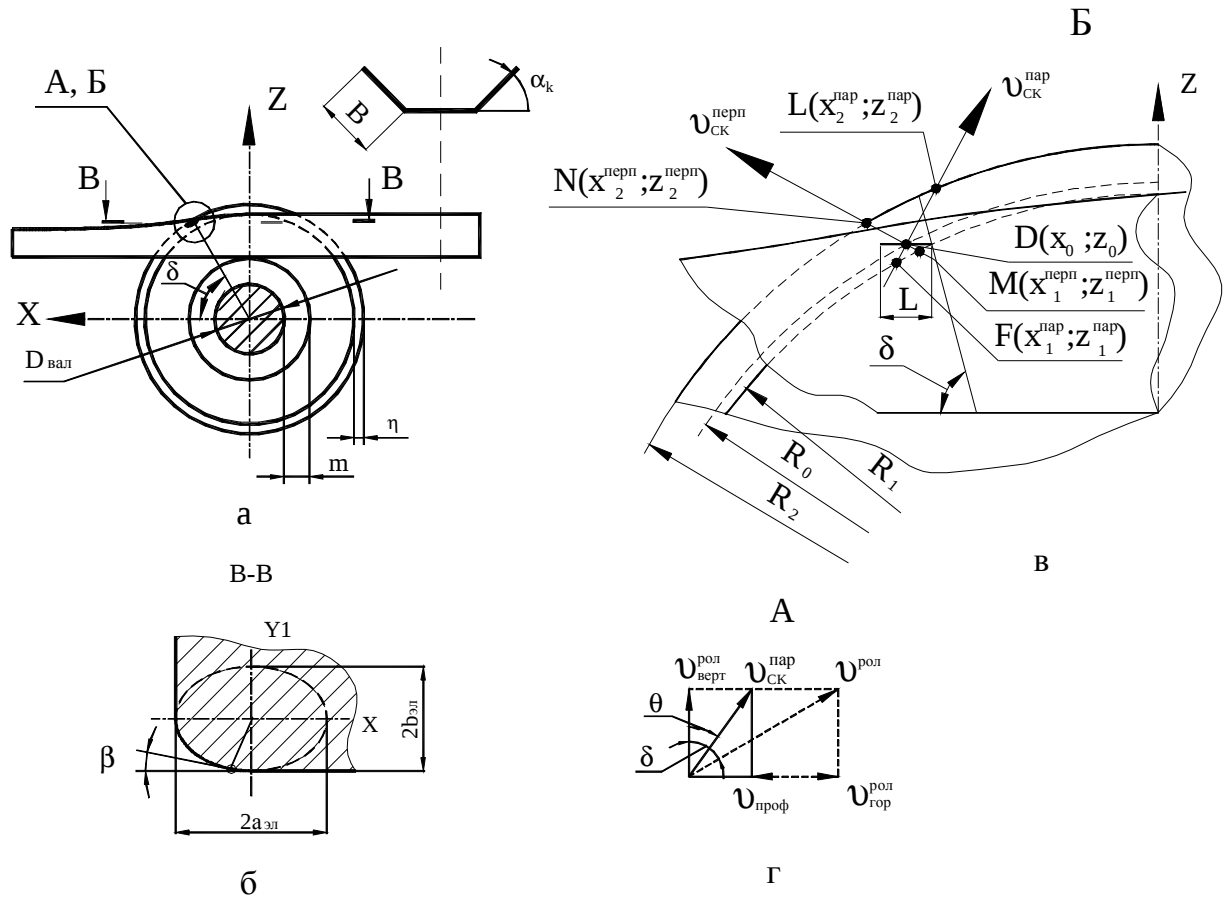


Рис. 3.8. Параметры ролика и его сечений

Определяем угол d :

$$d = \arcsin \left(\frac{\frac{D_{БАЛ}}{2} + 2m + B \cdot K_C \sin a_k}{\frac{D_{БАЛ}}{2} + 2m + B \cdot \sin a_k + h} \right), \quad (3.6)$$

где K_C – коэффициент смещения зоны контакта по полке профиля, который определяется по рис. 3.5, исходя из значений a_k и b .

Определим длину зоны контакта заготовки со скруглением бурта ролика. Для этого проведем по середине зоны контакта сечение В-В, при этом образуется эллипс (рис. 3.8.б) со значениями главных осей эллипса:

$$\begin{aligned} a_{эл} &= \sqrt{(R_1 + R_{бур})^2 - (R_1 \cdot \sin(d))^2} - R_1 \cdot \cos(d), \\ b_{эл} &= R_{бур}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

где $R_1 = \frac{D_{BAЛ} + 2m}{2} + B \cdot \sin(a_k) + h$.

Величина зоны контакта в направлении X будет определяться так:

$$L_K = \frac{a_{ЭЛ}^2}{\sqrt{a_{ЭЛ}^2 + \frac{b_{ЭЛ}^2}{\operatorname{tg}^2 b}}}, \quad (3.8)$$

где $b \cong K_C b$ – угол захода полки профиля с учетом коэффициента K_C .

Тогда середина зоны контакта D (рис. 3.8.б) в плоскости XZ будет определяться так:

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{L_K}{2} + R_1 \cdot \cos(d); \\ Z_0 &= R_1 \cdot \sin(d). \end{aligned} \quad (3.9)$$

Определим кривизну инструмента в середине зоны контакта, для чего выявим направление вектора скольжения $u_{ск}$ (рис. 3.8.г). Разность между векторами скорости движения профиля $u_{проф}$ и линейной скорости вертикальных буртов ролика $u_{рол}$ определяет направление вектора скольжения $u_{ск}^{нар}$ в точке D, для положения которого определяем угол:

$$q = \arctg \frac{u_{рол} \cdot \sin d - u_{проф}}{u_{рол} \cdot \cos d}, \quad (3.10)$$

где $u_{рол}$ – линейная скорость в точке D на вертикальном бурту ролика;

$u_{проф}$ – скорость движения профиля, которая принимается равной линейной скорости по поверхности нижнего ролика, облегающего дно профиля.

Вектор скольжения $u_{ск}^{нар}$ определяет величину радиуса кривизны инструмента в зоне контакта по ходу его движения (продольная кривизна), а $u_{ск}^{перп}$ определяет величину радиуса кривизны инструмента в зоне контакта перпендикулярно движению инструмента (поперечная кривизна).

Проводим плоскости по направлению векторов скольжения $u_{ск}^{нар}$ и $u_{ск}^{перп}$ в точке D на вертикальном бурту; пересечение этих плоскостей со скруглением бурта будут образовывать эллипсы; находим величины главных осей этих эллипсов. Малая главная ось обоих эллипсов будет равна $b_{эл}$, а большие главные оси определяем как векторную разность:

$$\begin{aligned} \vec{d}_{ЭЛ} &= \vec{L} - \vec{F} \\ \vec{e}_{ЭЛ} &= \vec{N} - \vec{M} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Координаты точек пересечения плоскостей образованных векторами $u_{ск}^{нар}$ и $u_{ск}^{перп}$ со скруглением бурта в проекции на плоскости XOZ найдем как пересечение линии с окружностью, соответственно:

$$\begin{cases} (X_i^{nap})^2 + (Z_i^{nap})^2 = R_i^2 \\ \frac{Z_i^{nap} - Z_0}{X_i^{nap} - X_0} = \operatorname{tg}\left(\frac{p}{2} - q\right), \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} (X_i^{nepn})^2 + (Z_i^{nepn})^2 = R_i^2 \\ \frac{Z_i^{nepn} - Z_0}{X_i^{nepn} - X_0} = \operatorname{tg}(p - q), \end{cases} \quad (3.12')$$

где $I = 1, 2$ – соответствующие индексы по рис. 3.8.в;

X_i, Z_i – координаты точек пересечения линии (вектора) с окружностью;

X_0, Z_0 – координаты точки D.

Тогда значения больших главных осей эллипсов будут определяться по формулам:

$$d_{эл} = \sqrt{(Z_2^{nap} - Z_1^{nap})^2 + (X_2^{nap} - X_1^{nap})^2}, \quad (3.13)$$

$$e_{эл} = \sqrt{(Z_2^{nepn} - Z_1^{nepn})^2 + (X_2^{nepn} - X_1^{nepn})^2}.$$

А расстояние до точки D определяется по формулам:

$$FD = \sqrt{(Z_0 - Z_1^{nap})^2 + (X_0 - X_1^{nap})^2}, \quad (3.14)$$

$$MD = \sqrt{(Z_0 - Z_1^{nepn})^2 + (X_0 - X_1^{nepn})^2}.$$

Тогда величину радиуса кривизны в продольном и поперечном направлении в середине зоны контакта (точка D), используя формулу по нахождению величины радиуса кривизны в любой точке эллипса [140], определим следующим образом:

$$R^{nap} = b_{эл}^2 d_{эл}^2 \left(\frac{1 - \frac{FD^2}{d_{эл}^2}}{b_{эл}^2} + \frac{FD^2}{d_{эл}^4} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad (3.15)$$

$$R^{nepn} = b_{эл}^2 e_{эл}^2 \left(\frac{1 - \frac{MD^2}{e_{эл}^2}}{b_{эл}^2} + \frac{MD^2}{e_{эл}^4} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (3.16)$$

Рис. 3.9 дают представление о зависимости радиуса кривизны инструмента в середине зоны контакта от ширины полки В. По графикам можно отметить резкое изменение радиуса кривизны инструмента в зоне контакта при углах подгибки близких к 90° , что связано со смещением зоны контакта на профиле в сторону предугловых зон. Одним из способов увеличения кривизны инструмента в зоне контакта является изменение формы его контактной поверхности, например, путем замены дуговых участков скругления бурта участками эллипсов с соотношением полуосей $a_6 / b_6 = 5/3$ (данное соотношение в первую очередь связано с геометрическими размерами буртов, применяемых при профилировании). На графике (рис. 3.10) представлена зависимость изменения кри-

визны инструмента в зоне контакта за счет изменения профиля скругления инструмента.

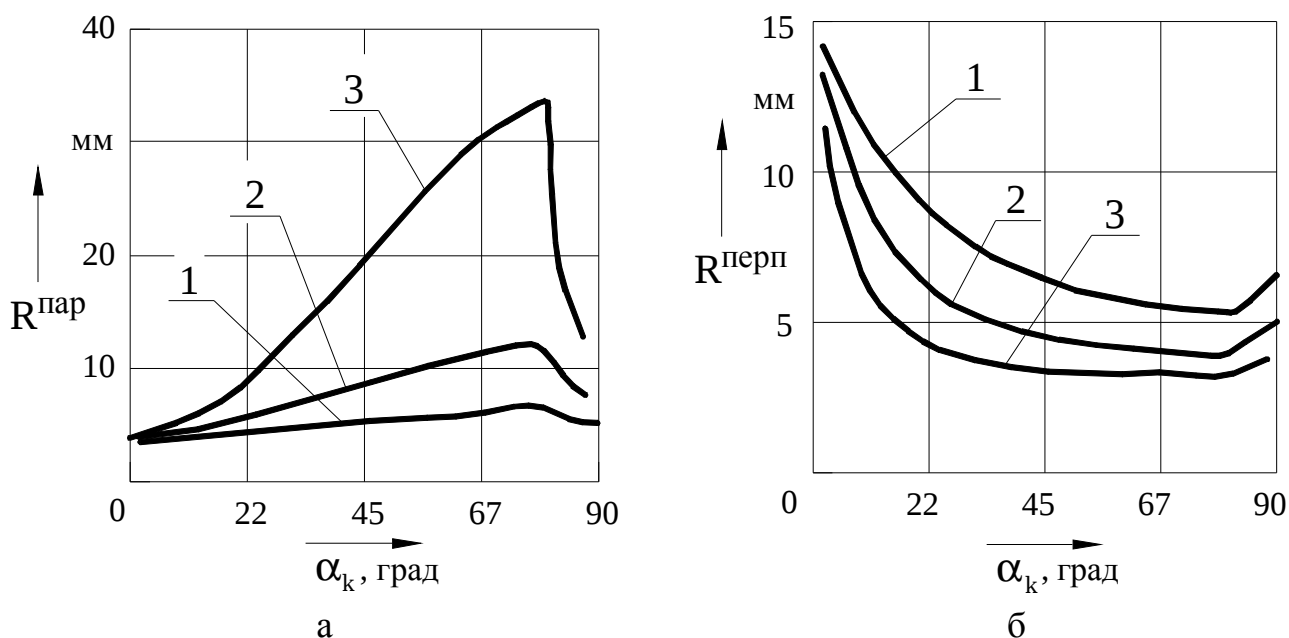


Рис. 3.9. Зависимость радиуса кривизны инструмента R в зоне контакта по ходу движения инструмента (а) и перпендикулярно ходу движения инструмента (б) от угла подгибки α_k и ширины полки: 1 – $B = 10$ мм; 2 – $B = 20$ мм; 3 – $B = 40$ мм.

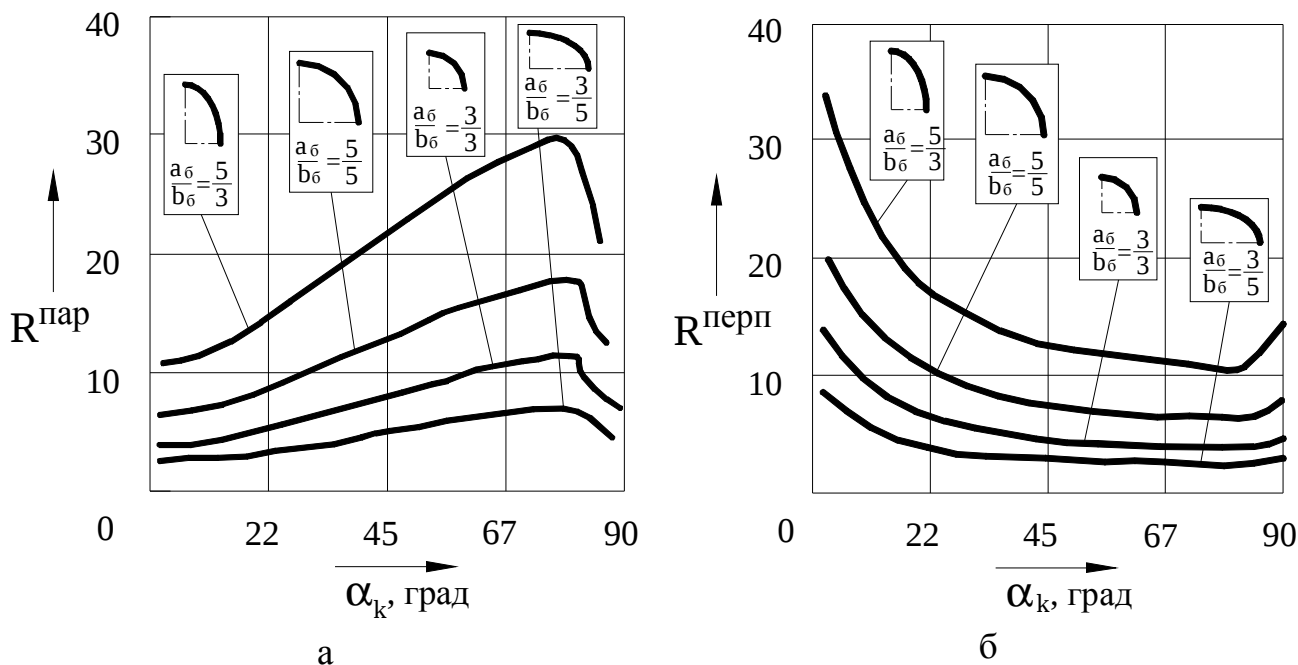


Рис. 3.10. Зависимость радиуса кривизны инструмента R в зоне контакта по ходу движения инструмента (а) и перпендикулярно ходу движения инструмента (б) от угла подгибки α_k и формы бурта

3.3.3. Определение контактных сил со стороны бурта ролика на заготовку

Для вычисления контактной силы используем формулу определения дли-

ны зоны плавного перехода [81]:

$$L = \sqrt{\frac{8b^3 \Delta a}{3S_0}}. \quad (3.17)$$

Момент, возникающий при гибке уголковой зоны в расчете на единичную длину, как известно, дается формулой:

$$M = \frac{s_s S_0^2}{4}. \quad (3.18)$$

С учетом изменения в зоне плавного перехода угла подгибки от a_{k-1} до a_k или разницы угла подгибки от 0 до Δa (т.е. величина момента будет равна половине), с учетом формул (3.17) и (3.18) можно записать:

$$M = \frac{s_s S_0^2}{4} \sqrt{\left[\frac{2 \cdot b^3 \cdot \Delta a}{3 \cdot S_0} \right]}. \quad (3.19)$$

Тогда сила подгибки с учетом смещения зоны контакта (использование коэффициента K_C) определяется следующим образом:

$$F = \frac{s_s S_0^2}{4K_C} \sqrt{\left[\frac{2 \cdot b \cdot \Delta a}{3 \cdot S_0} \right]}. \quad (3.20)$$

При расчете сил для профилей с несколькими подгибаемыми элементами параметр b пересчитывается на общую величину подгибаемых элементов.

В качестве искомого параметра используется значение удельной контактной силы F/R [137], представленной в виде:

$$P = \frac{F}{\sqrt{R^{nap} \cdot R^{nepn}}} \quad (3.21)$$

На рис. 3.11 – 3.13 приведены зависимости величины P от параметров процесса.

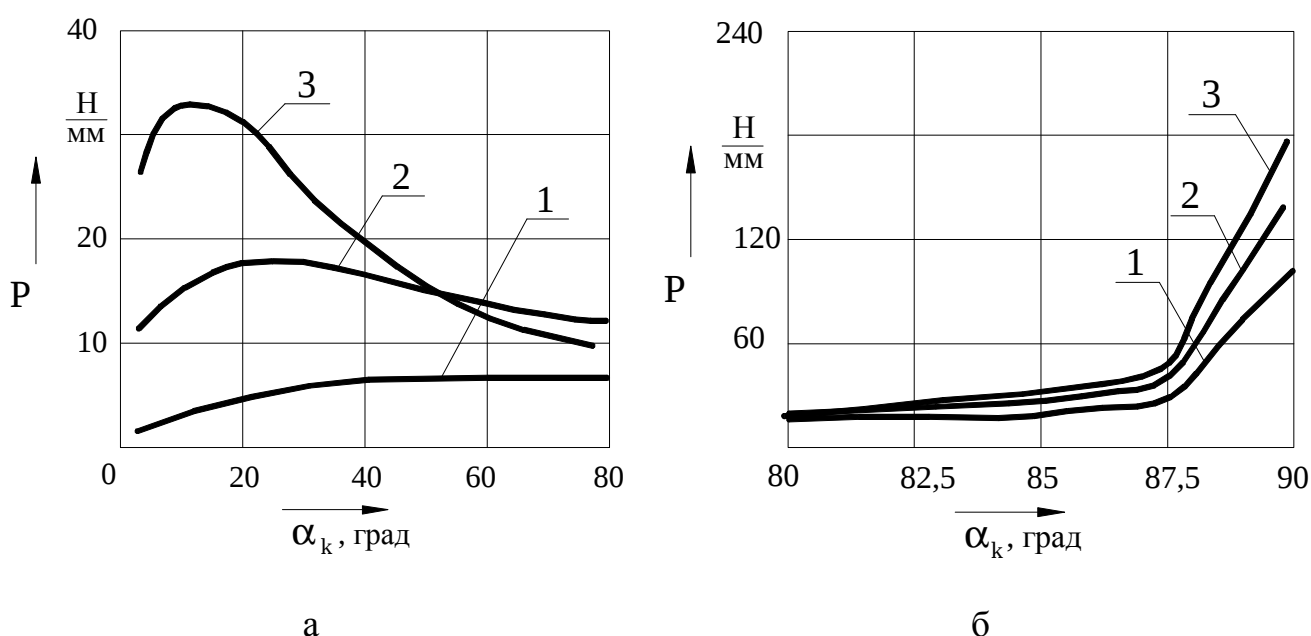
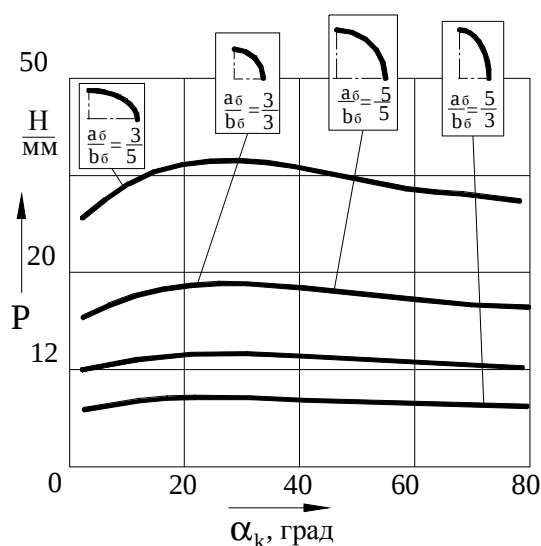
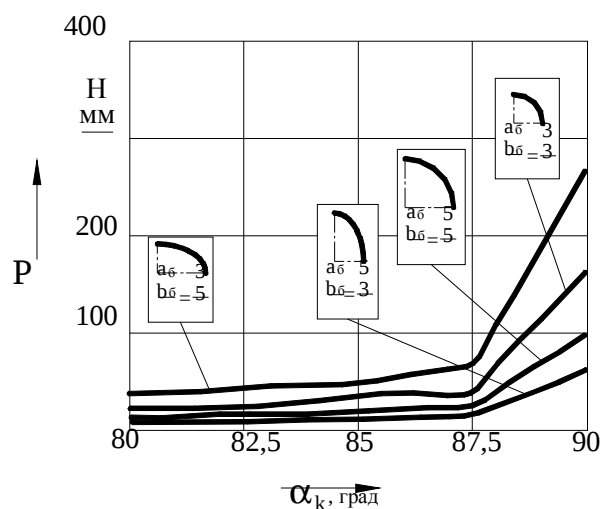


Рис. 3.11. Зависимость P от угла подгибки a_k при его изменении от 0 до 80° (а) и от 80 до 90° (б) и высоты полки: 1 – $V = 10$ мм; 2 – $V = 20$ мм; 3 – $V = 40$ мм.

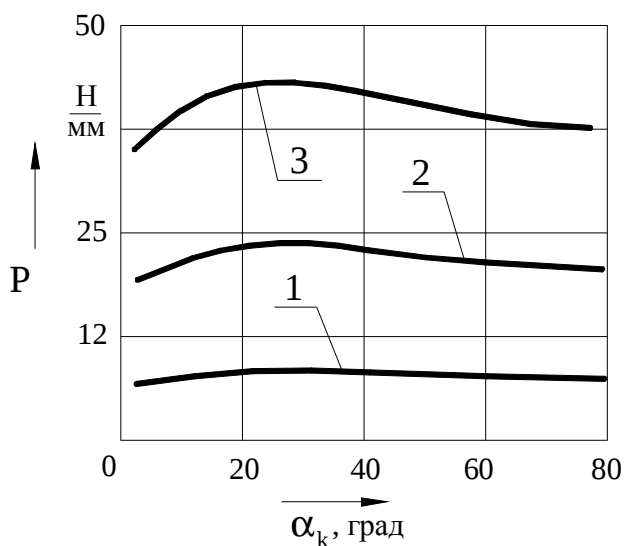


а

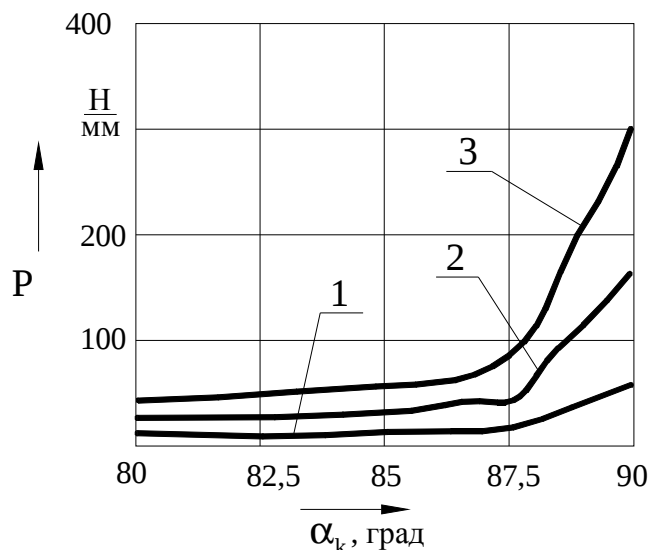


б

Рис. 3.12. Зависимость P от угла подгибки α_k при его изменении от 0 до 80° (а) и от 80 до 90° (б) и формы буртов $a_{эл} / b_{эл}$



а



б

Рис. 3.13. Зависимость параметра P от угла подгибки α_k от 0 до 80° (а) и от 80 до 90° (б) и высоты полки: 1 – $S = 0,5$ мм; 2 – $S = 1,0$ мм; 3 – $S = 1,5$ мм

По рис. 3.11 – 3.13 можно отметить резкое увеличение контактных сил при углах подгибки, близких к 90° (при вертикальном положении полки).

Поэтому необходимо по возможности избегать подгибки на 90° в основных формующих роликах при наличии вертикальных буртов или уменьшать прикладываемые силы, например, за счет уменьшения разности углов подгибки $\Delta\alpha$. Одним из способов предотвращения дефектов при подгибке на вертикаль-

ный угол (90^0) является изменение условий деформирования (формовка на угол 88^0 , применение формующего инструмента с вертикальным расположением осей, применение дополнительных приспособлений и др.).

3.3.4. Определение предельных параметров процесса

Определение предельных параметров процесса осуществляется с учетом допустимых контактных сил для конкретного покрытия, определяемых в предварительных исследованиях при некотором заданном $S_{сд}$ (п.2.4). Поэтому значение предельных параметров будет зависеть от назначения профиля и требований к нему. На рис. 3.14 приведены значения предельных параметров процесса (угла подгибки α_K , ширины полки В, толщины исходной заготовки S) при изготовлении профиля из материала с ПЭ покрытием декоративного исполнения при среднем уровне требований к нему.

По рис. 3.14 можно определить форму и параметры бурта формующего ролика, исходя из допустимых контактных нагрузок (а), а также предельную толщину исходной заготовки (б).

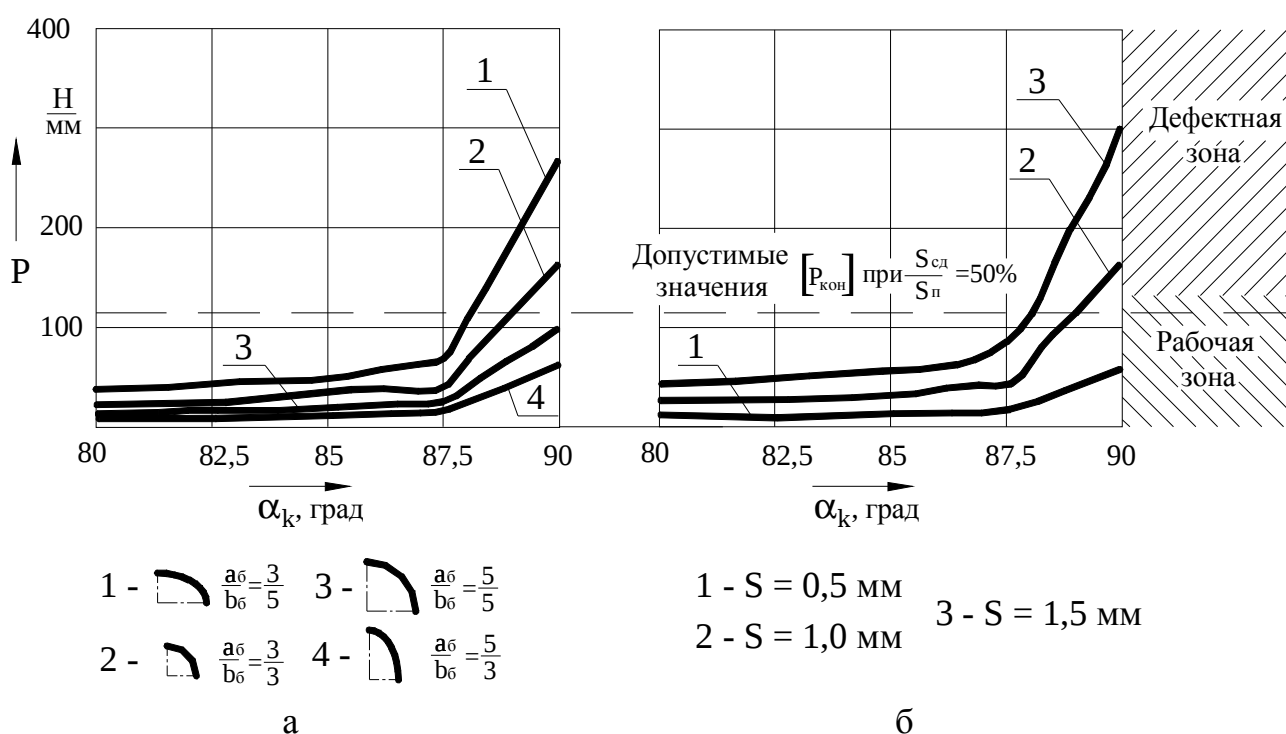


Рис. 3.14. Определение предельных параметров процесса от угла подгибки α_K , от формы бурта ролика (а) и толщины исходной заготовки (б)

3.4. Напряженно-деформированное состояние материала с покрытием в контактной зоне при профилировании

При изготовлении гнутых профилей в роликах из материалов с покрытием может происходить нарушение последнего как из-за низкого качества по-

крытия или его нанесения, так и в связи с издержками применяемых способов формообразования. В этом плане методы интенсивного формообразования требуют специальных исследований напряженно-деформированного состояния материала в контактных зонах [139]. Характерные зоны повреждения покрытий приведены на рис. 3.15.

На рис. 3.15 схема а) соответствует условиям формообразования профиля по схеме свободной гибки в открытом калибре или условиям формообразования сложного профиля в закрытом калибре без приложения торцевых сил. Схема б) характерна для гибки в закрытых калибрах с приложением торцевых сил сжатия. По схеме в) выполняют локальный обжим заготовки для выравнивания продольных деформаций подгибаемых полок с целью предотвращения скрутки профиля или же для калибровки элементов двойной толщины. Схему г) применяют при формовке петельных элементов, законцовок сайдинга и размерной посадки элемента двойной толщины. Хотя приведенные схемы и не исчерпывают всего многообразия типоразмеров профилей [63], при формообразовании которых могут возникнуть напряжения и деформации, близкие к критическим, все же значения последних не столь велики по сравнению с приведенными. Именно на указанных элементах в реальности наблюдались нарушения покрытия при отработке технологии в ОАО “Ульяновский НИАТ”.

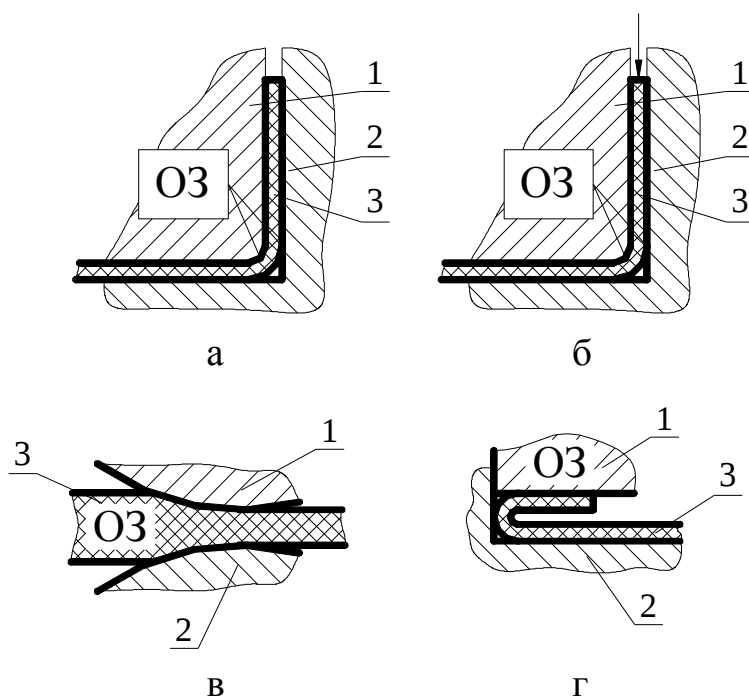


Рис. 3.15. Характерные зоны повреждения покрытий заготовок при формообразовании профилей в роликах: 1 – верхний ролик; 2 – нижний ролик; 3 – заготовка; O3 – опасная зона

Оценку напряжений и деформаций целесообразнее всего производить по их интенсивности, поскольку при этом учитывается суммарный эффект от воздействия инструмента. Для заготовок с покрытием первостепенное значение

имеет интенсивность деформации на уровне слоя покрытия, которая при сравнении с допустимыми деформациями материала покрытия позволяет выявить предельные параметры процесса. Напряженное состояние выявляется лишь в связи с определением деформации.

На схеме а) рис. 3.15 указаны две опасные зоны: внутренний контур, вступающий в контакт с верхним роликом, и зона, непосредственно примыкающая к криволинейному участку заготовки со стороны наружного контура зоны сгиба. В обеих зонах наряду с нормальными контактными напряжениями действуют и касательные напряжения перпендикулярно плоскости представленного сечения.

Радиальные напряжения в сжатой контактной уголкообразной зоне могут быть определены из решения соответствующей задачи изгиба участка заготовки, подверженного контактному воздействию:

уравнение равновесия:

$$\frac{\partial s_r}{\partial r} + \frac{s_r - s_q}{r} = 0, \quad (3.22)$$

условие пластичности для зоны сжатия:

$$s_r - s_q = s_s, \quad (3.23)$$

граничное условие:

$$s_r \big|_{r_B} = s_{\kappa}^{6H}. \quad (3.24)$$

Решаем уравнения 3.22 - 3.24:

$$\frac{\partial s_r}{\partial r} = -\frac{s_s}{r}; \quad s_r = -s_s \ln r + C, \quad (3.25)$$

где s_r - радиальное напряжение; s_q - окружное напряжение; s_{κ}^{6H} - контактное напряжение на внутреннем контуре; r, r_B - текущий и внутренний радиус зоны сгиба соответственно; C - константа интегрирования.

$$s_r \big|_{r_B} = s_{\kappa}^{6H} = -s_s \ln(r_B) + C; \quad (3.26)$$

$$C = s_{\kappa}^{6H} + s_s \ln(r_B). \quad (3.27)$$

Из формул (3.25) и (3.27):

$$s_r^-(r) = s_{\kappa}^{6H} + 2 \cdot k \cdot \ln \frac{r_6}{r}, \quad (3.28)$$

где $k = \frac{s_s}{2}$ - максимальное касательное напряжение;

Аналогично решается задача по определению радиальных напряжений в зоне растяжения (рис. 3.15, схема "а") при наличии контактных воздействий:

$$s_r^+(r) = s_{\kappa}^{нар} + 2 \cdot k \cdot \ln \frac{r}{R_{нар}}. \quad (3.29)$$

Касательные напряжения на наружном контуре определяются из закона Амонта-Кулона с учетом формулы (3.29):

$$t(r) = s_r(r) \cdot f, \quad (3.30)$$

где f - коэффициент трения.

При наличии на поверхности тонких покрытий ($S_{\text{пок}} = 10 - 25$ мкм) значение логарифма (3.29) стремится к нулю, поэтому радиальными напряжениями при изгибе можно пренебречь и учитывать только контактные воздействия.

Результирующее напряжение в поверхностном слое определяется так:

$$t^R = \sqrt{(s_r)^2 + (t)^2}, \quad (3.31)$$

Условие целостности покрытия в контактной зоне может быть сформулировано в виде:

$$t^R \leq [t^n], \quad (3.32)$$

где $[t^n]$ - допустимое напряжение сдвига покрытия.

Определение допустимого напряжения $[t^n]$ связано с большими трудностями и должно определяться в условиях нагружения, сходных с реальными условиями деформирования. В главе 2 при оценке допустимых контактных воздействий на покрытие использовалась в качестве критерия допустимая удельная контактная сила. Определение допустимого значения деформации является менее трудоемким (см. далее).

Определение значения касательного напряжения с наружной стороны профиля осуществляется при помощи параметра “погонная сила”. Будем считать погонную силу подгибки сосредоточенной в малой области вблизи точек сопряжения прямолинейного и криволинейного участков наружного контура и равной q . Тогда:

$$s_k \cdot R_B = q. \quad (3.33)$$

Значение погонной силы определено в работе [141]. Из формул (3.28) – (3.30) и последнего соотношения определяется касательное напряжение

$$s_t = f \cdot \frac{q}{R_B} \quad (3.34)$$

Значения напряжений (3.29) справедливы лишь для основного материала, в то время как формула (3.34) приложима и к слою покрытия, для которого легко определить деформацию сжатия на внутреннем контуре, примерно совпадающую с деформациями крайнего волокна основного материала заготовки:

$$e_q \approx -\frac{s}{2 \cdot r_B + s}, \quad (3.35)$$

где e_q - окружная деформация слоя покрытия.

Радиальную деформацию слоя покрытия e_r , к сожалению, невозможно определить из условия несжимаемости как для металла, однако ее можно найти экспериментальным путем по зависимости:

$$e_r = \frac{\Delta h}{h}, \quad (3.36)$$

где $\Delta h, h$ – изменение толщины слоя покрытия в результате деформации и значение его толщины до деформации соответственно.

Для заготовки в целом справедливо условие плоской деформации, а деформация покрытия вследствие действия сил трения составляет величину

$$e_t = s_t \cdot G, \quad (3.37)$$

где e_t – деформация сдвига покрытия; G – модуль сдвига материала покрытия.

С использованием формул (3.35) – (3.37) можно определить интенсивность деформаций e_i :

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(e_q - e_r)^2 + (e_q - e_t)^2 + (e_r - e_t)^2}. \quad (3.38)$$

Проведя эксперименты по одноосному растяжению образцов и установив предельную деформацию покрытия $e_{пред}$, можно определить технологические возможности процесса формообразования по критерию:

$$e_i \leq e_{пред}. \quad (3.39)$$

Один из способов определения предельной деформации покрытия $e_{пред}$ – это испытания подложки с покрытием на изгиб (покрытие на наружной стороне зоны сгиба). При наличии покрытия малой толщины ($S_{пок} \ll S_{под}$) погрешностью метода испытания можно пренебречь.

Для контактной зоны на наружном прямолинейном контуре $e_q = 0$ и формула (3.38) упрощается. Аналогичный подход справедлив и для схемы б) и рис. 3.14. В этом случае только следует учитывать комбинацию сил подгибки q и торцевого поджатия p [141].

В схемах «в» и «г» (рис. 3.15) обжим заготовки приводит также к возникновению нормальных и касательных напряжений.

Рассмотрим условия локального обжима профиля [138, 139] на некотором участке шириной b и первоначальной толщиной s_0 (рис. 3.16). Механические характеристики субстрата (основного материала) и покрытия условимся обозначать набором $\{\xi_i(x_3)\}$, задаваемым следующим образом:

$$x_i(x_3) = \begin{cases} x_i^s, & 0 < x_3 \leq \frac{s}{2} - s_{II} \\ x_i^c, & \frac{s}{2} - s_{II} < x_3 \leq \frac{s}{2} \end{cases}, \quad (3.40)$$

где $i = 1, 2, 3 \dots$ относится к показателям в порядке их следования: модуль Юнга, предел текучести, предел прочности, относительное удлинение и т.д.;

S, S_{II} – общая толщина заготовки и толщина покрытия (текущие);

s, c – верхние индексы показателя, относящиеся к субстрату и покрытию соответственно.

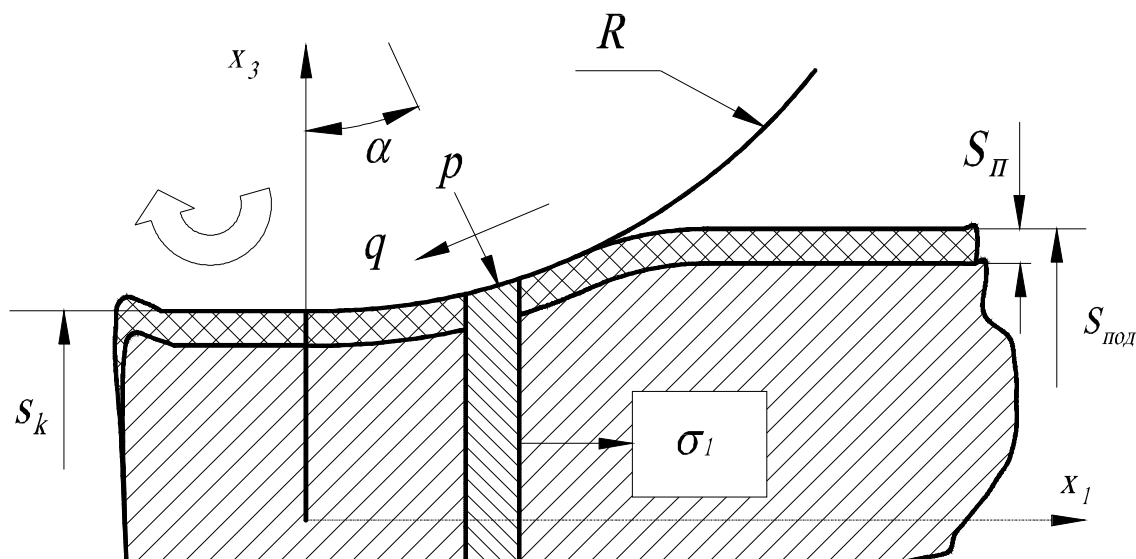


Рис. 3.16. Схема локального обжима элемента профиля

При рассмотрении обжима будем полагать:

$$x_2 = \frac{x_2^s \cdot (s_{под} - 2 \cdot s_{II}) + 2 \cdot x_2^c \cdot s_{II}}{s} \approx x_2^c \approx s_T, \quad (3.41)$$

где s_0 – толщина исходной заготовки; s_T – предел текучести субстрата.

Применительно к схеме рис. 3.16 для выделенного элемента уравнения равновесия имеют вид:

$$\begin{aligned} s_3 \cdot dx_1 &= (p \cdot \cos \alpha + q \cdot \sin \alpha) \cdot R \cdot da, \\ d(s \cdot s_1) &= (p \cdot \sin \alpha - q \cdot \cos \alpha) \cdot 2 \cdot R \cdot da, \end{aligned} \quad (3.42)$$

а условие пластичности принимает форму:

$$\sigma_i = \sigma_T. \quad (3.43)$$

В уравнениях (3.42) и (3.43) σ_1 , σ_3 – главные напряжения; p , q – силовые факторы, действующие на поверхности выделенного элемента; σ_i – интенсивность напряжений. Комбинируя уравнения (3.42) и (3.43) и производя преобразования с учетом связи геометрических параметров, получим разрешающее уравнение для определения контактных напряжений в виде:

$$\frac{dp}{dx_1} - \frac{2 \cdot f \cdot R}{R \cdot s_k + x_1^2} \cdot p = \frac{4 \cdot k \cdot x_1}{s_k \cdot R + x_1^2}, \quad (3.44)$$

где k – максимальное касательное напряжение ($k = \sigma_T / \sqrt{3}$).

Уравнение (3.44) по виду несколько отличается от упрощенного уравнения Кармана [142], для которого известна асимптотическая оценка, а замкнутое решение получено лишь при дальнейших упрощающих предположениях. Граничные условия для уравнения (3.44) следует взять нулевыми в начальной точке контакта заготовки и формирующего ролика, определяемой вдоль координаты x_1 формулой:

$$x_{10} \approx \sqrt{R \cdot (s_0 - s_k)}. \quad (3.45)$$

Вводя обозначения:

$$f(x_1) = -\frac{2 \cdot f \cdot R}{R \cdot s_k + x_1^2} ; \quad g(x) = \frac{4 \cdot k \cdot x_1}{s_k \cdot R + x_1^2}, \quad (3.46)$$

представим уравнение (3.44) с учетом обозначений (3.46) в виде:

$$p' + f(x_1) \cdot p = g(x_1) \quad (3.47)$$

Решение уравнения (3.47) с принятыми граничными условиями для точки x_{10} (см. формулу (3.45)), известно [143]:

$$p(x_1) = \exp(-F(x_1)) \cdot \int_{x_{10}}^{x_1} g(x) \cdot \exp(F(x)) \cdot dx, \quad (3.48)$$

где $F(x_1) = \int_{x_{10}}^{x_1} f(x) \cdot dx.$

Выполнение интегрирования уравнения (3.48) приводит к следующему результату:

$$p(x_1) = \frac{4 \cdot k}{f \cdot R} \cdot \exp(2 \cdot h(x_1)) \cdot \left[x_{10} \cdot \exp(-h(x_{10})) - x_1 \cdot \exp(-h(x_1)) + \int_{x_1}^{x_{10}} \exp(-h(x)) \cdot dx \right], \quad (3.49)$$

где $h(x) = f \cdot \sqrt{\frac{R}{s_k}} \cdot \arctg\left(\frac{x}{\sqrt{R \cdot s_k}}\right).$

К сожалению, последний интеграл в решении (3.49) не может быть вычислен аналитически, однако само решение легко табулируется, например, с помощью программы MathCAD 2001 Pro. Результаты вычисления приведены на рис. 3.17, где зазор в калибре задан через степень обжима заготовки ϵ_3 . Контактные давления здесь представлены в безразмерном виде $p(x, \epsilon_3) / 2k$.

При анализе теоретических и экспериментальных исследований при об-

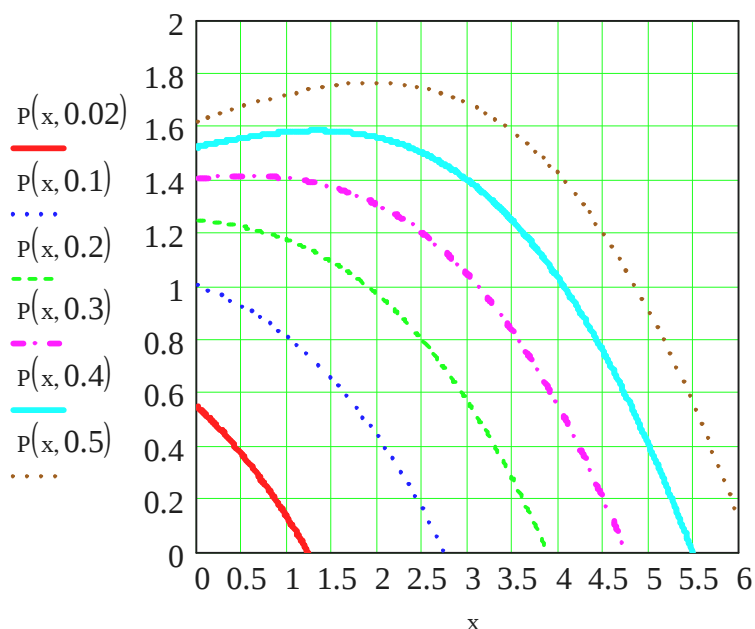


Рис. 3.17. Зависимость относительного контактного давления $p(x_1, \epsilon_3)$ в зоне обжима от координаты $x = x_1$ и степени обжима ϵ_3

жиме можно отметить высокую стойкость покрытия на поверхности стальной подложки даже при переходе ее в пластическое состояние (ПЭ покрытия выдерживают деформацию при обжиге образцов до 50%, по графику 3.17 это соответствует значению относительного контактного давления равного 1,8).

Выводы

1. Анализ способов предотвращения НП показал, что наиболее эффективными являются способы, связанные с оптимизацией радиусов угловых зон профиля, радиусных и криволинейных зон роликов, с использованием приводных, нажимных устройств и смазочных систем.

2. Определено расположение зон максимальных давлений по полкам будущего профиля от технологических параметров процесса. Установлено, что при подгибке профиля швеллерного типа до углов подгибки $70-80^{\circ}$ зона контакта на профиле находится вблизи предторцевых частей профиля, а при приближении к 90° наблюдается резкое смещение зоны контакта к предугловым зонам профиля, что резко изменяет величины приложенных контактных сил. Полученные результаты подтверждены моделированием взаимного расположения инструмента и полки в системе Mathcad 2001Pro.

3. Определены оптимальные значения кривизны контактной части бурта, контактных сил, а также предельные параметры процесса, исходя из допустимых контактных давлений для покрытия, от технологических параметров процесса и формы “скругления” контактной части инструмента для бездефектного изготовления профилей с покрытием. Отмечено резкое увеличение контактных сил, действующих на заготовку, при углах подгибки близких к 90° . Изменение круговой формы скругления контактных частей буртов на эллипсную позволяет в 2,2 – 2,7 раз понизить контактные силы, действующие на заготовку.

4. Предложен подход к определению НДС материала в контактной зоне и определена зависимость относительного контактного давления от величины степени обжима при прокатке полосы из материала с покрытием, при этом действующие контактные напряжения превышают напряжение текучести без образования дефекта нарушения покрытия толщиной менее 50 мкм.

ГЛАВА 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ

4.1. Программа и методика исследования

4.1.1. Цели и задачи исследования

Целью настоящих исследований является установление закономерностей формообразования заготовки с покрытием в роликах, условий и параметров нарушения покрытия (НП), а также данных о возникновении дефектов нарушения покрытия на различных типах профилей.

Основные задачи исследований:

- выявление типов профилей и зон, подверженных НП;
- установление видов дефектов покрытия и их характеристик;
- верификация теоретической модели зоны контакта заготовки с инструментом;
- определение параметров НП при различных условиях процесса формообразования;
- определение геометрических параметров процесса;
- выявление предельных возможностей процесса формообразования в условиях отсутствия НП.

4.1.2. Основные факторы процесса и применяемые методы

Основными факторами, влияющими на процесс пластического формоизменения заготовки при интенсивном деформировании являются:

- геометрические характеристики сечения профиля (форма и размеры);
- технологические характеристики (параметры заготовки, схемы и режимы формообразования, включая углы подгибки по переходам, величину и точность установки зазоров в формующих калибрах, выбор и установку оси профилирования);
- характеристики оборудования (количество переходов; межклетьевое расстояние).

При использовании заготовки с покрытием дополнительным фактором является наличие покрытия, его влияние на пластическое формоизменение заготовки и связанные с этим ограничения.

В качестве основных методов исследований применялись:

- методы определения толщины покрытия (микрометром, магнитным методом и по ГОСТ 14918-90);
- геометрические методы измерения линейных и угловых величин;
- методы оценки состояния покрытия по ранее принятой балльной системе;
- методы определения следа контакта по краске;
- методы статистического анализа.

4.1.3. Программа исследования и применяемые средства

Программа исследования предусматривала следующие этапы:

1. Анализ номенклатуры профилей, имеющих дефекты нарушения покрытия при отработке технологии;
2. Установление видов и характеристик нарушения покрытия;
3. Экспериментальное определение геометрических параметров процесса при изготовлении в роликах;
4. Исследование предельных возможностей процесса формообразования профилей из заготовок с покрытием.

При экспериментальных исследованиях применяемое оборудование, инструменты и приборы приведены в табл. 4.1.

При настройке профилегибочного оборудования и формующей оснастки контролировали следующие параметры:

- расположение оси профилирования в горизонтальной плоскости;
- расположение оси профилирования в вертикальной плоскости;
- расположение оси профилирования относительно базовой плоскости;
- расположение направляющего устройства;
- зазоры в формующих калибрах экспериментального оснащения.

Таблица 4.1

Оборудование, инструменты и приборы, применяемые при исследовании

№	Наименование	Назначение	Примечание
1	2	3	4
1	Ножницы дисковые DIN-600; DIN-1250	Подготовка заготовок	
2	Гибочно-прокатные станки: ГПС-200М11; ГПС-300М4; ГПС350М6; ГПС-500М6	Профилирование заготовок	
3	Экспериментальная оснастка	Исследование схем формообразования	
4	Устройство для отслоения покрытия	Моделирование процесса нарушения покрытия	Нест. [136]
5	Толщиномер ИП-1	Измерение толщины покрытия	
6	Микроскоп МИМ-8М, фотоаппарат Zenit-TTL, Samsung digimax i5, сканер Mustek 12000	Фотографии и изображения образцов	

1	2	3	4
7	Компьютер (II-IV)	Введение базы данных изготавливаемых профилей, технологических особенностей изготовления, статистическая обработка результатов, выполнение расчетов	
8	Штангенциркули ШЦ-I-125, ШЦ-I-250	Измерение линейных параметров заготовок, оснастки	ГОСТ 166-80
9	Набор щупов №2, №4	Замер зазоров в роликах	ТУ 2-034-225-87
10	Наборы радиусных шаблонов №1, №3	Замер радиуса кривизны заготовки в межклетьевом пространстве и радиусов скругления ролика	ТУ 2-034-228-88
11	Угломер 1-2	Замер угловых размеров профиля, оснастки	ГОСТ 5378-88

4.2. Анализ номенклатуры профилей, подверженных нарушению покрытия; характерные дефекты профилей и основные факторы нарушения покрытия

В табл. 4.2 указано профилегибочное оборудование на котором производилась отработка профилей. В табл. 4.3 приведена основная часть номенклатуры профилей, изготовленных из материала с покрытием и характеристики их поперечного сечения.

Таблица 4.2

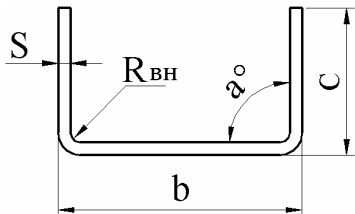
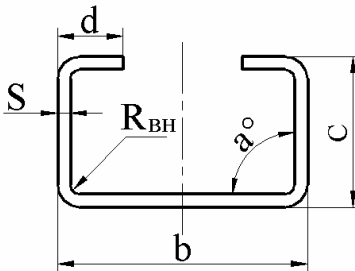
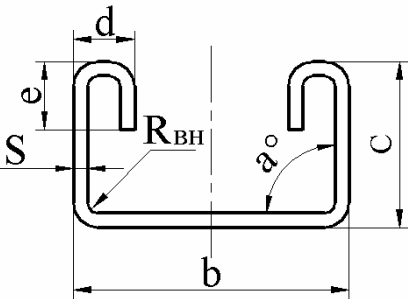
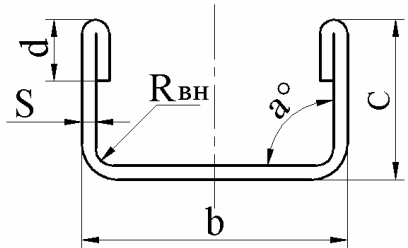
Основные параметры оборудования

№	Модель	Количество клеток	Межклетьевое расстояние, мм	Скорость профилирования, м/мин
1	ГПС-200M11	4	300	3,5/14
2	ГПС-300M4	4	400	8
3	ГПС-350M6	6	400	10
4	ГСП-500M6	6	400	10

Модель используемого станка определялась технологией метода интенсивного деформирования.

Таблица 4.3

Номенклатура типовых профилей и характеристики поперечного сечения

№	Тип профиля	Характеристики сечения	Типичное покрытие
1		$b = 15-220 \text{ мм};$ $c = 5-50 \text{ мм};$ $a = 90^\circ;$ $S = 0,5-2,0 \text{ мм};$ $R_{BH} = (0,8-2)S.$	ПП Zn
2		$a = 90^\circ;$ $b = 10-200 \text{ мм};$ $c = 10-50 \text{ мм};$ $d = 5-30 \text{ мм};$ $S = 0,5-2,0 \text{ мм};$ $R_{BH} = (0,8-2)S.$	ПП Zn
3		$a = 90^\circ;$ $b = 10-200 \text{ мм};$ $c = 10-50 \text{ мм};$ $d = 5-30 \text{ мм};$ $e = 5-30 \text{ мм};$ $S = 0,5-2,0 \text{ мм};$ $R_{BH} = (0,8-2)S.$	Zn ($S=1-2 \text{ мм}$); ПП ($S=0,5-1,0 \text{ мм}$)
4		$a = 90^\circ;$ $b = 10-200 \text{ мм};$ $c = 10-50 \text{ мм};$ $d = 5-30 \text{ мм};$ $S = 0,5-2,0 \text{ мм};$ $R_{BH} = (0,8-2)S.$	ПП ($S=0,5-1,0 \text{ мм}$)

4.2.1. Карта дефектов профилей

Для выделения наиболее важных объектов исследований предварительно была составлена карта дефектов профилей с покрытием при опробовании технологического оснащения. Карты дефектов составлялись в течение 3-х лет, так что основная часть постановочных экспериментов проводились в виде пассивного эксперимента.

Исследованию и отработке были подвергнуты более 100 профилей. При этом фиксировали следующие параметры:

- тип профиля (швеллер, С-образный, профили с ЗЭ и ЭДТ, другие виды профилей);
- толщину исходной заготовки, мм;
- вид покрытия (Zn, ПП);
- число технологических переходов;
- вид дефекта покрытия: риски (Р), потертости (П), сдиры (С), трещины (Т), отслаивания (О);
- размеры дефекта по сечению профиля, мм;
- расположение дефекта на участках профиля (рис. 4.1 и рис. 4.2);
- другие дефекты: кромковая волнистость (КВ), волнистость (В), изменение формы профиля по сечению (Ф).

4.2.2. Статистические результаты исследования

По составленным картам дефектов был проведен статистический анализ по установлению:

- количества профилей, подверженных НП;
- соотношения типов профилей, имеющих НП;
- соотношения характерных участков профиля, имеющих НП.

Результаты статистического анализа, выполненные с использованием пакета Microsoft Excel 97, приведены на рис. 4.3, 4.4, 4.6; основные участки профиля, имеющие НП, показаны на рис. 4.5. В табл. 4.4 приведены карты дефектов для наиболее типичных профилей, изготавливаемых из материала с покрытием.

В настоящее время на отечественном рынке пользуются спросом профили швеллерного и С-образного типов с Zn покрытием и профили с ЗЭ и ЭДТ с ПП; при этом проблема НП характерна для всех этих профилей.

Наиболее характерными участками профиля, подверженными НП, являются наружные предугловые (44%, см. рис. 4.6) и предторцевые (31%) участки для профилей с Zn покрытием, также наружные угловые участки (66%) для профилей с ЛКП.

4.2.3. Дефекты поверхности профилей, механизм и основные факторы нарушения покрытия

Поверхность заготовки в результате изготовления профиля подвергается различным видам воздействия:

- контактными нагрузкам t ;
- растягивающим (сжимающим) деформациям e ;
- контактными нагрузкам t и деформациям e .

В зависимости от типа и величины воздействия на покрытия могут образовываться различные виды дефектов (табл. 4.5).

Таблица 4.4

Карта дефектов профилей

№	Характеристика профиля			Число переходов	Дефекты профиля			
	Тип (название) профиля и габаритные размеры	Толщина заготовки	Вид покрытия		Дефект покрытия			Другие дефекты
					Вид дефекта	Размеры, мм	Расположение на профиле (рис. 4.1, 4.2)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Швеллер 28х27	0,55	Zn	6	-			
2	Швеллер 30х30	2	Zn	4	П	4 3	Н-Пр-Пугл Н-Пр-Птор	-
3	Швеллер 100х40*	1,5	ЛКП	4	Р С	36 1,5	Н-Пр Н-Пр-Птор	-
4	Швеллер 30х12	2	Zn	6	П	3,5 1,2	Н-Пр-Пугл В-Кр-Угл	-
5	Швеллер 110х45	0,7	Zn	6	-			КВ
6	Швеллер 110х45	1,5	Zn	6	П	3	Н-Пр-Пугл	-
7	Швеллер 28х27*	0,55	ЛКП	6	-			
...	...	...	...	...	...	...	...	...
31	С-образный 20х38х10	2	Zn	6	П	4 1,5	Н-Пр-Пугл В-Кр-Угл	-
32	С-образный 145х45х13	0,7	Zn	6	-			-
33	С-образный 145х45х13	1,5	Zn	6	П	3	Н-Пр-Пугл	-
34	С-образный 60х27х5	0,6	Zn	6	-			-
35	С-образный 28х28х14*	1,5	ЛКП	4	Р Р	10 5	Н-Пр-Ср В-Кр-Угл	-
36	С-образный 40х20х8	1,5	Zn	6	Р	3	Н-Пр-Птор	КВ
37	С-образный 30х30х10*	0,6	ЛКП	6	-			
...	...	...	...	...	...	...	...	...
69	Сайдинг 265х12 (петельные эл-ты)	0,6	ЛКП	6	С С Р	1 1	Н-Пр-Птор В-Пр-Птор по отд. частям	КВ
70	Софит 271х13 (петельные эл-ты)	0,6	ЛКП	6	П Р	0,8	В-Кр-Угл по отд. частям	-
71	Прогон 17х20х4 (ЭДТ)	0,7	ЛКП	6	О С	1 0,7	В-Кр-Угл Н-К-Др	-
72	Стойка 37х7х12х3,7 (ЭДТ)	0,6	ЛКП	6	О	1	Н-Кр-Угл	КВ
73	Корыто 365х25х25х13	0,55	ЛКП	6	О	0,8	Н-Кр-Угл	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9
74	Стойка 86х12 (ЭДТ)*	2	Zn	6	П	1-4	в разных частях профиля	
75	Отлив 100х60 (ЭДТ)	0,6	ЛКП	6	Т	1,2	Н-Кр-Угл	В
76	Автофальц 278х25 (петельные эл-ты ЭДТ)	0,6	ЛКП	6	О П	0,8 0,7	Н-Кр-Угл В-Кр-Угл	В
77	Обрамл. 20х30х5х15	0,6	ЛКП	6	П	1	Н-Кр-Угл	Ф
78	Швеллер 35х20х15 (ЭДТ)	1,5	Zn	6	П	3	Н-Пр-Пугл	-
79	Профиль Н-образный 20х15 (ЭДТ)	0,6	ЛКП	6	О	0,9	Н-Кр-Угл	-
80	Трек нижний 54х7 (ЭДТ)	0,7	ЛКП	6	О	1	Н-Кр-Угл	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...
103	Уголок 30х30	2	Zn	6	-			-
104	Уголок 90х65	2	Zn	6	П	8 5 2,5	Н-Пр-Птор Н-Пр-Пугл В-Кр-Угл	-
105	Корыто 40х14	1	ЛКП	6	-			-

* - опробование проводили в качестве дополнительных исследований

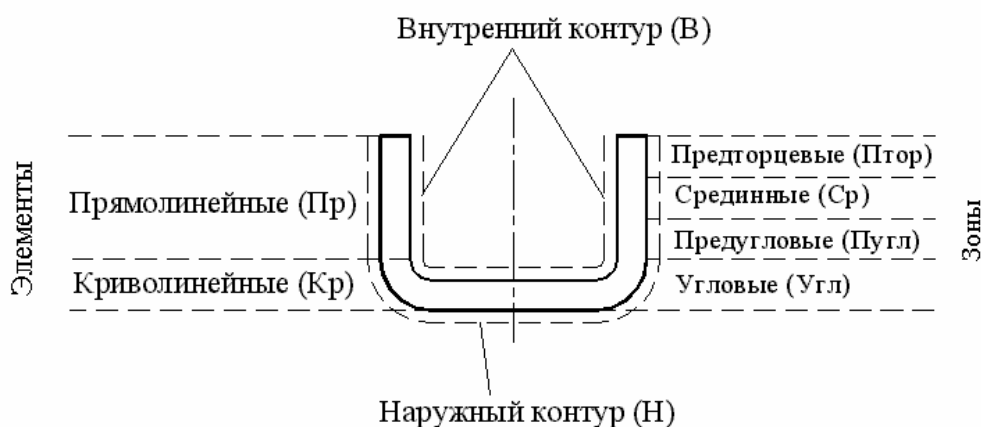


Рис. 4.1. Разделение участков профиля по контуру, элементам и зонам

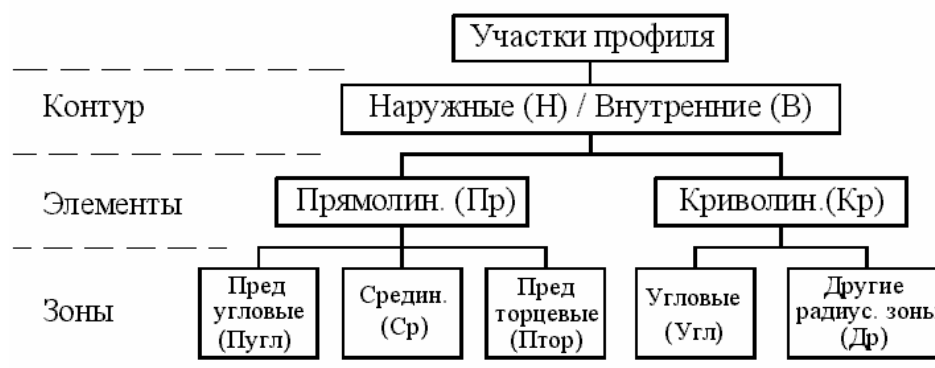


Рис. 4.2. Классификатор участков профиля.

Пример: Н-Пр-Пугл обозначает, что дефект НП расположен на наружном контуре профиля на прямолинейном элементе в предугловой зоне

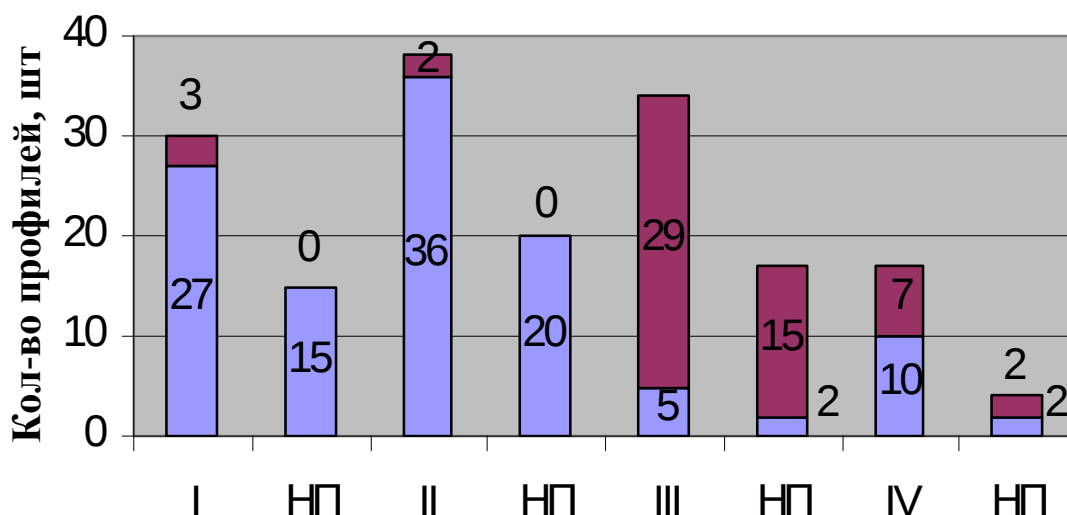
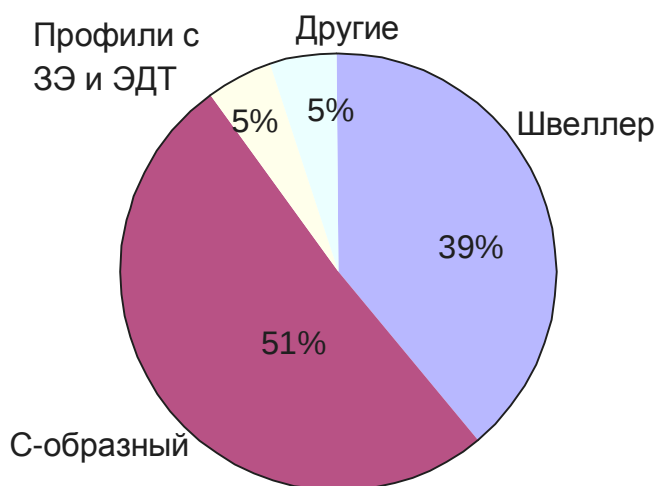
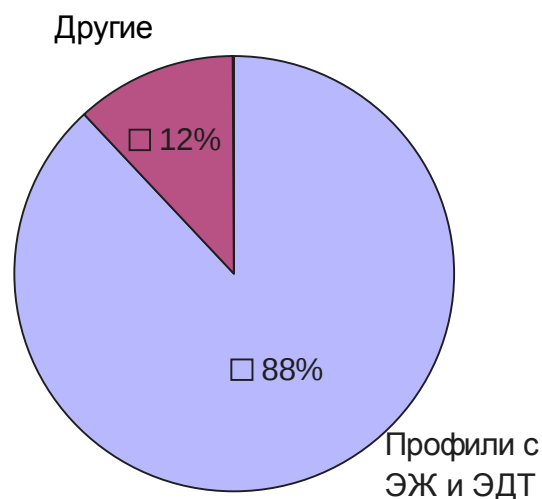


Рис. 4.3. Общее количество профилей и количество профилей с НП для следующих типов: I – швеллер; II – С-образный профиль; III – профили с ЗЭ и ЭДТ; IV – другие профили; НП количество профилей, подверженных нарушению покрытия; ■ – профили с ЛКП; ■ – профили с Zn покрытием



а



б

Рис.4.4. Удельная доля профилей различных типов, имеющих НП: а) профили с Zn покрытием; б) профили с ЛКП

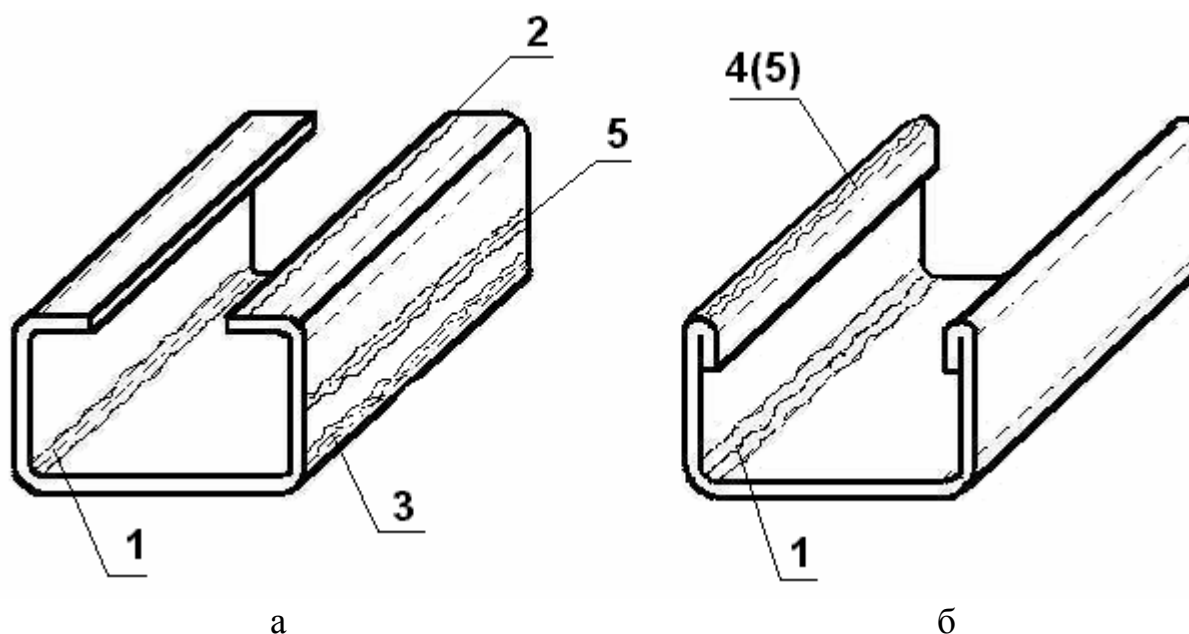


Рис. 4.5. Основные участки профиля, имеющие НП: а – профиль с Zn покрытием; б – профиль с ЛКП; 1- внутренние угловые участки; 2 – наружные предторцевые участки; 3 – наружные предугловые участки; 4 – наружные угловые участки; 5 – наружные срединные участки

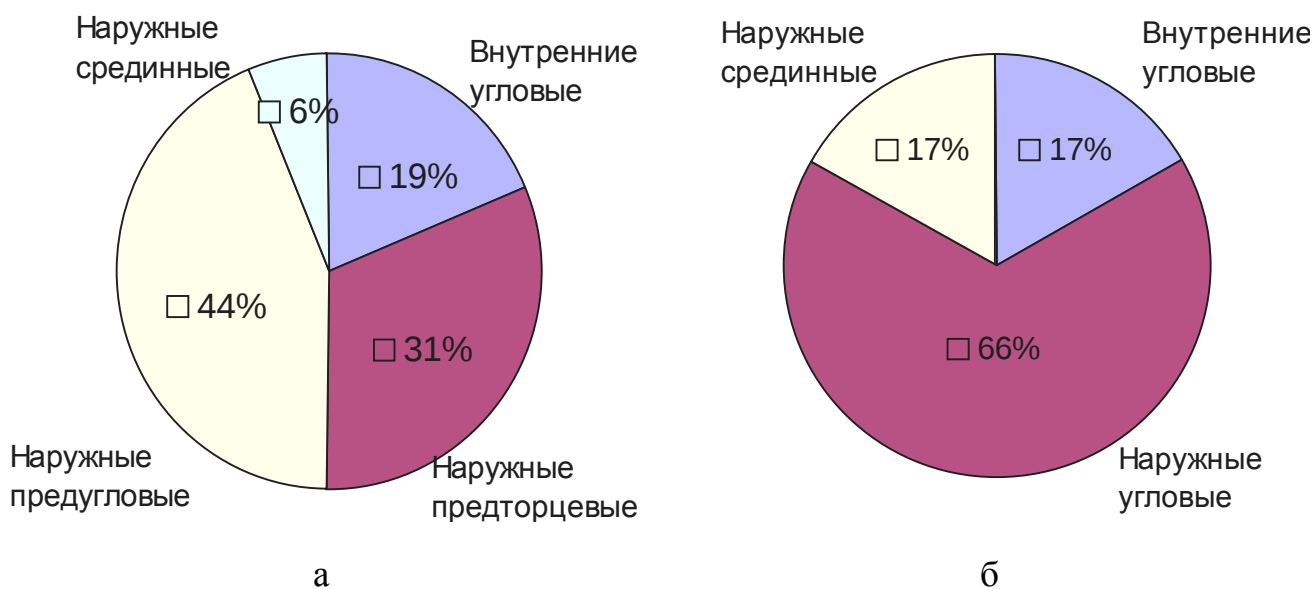


Рис. 4.6. Удельная доля участков профиля, имеющих НП: а) профили с Zn покрытием; б) профили с ЛКП.

На рис. 4.7 показаны условно общие виды дефектов. На рис. 4.8 представлены фотографии характерных дефектов покрытия.

Характерные дефекты и схема их образования
в зависимости от вида воздействия на покрытие

	Характерные дефекты	Схема образования*	Условие возникновения дефекта**
Приложение контактных нагрузок	Р, П, С	$P \rightarrow П \rightarrow C$	$t > [t]$
Создание растягивающих (сжимающих) деформаций при изгибе	Т, О (О)	$T \rightarrow O (O)$	$e > [e]$
Одновременное воздействие контактных нагрузок и деформаций	Т, О (О)	$T \rightarrow O (O)$	$t' > [t']$ или $e' > [e']$
	Р, П, С	$P \rightarrow П \rightarrow C$	

Примечание: * - образование дефектов при увеличении прилагаемых контактных нагрузок или деформаций

** – t и $[t]$ – соответственно контактное касательное напряжение и допустимое контактное касательное напряжение для покрытия;

e и $[e]$ – соответственно деформация покрытия при изгибе и допустимая деформация для покрытия;

t' и $[t']$ – соответственно контактное касательное напряжение и допустимое контактное касательное напряжение для покрытия при изгибе (e' и $[e']$ – соответственно деформация покрытия при изгибе и допустимая деформация для покрытия при контакте).

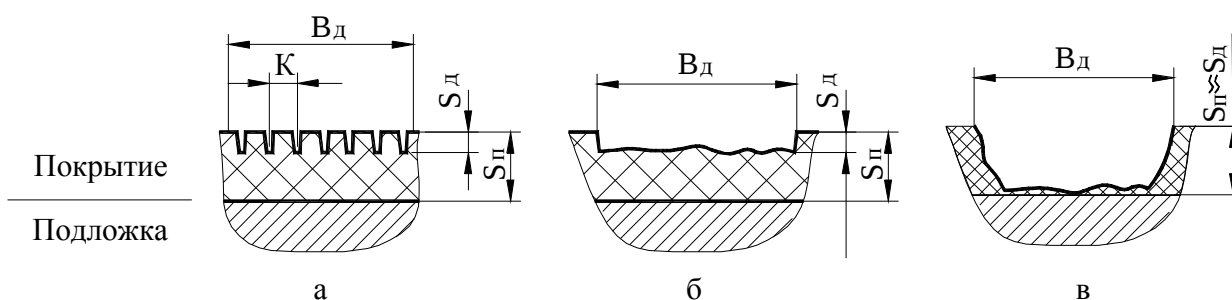


Рис. 4.7. Общий вид дефектов (условно) и характеристики дефектов покрытия на поверхности профиля: а – дефект в виде рисок и трещин, б – дефект потертости покрытия, в – дефект сдира и отслаивания покрытия; Вд – ширина дефекта по сечению профиля, мм; Sд – глубина проникновения дефекта, мм; Sп – исходная толщина покрытия, мм; К – расстояние между рисками (трещинами), мм



а



б



в



г

Рис. 4.8. Дефекты покрытия: а – риски; б – трещины; в – потертости; г – сдиры

В табл. 4.6 приведен механизм нарушения (отслоения и сдира) покрытия.

Таблица 4.6

Механизм нарушения покрытия

Механизм отслоения покрытия	
По когезионному типу	По адгезионному типу
1. Изгиб заготовки с покрытием; 2. Образование трещин (раковин) в верхних слоях покрытия на наружной части зоны сгиба; 3. Распространение трещин вглубь покрытия; 4. Проникновение трещин до нижнего слоя покрытия и увеличения количества трещин (раковин) и/или их объединение.	1. Изгиб заготовки с покрытием; 2. Смещение, отслоение части покрытия по адгезионному слою; 3. Увеличение количества смещений и отслоений; 4. Разрыв покрытия.
Механизм сдира покрытия	
1. Прижатие и сдвиг инструмента по заготовке с покрытием; 2. Упругое сжатие покрытия; 3. Образование канавки на поверхности покрытия; 4. Углубление канавки и сдир покрытия; 5. Углубление сдира покрытия.	

Отслоение покрытия происходит при изгибе заготовки в случае превышения допустимых растягивающих (сжимающих) деформаций для покрытия. Отслоение покрытия может происходить по адгезионному, когезионному и смешанному типу. Сдир покрытия возникает при превышении допустимых контактных сил, действующих со стороны формующего инструмента на покрытие.

По предварительному анализу проведенных исследований, возможность изготовления профилей с покрытием без дефекта зависит от:

- вида покрытия (адгезионной и когезионной прочности покрытия, прочности при изгибе);
- типа и размера сечения профиля (толщины и ширины элементов профиля, величин радиусовгиба профиля);
- формы и размера инструмента (типа и размеров калибра, величины радиусов на инструменте);
- технологических параметров процесса (величин углов подгибки и захода по переходам, наличие смазки);
- настройки оборудования и дополнительных устройств.

При этом из основных факторов, влияющих на НП можно выделить:
при наличии контакта с инструментом:

- адгезионная и когезионная прочность покрытия при контакте;
- геометрические характеристики профиля и инструмента (ширина, толщина элементов профиля, величина радиусов на инструменте и профиле);
- технологические углы подгибки и захода элементов профиля;

при возникновении растягивающих деформаций:

- прочность покрытия при изгибе;
- величины радиусовгиба уголкового профиля.

4.3. Определение геометрических параметров процесса

К геометрическим параметрам процесса относятся размеры и топология зоны контакта инструмента с заготовкой, углы захода торца профиля в роликовую пару и радиусыгиба уголкового профиля.

4.3.1. Определение зоны контакта инструмента с заготовкой

Были проведены эксперименты по определению смещения зоны контакта по полке профиля при взаимодействии с вертикальным буртом (его криволинейной части) в зависимости от угла подгибки и толщины исходной заготовки для профиля швеллерного типа. Что касается профилей другой конфигурации (С-образных, швеллерных с ЭДТ и др.), то данные зависимости можно будет распространить и на них с учетом коэффициента жесткости элементов профиля.

Основной искомой величиной было положение начала зоны контакта относительно торца профиля (величина Н) (рис. 2.1).

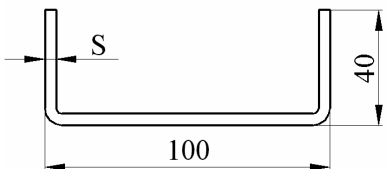
Исследование включало следующие этапы:

- заготовку прокатывали до последнего перехода и останавливали станок;
- на нижнюю поверхность заготовки между переходами наносили быстро-сохнущую краску марки НЦ;
- станок включали и прокатывали заготовку таким образом, чтобы заготовка с нанесенной краской оказалась в роликах;
- верхние ролики поднимали, извлекали заготовку и изучали зону контакта ролика с заготовкой по местам отсутствия (сдира) краски.

Высота сдира краски от торца профиля соответствует величине H . Замеры осуществлялись штангенциркулем с точностью до 0,2 мм. Объект исследования и варьируемые величины приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Варьируемые величины при проведении эксперимента

Эскиз сечения профиля	Угол подгибки α_k , град	Толщина S , мм
	20, 45, 60, 75, 90	0,7; 1; 1,2; 1,5

Эксперименты проводились на гибочно-прокатном станке ГПС-350М6 за 5 переходов на экспериментальной оснастке. В качестве материала применялась холоднокатаная сталь необходимой толщины. Замеры проводили троекратно. Экспериментальные данные обрабатывались в пакете Excel 97. Результаты испытания представлены на рис. 4.9, зоны отслаивания краски – на рис. 4.10.

Как показывает график и рисунки, высота сдира краски от торца профиля резко возрастает при увеличении угла подгибки полок профиля с 70° и более, а также при увеличении толщины исходной заготовки, но наибольшее смещение происходит при углах подгибки 90° . Смещение зоны контакта вызывает уменьшение плечагиба и приводит к увеличению действующей силы. Поэтому при углах подгибки 90° резко увеличивается вероятность нарушения покрытия (см. далее, рис. 4.12).

Экспериментальная модель (рис. 4.9) удовлетворительно согласуется с теоретической моделью (рис. 3.5); отличие на первых переходах связано с допущениями, принятыми при разработке теоретической модели, в частности, не учитывались радиусы скругления буртов. Величины отклонений данных модели от экспериментальных результатов не превышают 15 – 20%.

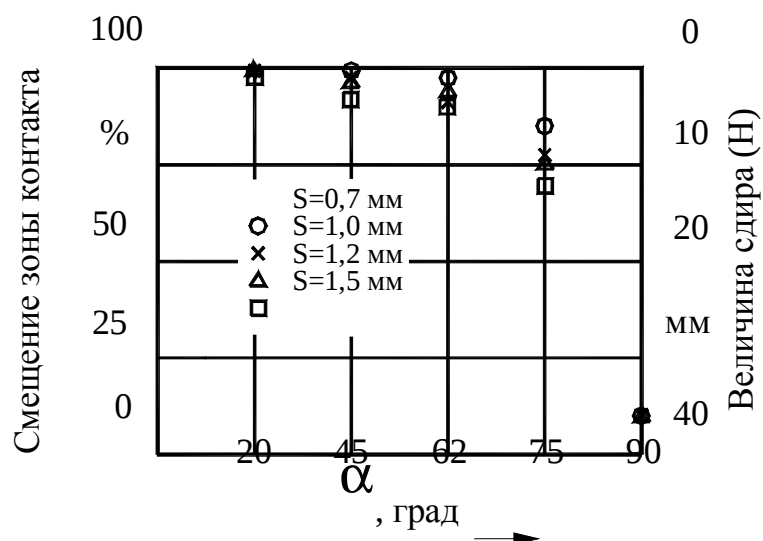
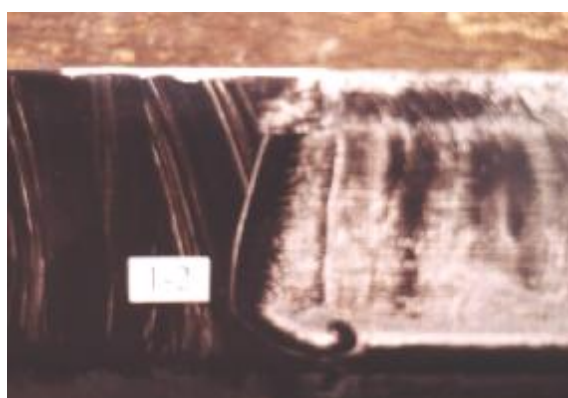


Рис. 4.9. Зависимость высоты сдира краски H от угла подгибки полки α и толщины металла S



а



б



в



г

Рис. 4.10. Зоны отсутствия краски при заневоленной полосе во 2-3-4-5 переходах при толщине заготовки 1,0 мм

4.3.2. Определение углов захода торца профиля и радиусовгиба угловых зон по переходам

Изменение угла захода изменяет геометрию контакта (прямолинейная полка становится криволинейной), что приводит к уменьшению контактных напряжений, действующих на заготовку. Поэтому его величина учитывается

при теоретическом расчете в коэффициенте K_1 (см. п. 2.4). Величина угла захода в наибольшей мере зависит от формы подгибаемых элементов профиля, толщины подложки, угла подгибки, разности углов подгибки.

Угол захода торца профиля измеряется угломером при заневоленной полосе непосредственно перед буртом (рис. 4.11).

Значительные углы захода (6-8 град) как правило связаны с повышенными контактными силами, действующими со стороны буртов, что может проявляться в образовании рисок и потертостей на поверхности профиля (рис.4.12).

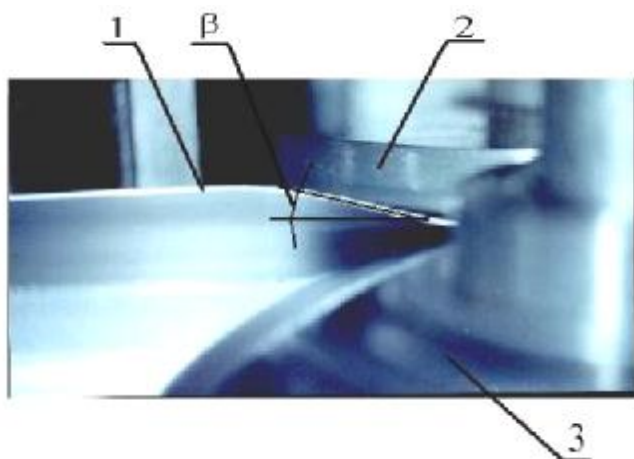


Рис. 4.11. Заход торца профиля в роликовой калибр: 1 – торец профиля; 2 – вертикальный бурт нижнего ролика; 3 – верхний ролик;



Рис. 4.12. Наличие следа на поверхности заготовки при подгибке на 90° при предельных режимах подгибки ($\Delta\alpha = 90^\circ$)

На рис. 4.13-4.14 приведены углы захода торца профиля для профиля швеллерного типа. Для профилей других типов угол захода пересчитывается с учетом коэффициента жесткости или формы [144].

Определение радиусагиба уголкового зоны профиля по переходам необходимо для более точного анализа и расчета геометрии профиля по переходам. На рис. 4.15 представлены зависимости наружного радиусагиба от типа профиля по переходам при использовании постоянных формующих радиусов на роликах (характерно для МИД). Как видно из графиков, в любом случае изменение радиусовгиба профиля происходит постепенно, а не сразу, как предполагалось. При этом наиболее опасным с точки зрения НП является первый переход, поскольку в нем происходит контакт прямолинейной части заготовки с участком ролика, радиус скругления которого при МИД принимается равным толщине заготовки. Согласно предварительным исследованиям (по карте дефектов), это вторая характерная зона на роликовом калибре, после бурта, где происходит НП.

Нужно отметить, что при формовке профилей с малой шириной полок меньше 10S (таблица 4.3, №3 размер d) вместо плоского участка образуется радиусный участок [145], изменение величины которого приведено на рис. 4.15. б. При проработке профиля на технологичность, данное обстоятельство следует принимать во внимание.

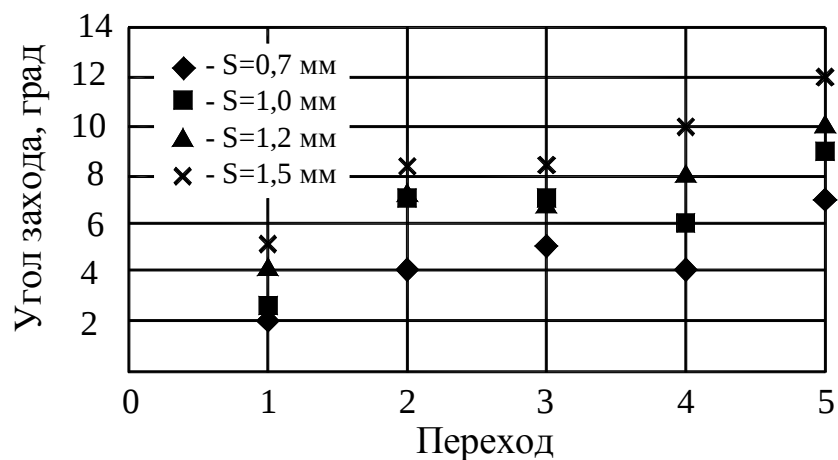


Рис. 4.13. Зависимость величины угла захода b для профиля швеллер 100x40 по переходам в зависимости от толщины подложки S

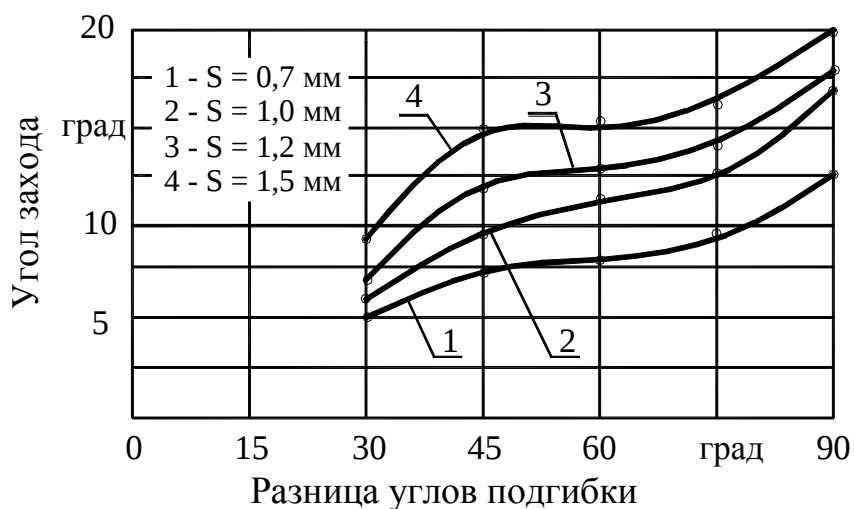


Рис. 4.14. Зависимость величины угла захода b для профиля швеллер 80x10 от разности углов подгибки ($\Delta\alpha$) при подгибке на угол 90° и толщины подложки S

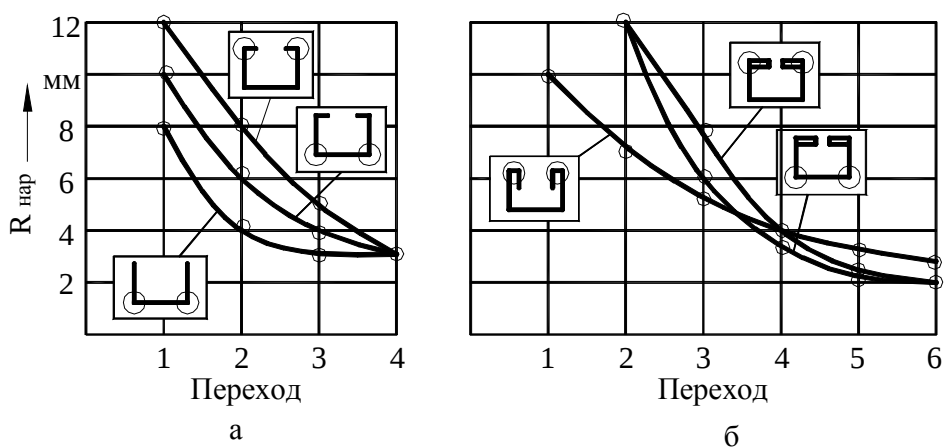


Рис. 4.15. Изменение величины наружного радиусагиба профиля за 4 (а) и 6 (б) переходов для различных видов профилей

Как показали исследования геометрических и технологических параметров, наиболее подвержены НП элементы профиля, подгибаемые на угол 90^0 , и участки профиля, имеющие контакт с формующими частями роликов, особенно на первом переходе.

4.4. Определение предельных геометрических параметров профиля при изготовлении из материала с полиэфировым покрытием

К геометрическим параметрам профиля относят толщину и ширину элементов профиля, радиусыгиба профиля. Наибольшая вероятность возникновения НП возникает при увеличении толщины заготовки, уменьшении высоты полки и радиусагиба профиля.

4.4.1. Определение максимальной толщины исходной заготовки с ПЭ покрытием

Для определения максимальной толщины заготовки при формообразовании в роликах была проведена серия экспериментов на станке ГПС-300М4. Исследования проводили на профилях швеллерного и С-образного типов (рис. 4.16), для чего было изготовлено по 3 комплекта роликовой оснастки для обоих типов профилей, где каждый из комплектов был рассчитан на определенную толщину подложки, соответствующей 1,0; 1,5; 2,0 мм. Для каждого опыта использовали не менее двух заготовок. Состав опыта приведен в табл. 4.8.

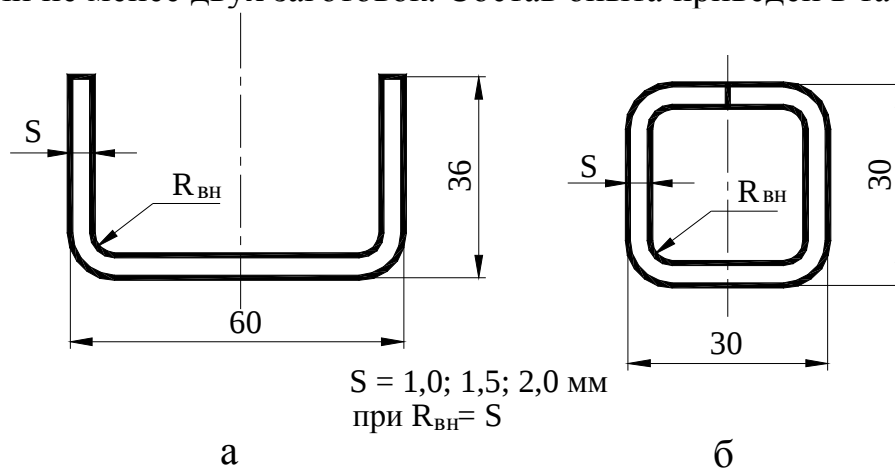


Рис. 4.16. Экспериментальные профили швеллерного (а) и С-образного (б) типов

Таблица 4.8

Исходные данные для проведения эксперимента

	S, мм	α , град	$\Delta\alpha$, град
Верхний уровень	2,0	90	20
Нижний уровень	1,0	30	10
Интервал варьирования	0,5	20	10

Углы подгибки (α) элементов профиля следующие:

- для швеллера 30-50-70-90°;
- для С-образного 30-50-70-90 (стенка профиля);
- 60-100-140-180 (полка профиля).

Разность углов подгибки $\Delta\alpha = 20^\circ$ соответствует разности угла подгибки профиля между переходами; для получения разности углов подгибки $\Delta\alpha = 10^\circ$ использовались дополнительные фторопластовые проводки между переходами, обеспечивающие предварительную подгибку элементов профиля.

В качестве критериев оценки использовалась балльная система оценки декоративных и защитных свойств, приведенная ранее (см. п. 2.2).

На рис. 4.17 представлены результаты экспериментальных исследований.

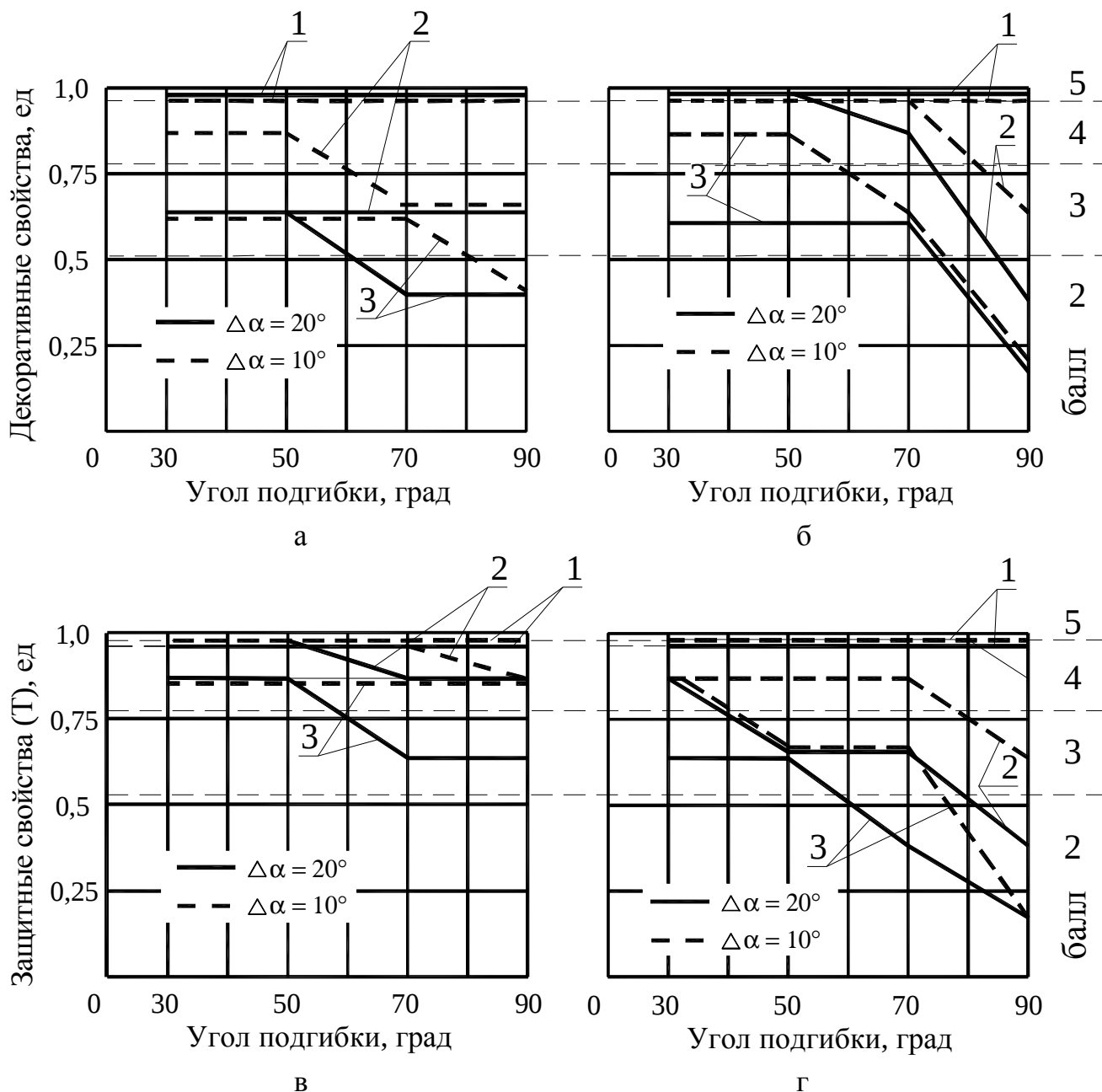


Рис. 4.17. Изменение декоративных (а, б) и защитных (в, г) свойств ПЭ покрытия на поверхности профилей швеллерного (а, в) и С-образного (б, г) типа в зависимости от угла подгибки для следующих толщин: 1 – $S = 1,0$ мм; 2 – $S = 1,5$ мм; 3 – $S = 2,0$ мм

В табл. 4.9 приведены рекомендации по возможности применения заготовок с различной толщиной подложки с ПЭ покрытием в зависимости от назначения профиля.

Таблица 4.9

Максимальная толщина подложки с ПЭ покрытием
в зависимости от назначения профиля

Назначение профиля	Дополнительные требования	Тип профиля			
		Швеллер		С-образный	
		Декоративные свойства	Защитные свойства	Декоративные свойства	Защитные свойства
Декоративное	Особые	1,0	1,5 (2*)	1,0	1,0 (1,5*)
	Средние	1,0	2,0	1,0	1,0 (1,5*)
	Низкие	1,5	2,0	1,0 (1,5*)	1,0-1,5
Защитное	Особые	1,0	1,0	1,0	1,0*
	Средние	1,5	1,5 (2,0*)	1,0	1,0
	Низкие	1,5	2,0	1,0-1,5	1,0 (1,5*)
Защитно-декоративное	Особые	1,0	1,0	1,0	1,0*
	Средние	1,0	1,5 (2*)	1,0	1,0
	Низкие	1,5	2,0	1,0 (1,5*)	1,0 (1,5*)

* – при $\Delta\alpha = 10^0$

Как видно на рис. 4.17, уменьшение разности углов подгибки (с 20^0 до 10^0) дает эффект на первых трех переходах и имеет малое влияние на последнем переходе, т.е. при подгибке полок (стенок) профиля на 90^0 .

Значения толщин, указанных в табл. 4.9, могут изменяться как в сторону увеличения так и в сторону уменьшения. Использование дополнительных проводок, увеличение радиусов скругления на буртах, использование эффективной смазки позволяет увеличить исходную толщину заготовки.

4.4.2. Определение предельных размеров полок профиля при гибке на 90^0

С целью установления наличия дефекта нарушения покрытия в зависимости от геометрических параметров профиля была проведена серия экспериментов с использованием методики математического планирования [146, 147].

Как отмечено в пункте 4.3.1, наиболее опасным с точки зрения сохранения покрытия, является переход, в котором углы подгибки соответствуют 90^0 . Поэтому при определении максимальной высоты полки рассмотрению подлежал только последний переход при углах подгибки полки на 90^0 .

В качестве изменяемых факторов были приняты – ширина полки B , ее толщина S и разность углов подгибки $\Delta\alpha$. Величина скругления бурта принята равной 3 мм. Исследование проводили на основе полнофакторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^3 , при этом модель процесса можно представить функцией отклика:

$$y = f(b, s, \Delta a).$$

Уровни факторов и интервалы варьирования выбраны по результатам предварительных исследований и приведены в табл. 4.10. Схема эксперимента приведена на рис. 4.18.

Таблица 4.10

Уровни факторов и интервалы варьирования

Значения факторов	X ₁	X ₂	X ₃
	B, мм	S, мм	Δa , °
Основной уровень (0)	7	1,0	60
Интервал варьирования	3	0,5	30
Нижний уровень(-1)	4	0,5	30
Верхний уровень(+1)	10	1,5	90

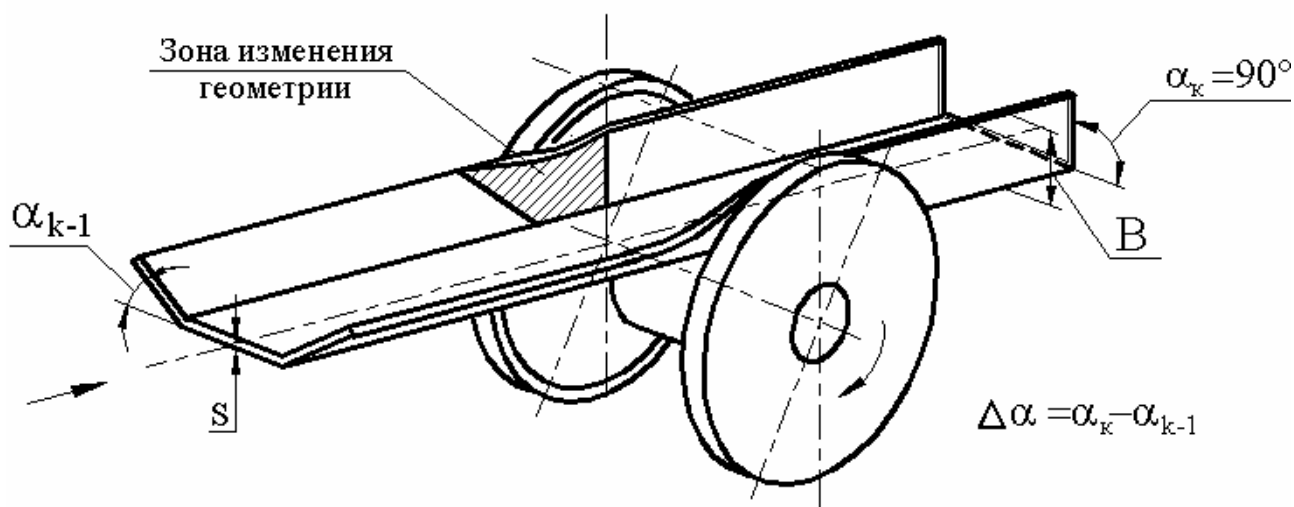


Рис. 4.18. Определение минимальной высоты полки при подгибке на 90°

В качестве исходной заготовки использовали ленту из стали 08кп с ПЭ покрытием лицевой стороны (№1, №6, №7).

Экспериментальные исследования проводили на станке ГПС-300М4. В эксперименте использовали 9 пар роликов по 3 пары на каждую высоту полки, с последующей пригонкой под необходимую толщину заготовки. Заготовки (по пять образцов на каждый опыт) подвергали профилированию за 1-3 перехода (в зависимости от условий эксперимента) и оценивали состояние покрытия по декоративным свойствам согласно ранее принятой балльной системе (см. табл. 2.4). Определяли среднее арифметическое значение y_{cp} и дисперсию (S^2) каждого опыта. Результаты заносили в табл.4.11.

План типа 2^3 позволяет получить отдельные оценки для коэффициентов регрессии вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (4.1)$$

Коэффициенты регрессии определяли по известным формулам теории полнофакторного эксперимента [146, 147]. В результате расчетов получены средние значения коэффициентов:

$$b_0=3,1; b_1=-0,45; b_2=-0,85; b_3=-0,4; b_{12}=0,2; b_{13}=-0,05; b_{23}=0,04; b_{123}=0,003.$$

В процессе расчета проверяли дисперсию по критерию Кохрена, адекватность модели по критерию Фишера, рассчитывали доверительный интервал $\Delta b_i = \pm 0,15$ и исключали коэффициенты меньше данного значения.

Таблица 4.11

План и результаты ПФЭ 2^3

№	Основные столбцы			Вспомогательные столбцы				Выход процесса						Дисперсия
	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_2X_3	X_1X_3	$X_1X_2X_3$	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_{cp}	s^2
	b	s	α											
1	-	-	-	+	+	+	-	5	5	5	5	5	5	0
2	+	-	-	-	+	-	+	4	3	4	4	4	3,8	0,2
3	-	+	-	-	-	+	+	3	3	3	2	3	2,8	0,2
4	+	+	-	+	-	-	-	3	2	2	3	2	2,4	0,3
5	-	-	+	+	-	-	+	4	5	4	4	4	4,2	0,2
6	+	-	+	-	-	+	-	3	3	3	3	2	2,8	0,2
7	-	+	+	-	+	-	-	3	2	2	2	2	2,2	0,2
8	+	+	+	+	+	+	+	2	2	1	1	2	1,6	0,3

В результате получаем следующую зависимость:

$$\mathcal{E} = 3,1 - 0,45x_1 - 0,85x_2 - 0,4x_3 + 0,2x_1x_2 \quad (4.2)$$

Данное уравнение характеризует модель зависимости дефекта НП (в баллах) от выбранных факторов x_1, x_2, x_3 .

Из уравнения, в указанных диапазонах изменения факторов, видно, что с увеличением $B, S, \Delta\alpha$ НП увеличивается (балл оценки уменьшается).

Зависимость $y = f(B, S, \Delta\alpha)$, полученная из уравнения (4.2), удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными для исследуемого типоразмера профиля, табл. 4.3, №1

Используя формулу (4.2), была построена номограмма (рис. 4.19).

По номограмме можно определить значение балла по остаточным декоративным свойствам покрытия в зависимости от высоты полки B , толщины исходного материала S и разности углов подгибки $\Delta\alpha$.

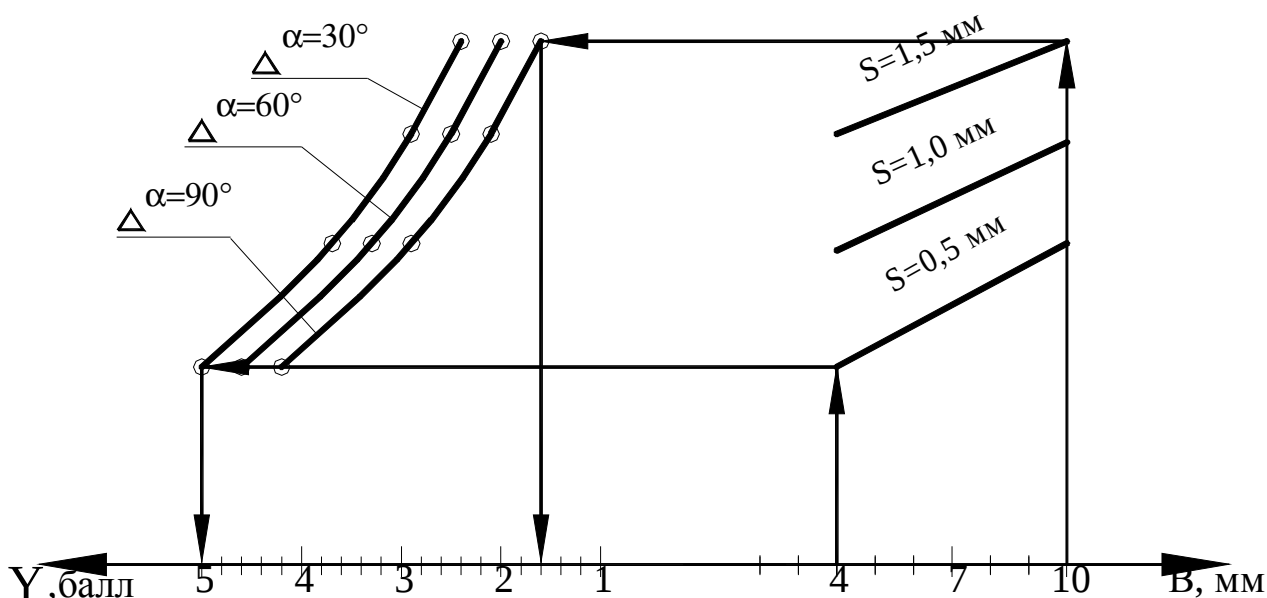


Рис. 4.19. Номограмма для определения величины балла при оценке декоративных свойств ПЭ покрытия при гибке на 90°

Данные результаты можно распространить и на другие типы профилей, где элементы профиля в процессе подгибки имеют угол 90° (промежуточные переходы для С-образного типа, профили с ЭДТ и др.).

4.5. Определение минимальных формирующих радиусов на первом переходе

В результате формовки профиля на первом переходе происходит контакт плоского участка заготовки будущей уголковой зоны профиля с формирующими криволинейными зонами ролика, причем, величины радиусов скругления ролика при МИД, как правило, малы, что и обосновывает рассмотрение только первого перехода, как наиболее опасного с точки зрения НП по внутренним уголковым зонам профиля.

Для определения минимальных радиусов при формовке профиля и установления параметров НП были проведены серии экспериментов на станке ГПС-300М4.

Методика эксперимента аналогична приведенной ранее методике п. 4.4.2.

В качестве изменяемых факторов были приняты величина радиуса скругления формирующей части инструмента R и толщина исходной заготовки S для различных марок материала. Планирование и осуществление эксперимента проводили на основе ПФЭ типа 2^2 для 6 видов материала: Ст-Zn-гор (№12), Ст-Zn-эл (№14), Ст-ПЭ (№1, №3), Ст-Пл (№10), Ал-Al (№15).

Модель процесса представлена функцией отклика $y = f(R, s)$ для различных марок материала.

Уровни факторов и интервалы варьирования выбраны по результатам предварительного анализа и приведены в табл. 4.12. Схема эксперимента приведена на рис. 4.20.

Таблица 4.12

Уровни факторов и интервалы варьирования

Значения факторов	X_1	X_2	Исследуемый материал
	R, мм	S, мм	
Основной уровень (0)	1,0	1,0	Ст-Zn-гор (№12), Ст-Zn-эл (№14), Ст-ПЭ (№1, №3), Ст-Пл (№10), Ал-Ал (№15)
Интервал варьирования	0,5	0,5	
Нижний уровень(-1)	0,5	0,5	
Верхний уровень(+1)	1,5	1,5	

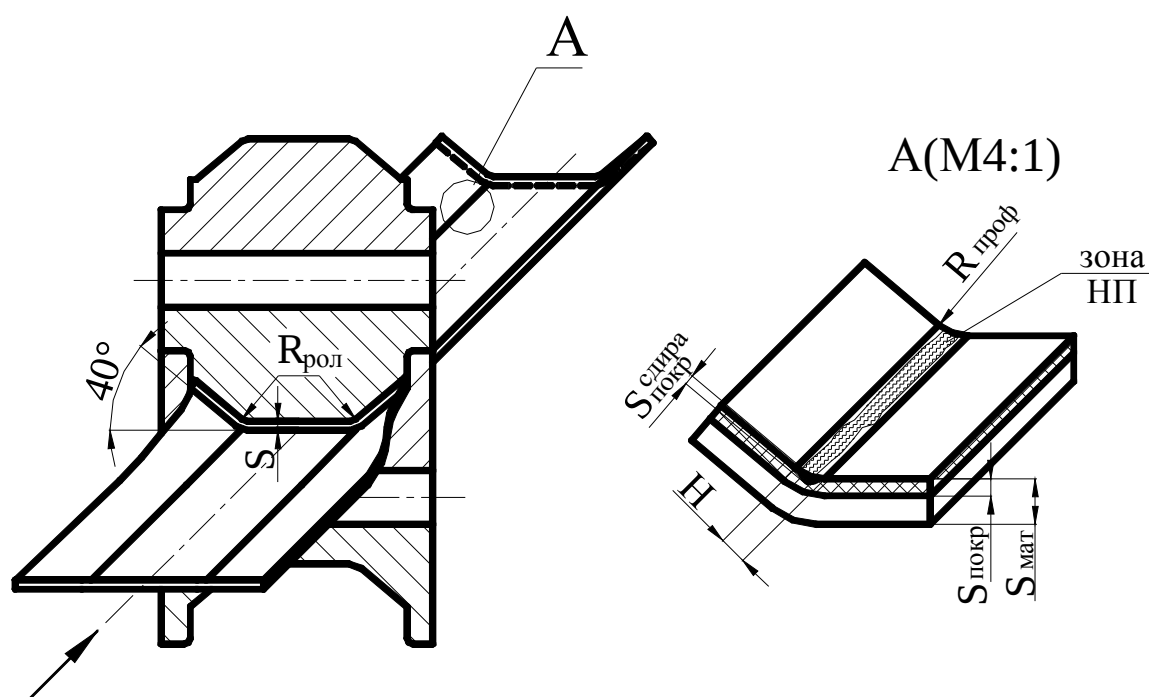


Рис. 4.20. Схема взаимодействия заготовки с криволинейной частью верхнего ролика и контролируемые параметры

В эксперименте использовали первый переход профиля швеллерного типа размером 30x20x0,6 мм с различным радиусом криволинейной части верхнего ролика при зазоре калибра, равным толщине заготовки.

Заготовки (по 5 образцов на каждый опыт) подвергали формовке при расположении исследуемым покрытием к верхнему ролику. После каждого опыта определяли толщину покрытия, средние значения толщины (y_{cp}) и дисперсии (s^2). Результаты заносили в табл. 4.13.

Таблица 4.13

План и результаты ПФЭ 2²

№	Марка материала	Основные и вспомогательные столбцы			Выход процесса						Дисперс.
		X ₁	X ₂	X ₁ X ₂	y ₁	y	y ₃	y ₄	y ₅	y _{ср}	s ²
		R	S								
1	Ст-Zn-гор (№12)	-	-	+	25	26	25	26	25	25,4	0,3
2		+	-	-	35	35	32	32	32	33,2	2,7
3		-	+	-	17	21	17	17	17	17,8	3,2
4		+	+	+	30	30	26	26	26	27,6	4,8
5	Ст-Zn-эл (№14)	-	-	+	0	0	0	0	0	0	0
6		+	-	-	1,2	1,2	1,5	1,7	1,5	1,4	0,05
7		-	+	-	0	0	0	0	0	0	0
8		+	+	+	0	0	0	0	0	0	0
9	Ст-ПЭ (№1)	-	-	+	12	13	11	13	14	12,6	1,3
10		+	-	-	14	17	16	15	14	15,2	1,7
11		-	+	-	6	6	5	5	6	5,6	0,3
12		+	+	+	12	12	11	11	13	11,8	0,7
13	Ст-ПЭ (№3)	-	-	+	9	7	8	7	8	7,8	0,7
14		+	-	-	16	15	17	13	15	15,2	2,2
15		-	+	-	2,5	2	2	1,5	2	2	0,13
16		+	+	+	8	8	9	9	9	8,6	0,3
17	Ст-Пл (№10)	-	-	+	100	103	100	105	103	102,2	4,7
18		+	-	-	115	120	117	119	116	117,4	4,3
19		-	+	-	91	90	89	89	91	90	1
20		+	+	+	105	105	112	108	108	107,6	8,3
21	Ал-Ал (№15)	-	-	+	34	34	31	31	31	32,2	2,7
22		+	-	-	46	47	46	43	46	45,6	2,3
23		-	+	-	12	13	12	13	14	12,8	0,7
24		+	+	+	35	34	32	34	34	33,8	1,2

В результате получены следующие зависимости:

$$\begin{aligned}
 \text{€1} &= 26 - 3,3x_1 + 4,4x_2 \quad \text{Ст-Zn-гор (№12),} \\
 \text{€2} &= 0,35 - 0,35x_1 + 0,35x_2 - 0,35x_1x_2 \quad \text{Ст-Zn-эл (№14),} \\
 \text{€3} &= 11,3 - 2,6x_1 + 2,2x_2 + 0,9x_1x_2 \quad \text{Ст-ПЭ (№1),} \\
 \text{€4} &= 8,4 - 3,1x_1 + 3,5x_2 \quad \text{Ст-ПЭ (№3),} \\
 \text{€5} &= 104,3 - 5,5x_1 + 8,2x_2 \quad \text{Ст-Пл (№10),} \\
 \text{€6} &= 31,1 - 7,8x_1 + 8,6x_2 + 1,9x_1x_2 \quad \text{Ал-Ал (№15).}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

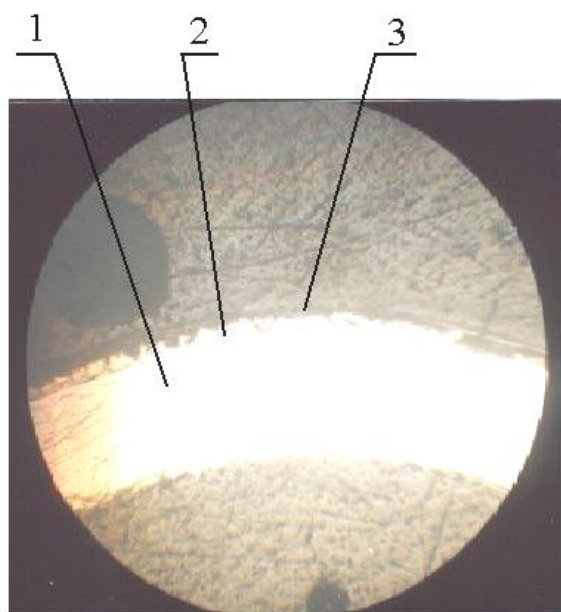
В выбранных диапазонах изменения факторов из уравнений (4.3) видно, что с увеличением S и уменьшением R величина сдвиг увеличивается.

По формулам (4.3) была построена номограмма (рис 4.23), позволяющая определить величину сдира покрытия на первом переходе в зависимости от величины радиуса криволинейной части ролика R и толщины исходного материала для различных покрытий, или же, позволяющая определить предельные параметры (R и S) при заданной величине сдира покрытия в зависимости от требований, предъявляемых к профилю (см. табл. 2.5).

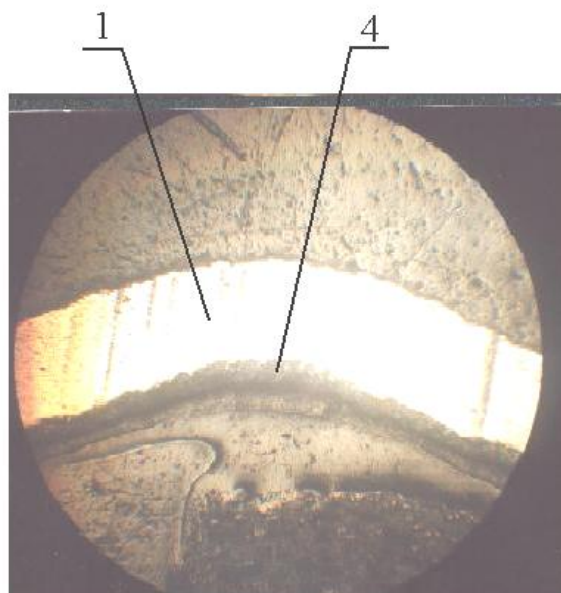
Далее образцы изучались на микроскопе (рис. 4.21), по методике, аналогичной той, что приведена в (п. 2.5). В результате, выявлено утолщение покрытия по внутренней зоне сгиба (рис. 4.22) для покрытий №12, №10, № 15 при радиусе формирующей части ролика 1,5 мм, что говорит о их наибольшей стойкости (среди испытуемых покрытий) к контактным нагрузкам, действующих совместно с деформациями изгиба.



Рис. 4.21. Исследуемые образцы после прокатки через первый переход



а



б

Рис. 4.22. Изгиб стальной заготовки с ПУ покрытием (а) на наружной зоне сгиба (увеличение $18^{\times}$) и с Пл покрытием (б) на внутренней стороне зона сгиба (увеличение $18^{\times}$): 1 – подложка; 2 – цинковое покрытие; 3 – утонение покрытия в зоне сгиба; 4 – утолщение покрытия в зоне сгиба.

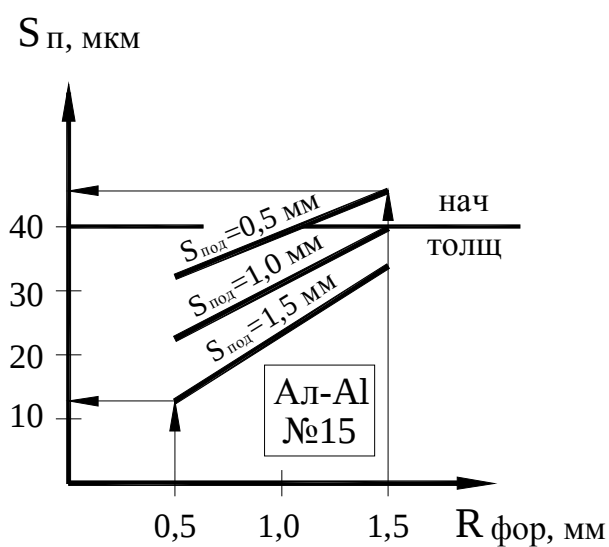
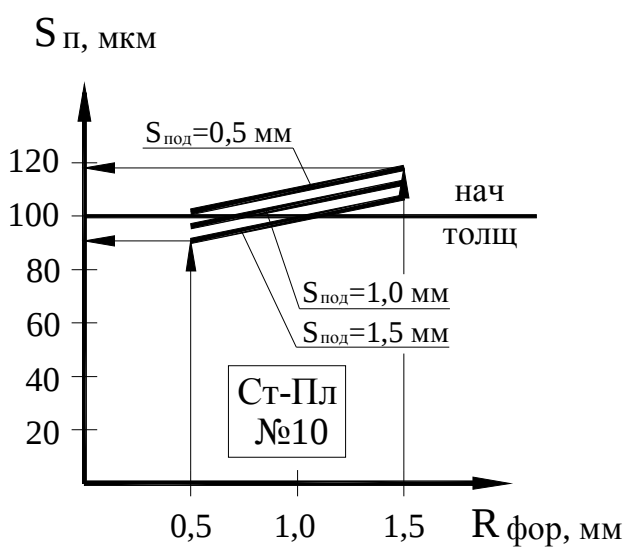
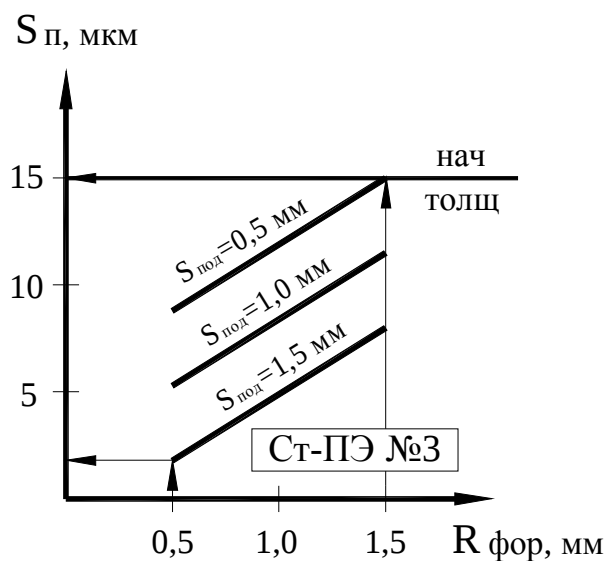
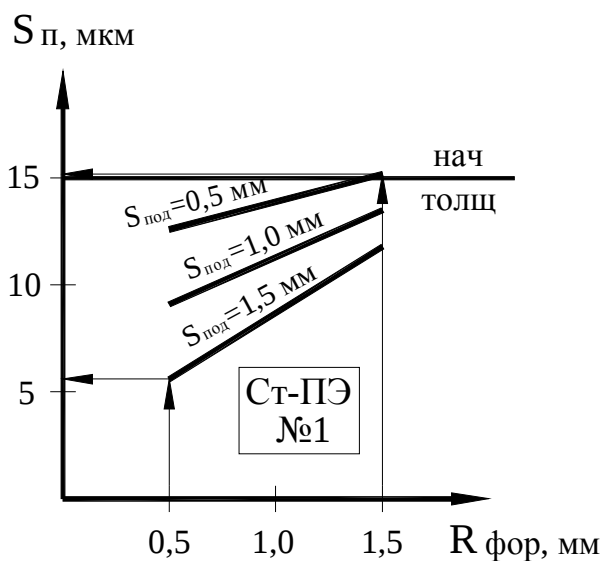
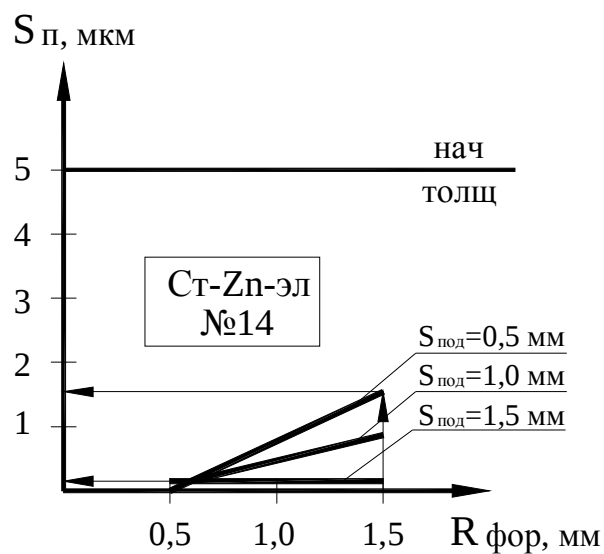
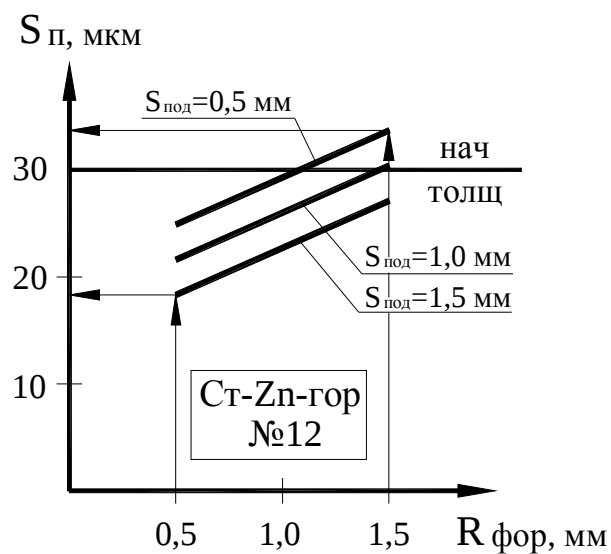


Рис. 4.23. Номограмма для определения толщины покрытия по внутренней зоне сгиба уголкового контакта с формирующим радиусом инструмента

Выводы

1. Фиксация результатов технологической обработки профилей в карте дефектов и их статистическая обработка позволили установить, что проявлению дефекта НП наиболее подвержены профили сложной конфигурации с ЭЖ при толщине подложки 0,5 – 1,0 мм и профили швеллерного и С-образного типов с толщиной подложки 1,5 – 2,5 мм. По составленной карте дефектов установлено, что наиболее характерными участками профиля, подверженными НП, являются наружные предугловые и предторцевые участки для профилей с цинковым покрытием и наружные угловые участки для профилей с полимерным покрытием.

2. Величина зоны контакта для профиля швеллерного типа с точностью до 20% совпадает с теоретической моделью.

3. Установлено, что основными дефектами нарушения покрытия являются: при воздействии деформаций изгиба – трещины и отслоение покрытия; при воздействии контактных сил – риски, потертости, сдиры покрытия.

4. Экспериментально установлены зависимости образования дефекта нарушения покрытия:

- на наружной стороне профиля швеллерного и С-образного типа из заготовки с ПЭ покрытием в зависимости от толщины исходной заготовки, угла подгибки и разности углов подгибки;

- на наружной стороне полки профиля из заготовки с ПЭ покрытием при подгибке на 90 град. в зависимости от высоты полки, толщины исходной заготовки и разности углов подгибки;

- на внутренней стороне зоны сгиба профиля при формовке на первом переходе от толщины исходной заготовки, величины формирующего радиуса ролика для материала с четырьмя различными видами покрытия.

Построены соответствующие номограммы. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами показало сходимость результатов в пределах 15 – 20%.

ГЛАВА 5

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЕМ

5.1. Разработка технологических схем

5.1.1. Проработка профиля на технологичность

Для разработки технологии важным является форма профиля, параметры его поперечного сечения, материал, требования к качеству профиля. Общие технологические требования к конструкции деталей, подлежащих изготовлению МИД, следующие:

- механические свойства листового материала должны обладать временным сопротивлением разрыву до 390 МПа, относительное удлинение должно быть не менее 6%;
- необходимо стремиться к снижению металлоемкости конструкции детали за счет применения ребер жесткости, отбортовок и т.п.;
- необходимо уменьшать ассортимент применяемых толщин листового материала (предпочтительный ряд толщин: 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5 мм);
- необходимо учитывать, что конструкция профиля открытого типа более предпочтительна, чем конструкция закрытого и полужакрытого типа;
- допуски на размеры поперечного сечения профилированных деталей должны соответствовать точности процесса профилирования (10 – 14-й kvalitet). Допуск на длину детали нецелесообразно назначать менее ± 2 мм.

При изготовлении профилей из материала с покрытием 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 (п. 2.3);
- минимально допустимую величину отбортовок (малых полок) следует выбирать в зависимости от вида покрытия (п. 4.4) [148];
- толщину заготовки следует выбирать из ряда предпочтительных толщин.

5.1.2. Расчет ширины заготовки

При расчете профилей швеллерного и С-образного сечения ширину исходной заготовки при МИД определяют по длине нейтрального слоя, который не подвергается деформации при изгибе. Для этого сечение профиля разбивают на прямолинейные и криволинейные участки, определяют нейтральную линию и суммируют длину всех участков (рис. 5.1).

Длина нейтрального слоя прямолинейного участка равна длине самого участка. Длина нейтрального слоя криволинейного участка определяется так:

$$B_i^{крив} = \left(R_i^{крив} + \frac{S}{2} \right) \cdot a_i \quad (5.1)$$

где $R_i^{крив}$ – внутренний радиусгиба профиля i -ой уголковой зоны, мм;

S – толщина профиля, мм;

a_i – уголгиба i -ой уголковой зоны профиля, рад.

Общая длина развертки профиля будет определяться формулой:

$$B_{заг} = \sum_{j=1}^n (B_j^{прям}) + \sum_{k=1}^m (B_k^{крив}) \quad (5.2)$$

где $\sum_{j=1}^n (B_j^{прям})$ – сумма длин прямолинейных участков;

$\sum_{k=1}^m (B_k^{крив})$ – сумма длин криволинейных участков.

Что касается профилей со сложной конфигурацией, например, профилей с ЭЖ (ЭДТ, рифт, петельный элемент) данная методика также пригодна для предварительной оценки ширины заготовки профилей с такими элементами. Например, на ЭДТ значительного смещения нейтрального слоя не происходит в связи с наличием сил сжатия при формовке. Исключением является получение рифтов высотой менее 2 толщин металла, которые формуются вытяжкой металла из соседних зон. В таких случаях расчет ширины заготовки осуществляют как для профиля без рифтов.

5.1.3 Выбор количества переходов

Выбор количества переходов является первостепенной задачей при разработке технологии по МИД, поскольку именно минимально возможное количество переходов обеспечивает преимущества данного метода.

В табл. 5.1 приведено количество переходов и практические углы подгибки для типовых профилей. Углы подгибки, указанные в таблице, применяются при разработке технологии в ОАО “УлНИАТ”.

5.1.4. Выбор системы формовки уголковых зон

Выбор системы формовки уголковой зоны профилей с покрытием отличается от систем формовки аналогичных профилей без покрытия. При этом выбор системы формовки в большей степени зависит от прочностных свойств покрытия. При МИД система формовки характеризуется гибкой по кривой посто-

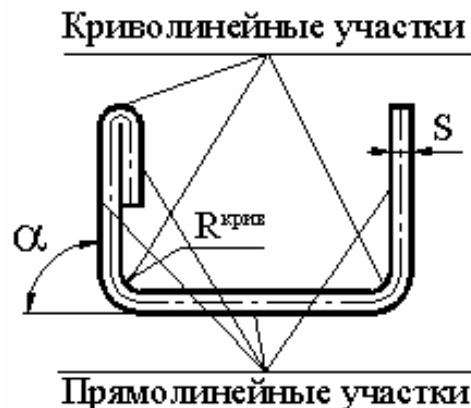
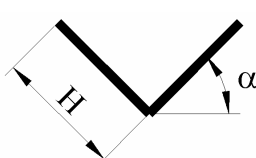
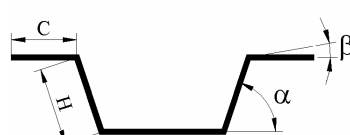
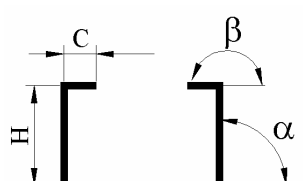
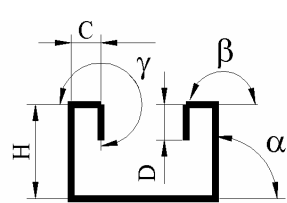
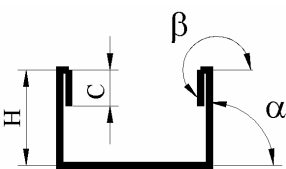


Рис. 5.1. Расчет ширины заготовки

Таблица 5.1

Технологические углы подгибки для различных профилей

	S, мм	H, мм	Кол. пер	Углы подгибки по переходам, град		
1	2	3	4	5		
Уголок						
				a		
	0,6-1	<40	4	0-22-31-41-45		
		>40	6	0-18-25-32-37-41-47		
	1-1,5	<40	2	0-25-45		
>40		4	0-22-34-41-45			
Швеллер						
	0,6-1	<40	4	0-25-45-64-80-92-90		
		>40	8	0-20-37-52-65-76-85-92-90		
	1-1,5	<40	4	0-25-45-75-90		
		>40	6	0-25-45-64-80-92-90		
Корытный профиль при C<H						
				a	b	
	0,6-1	<40	6	0-25-44-54-64-73-80	0-8-8-8-8-8-0	
		>40	8	0-20-35-46-54-61-67-73-80	0-8-8-8-8-8-8-0	
	1-1,5	<40	4	0-20-40-60-80	0-0-0-0	
>40		6	0-25-44-54-64-73-80	0-8-8-8-8-8-0		
С-образный профиль при C<H/2						
	0,6-1	<40	6	0-15-30-45-60-75-90	0-30-60-90-120-150-180	
		>40	8	0-12-25-35-45-55-74-82-90	0-24-50-70-90-110-144-164-180	
	1-1,5	<40	4	0-25-45-75-90	0-45-90-135-180	
		>40	6	0-15-30-45-60-75-90	0-30-60-90-120-150-180	
С-образный с отбортовками внутрь при C<H/3; D<H/2						
				a	b	g
	0,6	<40	6	0-15-30-45-60-75-90	0-30-60-90-120-150-180	0-45-90-135-180-225-270
		>40	9	0-10-20-30-40-50-60-70-80-90	0-20-40-60-80-100-120-140-160-180	0-30-60-90-120-150-180-210-240-270

1	2	3	4	5	
Профиль с элементами двойной толщины на краях полки при $C < H/2$					
				a	b
	0,6	<40	6	0-20-30-40-60-70-90	0-45-90-130-180-250-270
		>40	9	0-10-20-30-40-50-60-70-80-90	0-30-60-90-120-150-180-210-240-270

янного радиуса, равного радиусу внутреннего закругления профиля. Такая система формовки позволяет облегчить расчет переходов профиля, уменьшить пружинение металла и др. Однако, при изготовлении профилей из материала с покрытием часто возникает НП, что связано с приложением больших касательных напряжений со стороны инструмента. Выходом из этого положения является использование системы калибровки с постепенным уменьшением радиуса изгиба до радиуса, равного внутреннему закруглению готового профиля [144]. Минимальное значение радиуса скругления на первом переходе назначается в зависимости от вида покрытия и определяется экспериментально по номограмме 4.23, а уменьшение значения радиуса происходит по закону близкому к линейному (5.1).

С учетом вышесказанного, для постепенного уменьшения радиуса угловой зоны, создано изобретение [149] (рис 5.2) “Способ изготовления швеллеров преимущественно из материалов с покрытием”, включающий подгибку и изгиб элементов профиля с последующим их выпрямлением, отличающийся тем, что на первых двух переходах заготовке придают чашеобразную в сечении форму с наибольшей кривизной в местах будущих сгибов и нулевой кривизной в ее центре и на концевых участках, на последующих переходах производят дальнейшую подгибку периферийных элементов с постепенным выпрямлением их и дна профиля, а на окончательном переходе осуществляют калибровку профиля, причем радиусы зон сгиба по переходам уменьшаются по линейному закону:

$$r_n = \frac{1}{N-2} \times [(N-n-1) \times r_1 + (n-1) \times r_3],$$

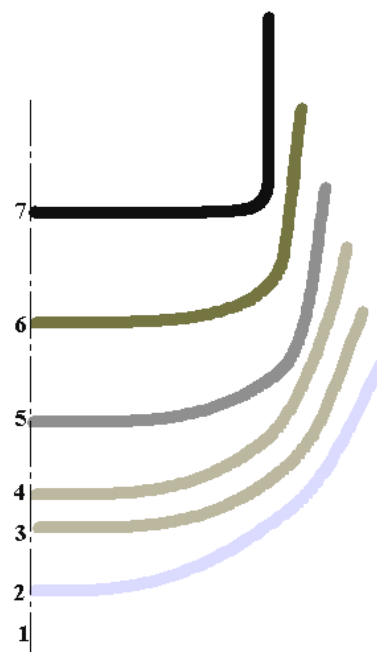


Рис. 5.2. Переходы профилирования швеллерного (полки) по изобретению [149]

где r_n – радиус кривизны будущей зоны сгиба в текущем переходе n ;

N – общее число переходов;

r_1 – радиус кривизны в месте будущего сгиба в первом переходе, соответствующий 95 – процентному уровню охвата зоны сгиба пластическими деформациями;

r_3 – заданный внутренний радиус зоны сгиба на готовом профиле.

Технический результат, достигаемый при использовании данного изобретения, заключается в повышении качества профилей за счет предупреждения нарушения поверхностного слоя заготовки и снижения уровня поволодок профиля, а также в уменьшении числа переходов.

Предлагаемый способ может применяться при толщине заготовки от 1 до 3 мм (для оцинкованных сталей) и до 6 мм для сталей без покрытия.

5.1.5. Влияние скоростного режима

Одной из характеристик МИД является ограничение на максимальную скорость профилирования, что в немалой степени связано со скольжением. Большие углы подгибки обуславливают повышенные значения сил со стороны инструмента, а в совокупности с большими скоростями резко увеличивают вероятность возникновения НП.

Величина скольжения может влиять на:

- величину (скорость) переноса цинкового покрытия с заготовки на инструмент;
- плотность распределения рисок (в случае их наличия) на покрытии.

Наибольшее скольжение проявляется в местах наибольшей разности скоростей: во внутренних угловых зонах профиля 1 и наружных предторцевых зонах профиля 2 (рис. 5.3).

Как показывает расчет, различие диаметров роликов по дну профиля и по краям профиля может значительно отличаться (особенно для профиля с широкими полками). Учитывая, что скорость профиля, как правило, соответствует линейной скорости “дна” нижнего ролика, то величина скольжения в зонах 1 и 2 (см. рис. 5.3) может составлять до (50-70)%. При этом характерно однонаправленное скольжение, т.е. линейная скорость роликового инструмента в указанных точках превышает скорость профиля (скольжение может быть сопоставимо со скоростью профилирования и составляет до 100 мм/сек).

Уменьшение величины скольжения является одним из направлений по предотвращению НП.

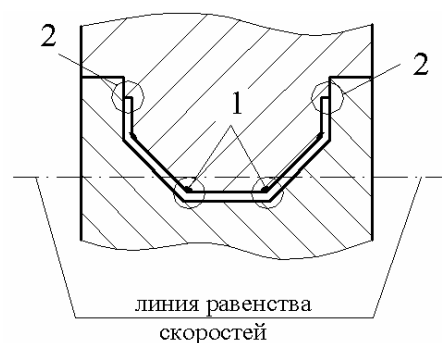


Рис. 5.3. Характерные зоны с наибольшим скольжением: 1 – внутренние формируемые углы сгиба профиля; 2 – предторцевые места профиля

Основные пути уменьшения скольжения:

- уменьшение скорости профилирования;
- уменьшение скорости верхнего вала на 10 – 30% по отношению к нижнему;
- увеличение диаметров нижнего вала;
- применение отдельных неприводных вставок в местах наибольшего скольжения (места цилиндрических буртов, формующих частей верхнего вала).

5.2. Технологические особенности формовки профилей с элементами жесткости

Основная номенклатура профилей с полимерными покрытиями, а также часть профилей с металлическими покрытиями имеют сечение сложной конфигурации, в частности, имеют элементы жесткости: ЭДТ, отбортовку, рифт и петельный элемент [63].

Применение ЭЖ обеспечивает:

- увеличение жесткости тонкостенного профиля;
- повышение декоративных свойств профиля;
- удобство сборки стеновых, потолочных, кровельных профилей.

Однако формование ЭЖ связано с приложением дополнительных контактных сил, которые могут привести к НП.

5.2.1. Классификация типовых элементов жесткости

Элементы жесткости можно классифицировать по конструктивно-технологическим признакам в целях, например, включения их в САПР. Однако классификации их только по конструктивным признакам недостаточно, поскольку положение элемента жесткости предполагает специфическую для данного положения (хотя и типовую) схему формообразования. Элементы жесткости рассматриваются по отношению к базовому элементу профиля (обычно стенке), подверженному наименьшей деформации. На рис. 5.4 приведен классификатор типовых элементов жесткости, составленный по следующим параметрам классификации:

- тип элемента жесткости (ДТ – элемент двойной толщины, R – рифт, F – отбортовка, L – петельный элемент);

- вид элемента жесткости в пределах данного типа (w – рифт волнообразный, а – рифт дугообразный, с – рифт-каннелюра, t – рифт трапецевидный или треугольный, d – рифт объемный, p – отбортовка неполная, f – отбортовка полная, e – отбортовка с поднутрением, l_{rw} – петельный элемент с прямыми стенками, l_q – рифт “сваленый”, l_r – рифт прямой, l_o – петля обычная, l_d – петля типа дверной);

- положение полки с ЭЖ по отношению к базовому (I – вовнутрь, E – наружу);

- положение элемента жесткости по отношению к оси профилирования (L – рифт продольный, T – рифт поперечный, Q – рифт косой);

- назначение (К – рифт конструктивный, Т – рифт технологический, который может быть неустранимым s и устранимым r);
- степень деформации несущего элемента (FW – подгибаемый, UW – неподгибаемый);
- тип несущего элемента (h – горизонтальный, q – наклонный, v – вертикальный);
- расположение относительно несущего элемента (n – нейтральный, i – внутренний, o – внешний).

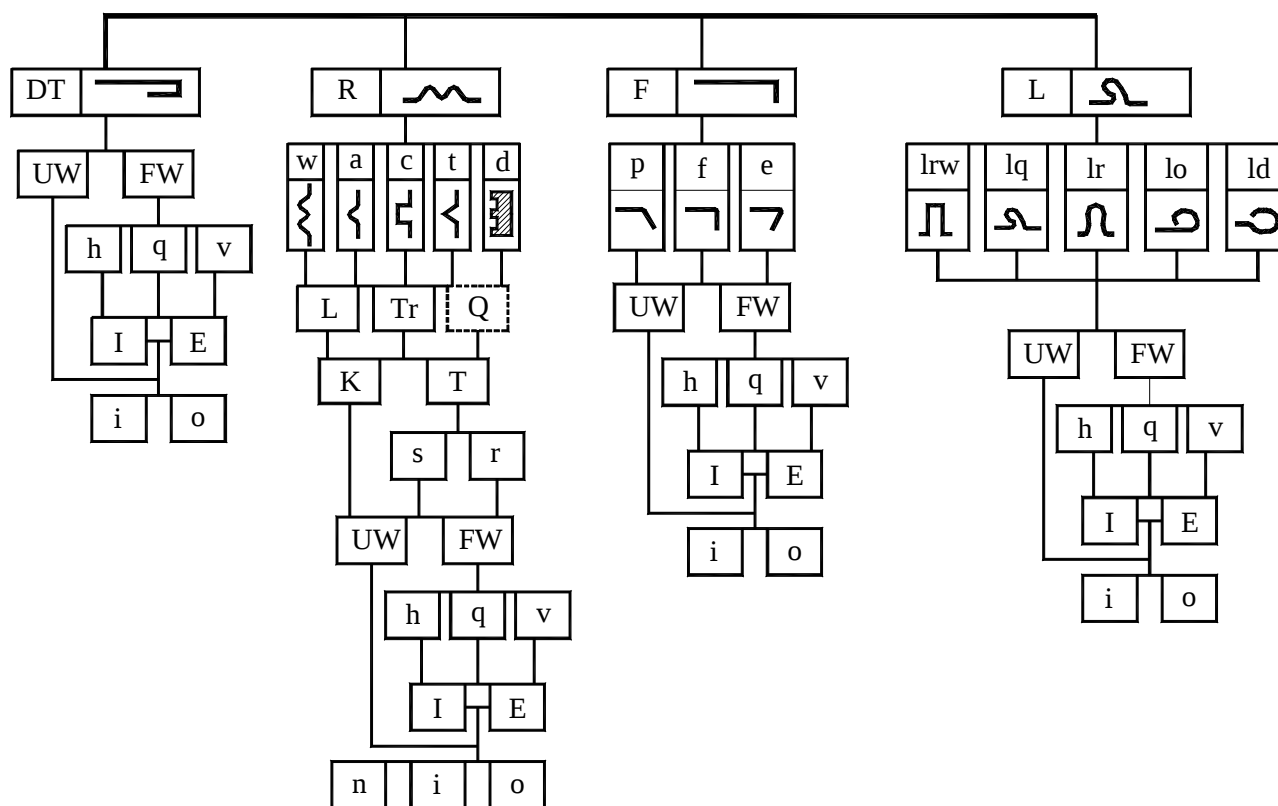


Рис. 5.4. Классификатор типовых элементов жесткости

Представленный классификатор, сформированный по конструктивно-технологическим признакам, позволяет упорядочить набор элементов жесткости гнутых профилей и выявить особенности их формообразования в целях расширения возможностей разрабатываемых систем автоматизированного проектирования и изготовления профилей из листа.

5.2.2. Формовка профилей с элементами двойной толщины

Концевые ЭДТ могут быть выполнены на подгибаемых или неподгибаемых горизонтальных, наклонных или вертикальных несущих полках. Подгибаемые несущие полки могут быть обращены как вовнутрь (схема DT-FW-h,q,v-I, см. рис. 5.4), так и наружу (схема DT-FW-h,q,v-E) по отношению к базовому элементу, что определяется наличием или отсутствием проекции концевой точки ЭДТ на базовом элементе профиля соответственно. Представленная

классификация отражает скорее технологическую сторону вопроса, чем конструктивную. Так, если выполнение ЭДТ в схеме DT-FW-h,q,v-E-i,o возможно на нескольких последних технологических переходах, то в схеме DT-FW-h,q,v-I-i,o это возможно лишь на нескольких первых переходах. Действительно, в случае подгибки вовнутрь при консольном положении полки, которая должна нести ЭДТ, формование этого элемента невозможно, поскольку воздействие роликового инструмента будет, очевидно, односторонним и приведет лишь к изгибу несущей полки (рис. 5.5.а). Положение концевой участка заготовки, который может быть обращен вниз (схема DT-FW-h,q,v-I,E-i) по отношению к несущей полке, влияет на степень деформации, которую получает периферийный участок (деформация в схеме DT-FW-h,q,v-E-o меньше, чем в схеме DT-FW-h,q,v-E-i). Это различие отражается на положении оси профилирования и параметрах жесткости поперечных сечений заготовки профиля вдоль нее, определяя тем самым величину продольного изгиба и уровень остаточных напряжений. Схемы, определяющие положение ЭДТ на неподгибаемой полке с различным направлением подгибки (схемы DT-UW-i и DT-UW-o), хотя и эквивалентны с точки зрения формообразования самого элемента, но не являются равноценными по отношению к такой характеристике качества, как отсутствие скрутки.

В этом случае удовлетворительные результаты могут быть получены за счет поворота базового элемента вокруг оси профилирования (рис. 5.5.б).

ЭДТ может формоваться как на краю профиля (рис. 5.6.а, в) так и внутри профиля (рис. 5.6. б).

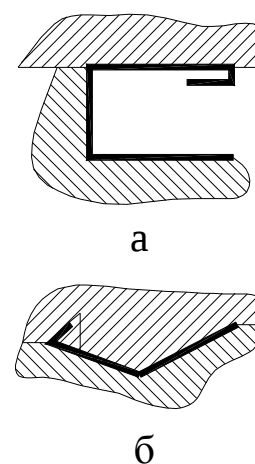


Рис. 5.5. Формообразование ЭДТ при расположении на подгибаемой вовнутрь (а) и на неподгибаемой вовнутрь (б) полках

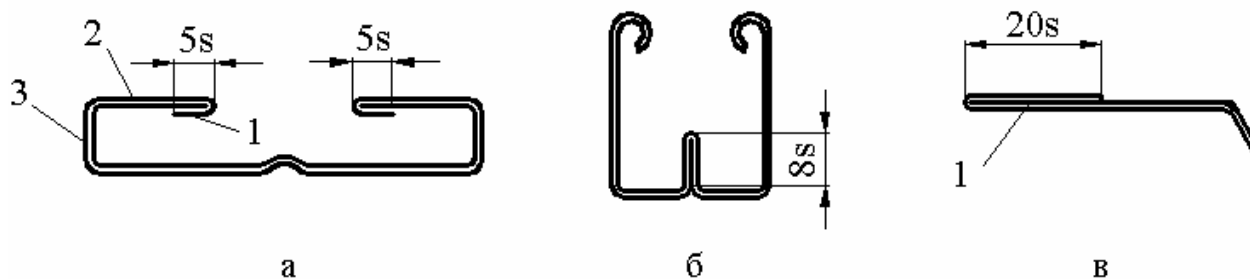


Рис. 5.6. Профили с ЭДТ: а – ВБЭ1-стойка (краевые ЭДТ); б – ВБЭ2-прогон (внутренний ЭДТ), в – профиль корытный (краевые ЭДТ)

Схемы формовки для краевых и внутренних ЭДТ различны. Краевой ЭДТ формируется одновременной подгибкой несущих стенок 2 и 3 и отбортовки 1

(рис. 5.6.а) или подгибкой только отбортовки 1 (рис. 5.6.в). Отбортовка, образующая ЭДТ, как правило, формуется в направлении оси профиля. Формовка внутреннего ЭДТ (рис. 5.6.б) производится в результате постепенной сборки элементов профиля в процессе утяжки его элементов. На некоторых профилях при наличии краевых и внутренних ЭДТ применяют совмещенную схему формовки. Формовка сопровождается высокими величинами деформации и контактных нагрузок по угловым и предугловым местам ЭДТ. Поэтому покрытие должно обладать высокими прочностными свойствами при растяжении и контактных нагрузках [134].

На рис. 5.7 представлены схемы формовки профилей с краевыми и внутренними ЭДТ.

Формование ЭДТ происходит по параллельной системе калибровки с одновременной подгибкой элементов профиля. Углы подгибки при этом несущей стенки можно увеличить за счет увеличенной жесткости края полки.

При формовке краевых ЭДТ этапы изготовления профиля можно разделить на формовку ЭДТ и формовку остальной части профиля. Поскольку применяется параллельная система калибровки, то эти этапы совмещают.

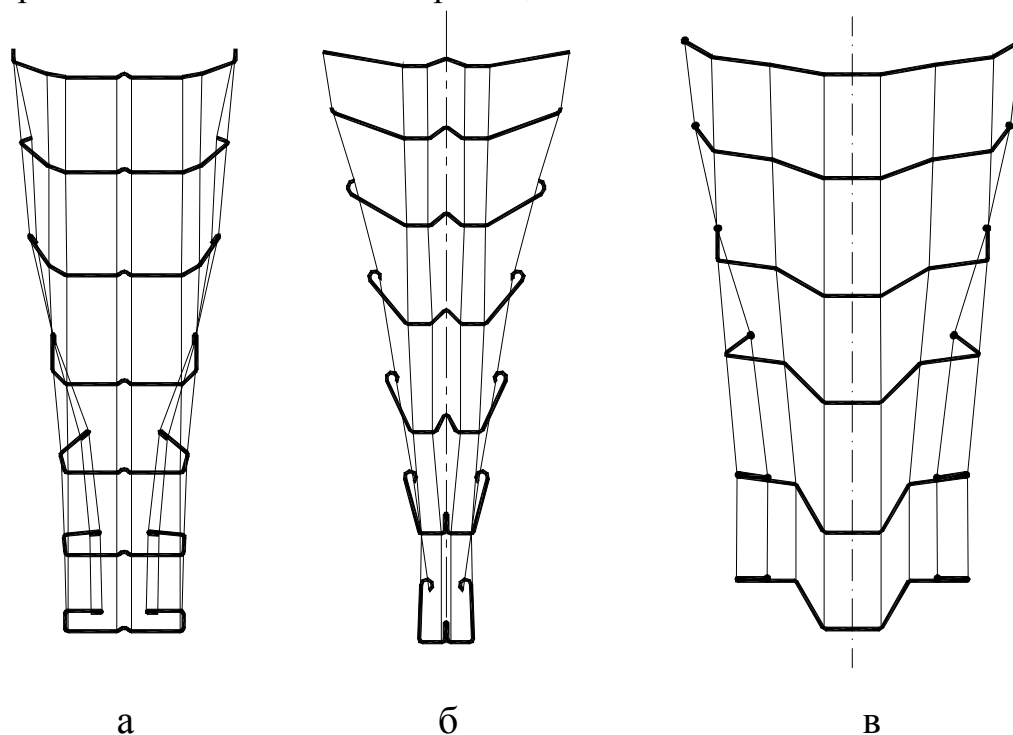


Рис. 5.7. Схемы формовки профилей с ЭДТ: а – ВБЭ1-стойка, б – ВБЭ2-прогон, в – профиль корытный

Начиная с 1 перехода, периферийный участок подгибают на максимально возможный угол, который зависит от величины и толщины отбортовки (п. 4.4). Одновременно подгибается и сопряженная стенка. Окончательно ЭДТ формуется при угле подгибки сопряженной стенки не более $(45 - 60)^0$ во избежание некачественной отформовки из-за худшего подвода инструмента. Далее сопряженная стенка с ЭДТ подгибается на заданный угол.

Данные схемы формовки применялись при разработке и внедрении технологии на предприятии ООО “ВАННБОК” (г. Санкт-Петербург) и ОАО “ПЗТСК” (г. Первоуральск)

Наличие краевого ЭДТ позволяет устранять дефект КВ, образованный на предыдущих переходах (рис. 5.8), что позволяет использовать предельные технологические режимы при выполнении отбортовки. На рис. 5.9 приведены примеры схем формообразования профилей с ЭДТ.

Возможность применения материала с покрытием при формовке ЭДТ определяют испытания на изгиб “Т”. При этом состояние покрытия оценивают с учетом назначения профиля, требования к качеству покрытия и времени релаксации. Как было установлено ранее, практически ни одно ПП не выдерживает изгиб на ЭДТ [134], однако экономическая составляющая изготовления ЭДТ непосредственно из материала с покрытием требует поиска способов формовки и введения некоторых допущений, к которым можно отнести:

1. Неполное формование ЭДТ, в результате которого внутри элемента остается зазор (бульбообразное утолщение основания ЭДТ), что увеличивает радиус сгиба профиля;

2. Максимальная оценка декоративных свойств составляет 4 балла (т.е. допускаются микротрещины по углам сгиба) (табл. 2.4);

3. Использование покрытия с максимальной стойкостью к изгибу (или покрытия, на котором менее заметны дефекты в виде трещин);

4. Использование металлического покрытия с повышенными декоративными свойствами.

С технологической стороны нужно обеспечить по возможности отсутствие или

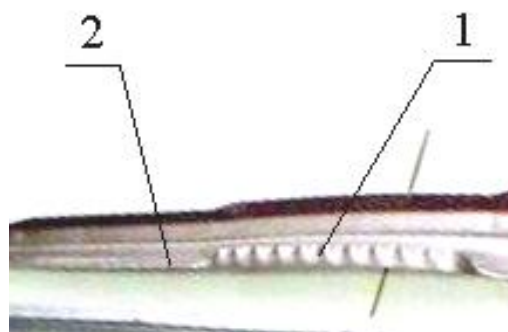


Рис. 5.8. Устранение дефекта КВ: 1 – наличие КВ отбортовки; 2 – устранение КВ после образования ЭДТ

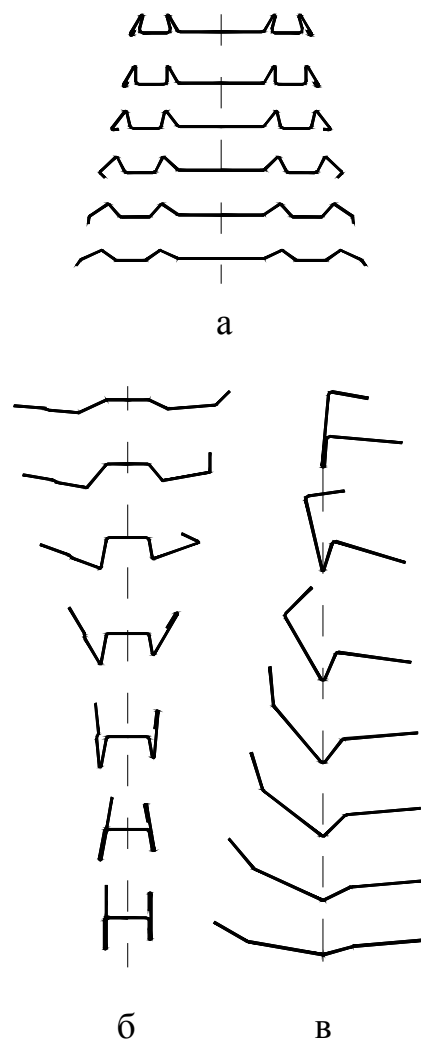


Рис. 5.9. Примеры схем формообразования профилей с ЭДТ: трек нижний (а), профиль Н-образный (б) и профиль F-образный (в)

минимальный контакт данной зоны с инструментом. Это можно обеспечить использованием соответствующих калибров или проводок (см. далее п. 5.4.2).

Наиболее неблагоприятное воздействие на покрытие происходит при совмещении контакта при подгибке стенки и формировании ЭДТ, поскольку в первом случае имеет место контакт радиусной части ролика (бурта) с радиусной частью ЭДТ; во втором случае происходит обжим. Если обжим не приводит к значительным НП (см. рис. 2.12), то контакт с радиусом бурта вызывает сдир (отслаивание) покрытия. Для его устранения дополнительно к рекомендациям, приведенным выше, можно добавить следующие меры:

- увеличение радиуса бурта;
- изменение радиуса по закону, дающему увеличение площади контакта;
- применение приводных вертикальных роликовых калибров.

5.2.3. Формовка профилей с рифтами и насечками

Выполнение технологических или конструктивных рифтов, которые могут быть продольными, поперечными или косыми, возможно на подгибаемых и неподгибаемых полках (базовые элементы). Косые рифты хотя и возможны, однако на практике не применяются из-за сложности изготовления формирующего инструмента и отсутствия соответствующих технологических разработок. Поперечные рифты также имеют ограниченное применение. Рифты отличаются от контурных сегментов своими относительно малыми размерами по отношению к основным элементам профиля. Обычно депланация элемента типа рифта не превышает 5 – 8 толщин материала.

Технологические рифты могут быть двух видов: устраняемые и неустраняемые в процессе формообразования. В том и другом случае для их формообразования не требуется избыточная ширина заготовки: рифты получаются за счет вытяжки или пространственного распределения материала заготовки.

Формование продольных рифтов на неподгибаемых элементах профиля (схема R-w,a,c,t,d-L-K-UW, см. рис. 5.4) в технологическом отношении не представляет трудности, однако, вследствие повышения жесткости одной части сечения профиля из-за наличия рифтов может приводить к кромковой волнистости подгибаемых полок (при значительной ширине полок и толщине материала заготовки менее 1 мм). Поэтому целесообразно выполнение продольных рифтов (высотой более 2S) на неподгибаемых полках постепенно, с увеличением высоты рифта (и числа рифтов) от перехода к переходу, или же выполнение рифтов на последних переходах. Последний вариант, к сожалению, имеет ограниченные возможности в случае замкнутых или полузамкнутых профилей. Удовлетворительные результаты дает применение уравнивающей формовки конструктивных и технологических рифтов на различных полках.

Выполнение рифтов на подгибаемых полках (схема R-w,a,c,t,d-L-K-FW) может быть реализовано, в основном, при горизонтальном расположении полок или в положении с небольшими углами подгибки (до 15 – 20 град.) на первых переходах. При больших углах подгибки не происходит замыкания контура

рифтов из-за поднутрения (особенно при формировании рифтов прямоугольной формы). На промежуточных и последних переходах продольные рифты могут быть выполнены только по схеме R-w,a,c,t,d-L-K-FW-h,q при условии горизонтального или близкого к нему положения соответствующей полки. Однако на периферийных элементах возможно изготовление продольных и поперечных рифтов и в наклонном положении с использованием соответствующей оснастки (дополнительные неприводные ролики типа проводок в межклетьевом пространстве профиленибочного станка).

Положение рифта по отношению к базовому элементу профиля и по отношению к подгибаемой полке оказывает существенное влияние на общую схему формообразования и форму применяемого технологического оснащения. Более предпочтительной является схема с расположением рифтов вовнутрь, поскольку в этом случае обеспечивается относительно равномерное распределение сил по ширине подгибаемой полки, предотвращающее появление желобчатости последней.

Нижние ролики последних переходов при расположении рифтов вверх могут иметь ту же конфигурацию, что и для изготовления аналогичного профиля с плоскими элементами. В верхних роликах надлежит предусматривать участки высвобождения для прохождения рифтов.

Несимметричное расположение рифтов по отношению к базовому элементу приводит к скрутке профиля при одних и тех же углах подгибки полок, поскольку жесткость полок и их деформация оказываются различными. Скрутка может быть уменьшена за счет использования технологических рифтов или за счет назначения различных углов подгибки для полок. Неблагоприятное расположение рифтов по донной части профиля и подгибаемым полкам приводит к продольной кривизне профиля, которая может быть предотвращена путем выбора схемы формообразования или режимов формообразования и правки.

Размеры и конфигурация рифтов могут весьма существенно влиять на схему формообразования, так как жесткость элемента профиля является функцией размеров, конфигурации, числа и расположения рифтов. Это обстоятельство надлежит учитывать при оценке характеристик жесткости сечения и элементов профиля в каждом из технологических переходов при разработке схем формообразования.

Применение рифтов на профиле позволяет увеличить жесткость самого профиля, предотвратить появление КВ, обеспечить удобство крепления таких профилей в различных конструкциях (канавки рифтов являются направляющими для саморезов) (рис. 5.10).

При всех положительных свойствах рифтов имеются и недостатки, поскольку, в основном, на профилях применяются технологические рифты, что изменяет сечение профиля и должно согласовываться с заказчиком, а при изготовлении из материала с покрытием заготовка испытывает дополнительные деформации и контактные нагрузки, что сказывается на качестве покрытия.

В случае применения устраняемых технологических рифтов вероятность нарушения покрытия резко возрастает. Исходя из этого, нельзя рекомендовать формовку отбортовки малой высоты путем исполнения устраняемых технологических рифтов для предотвращения КВ.

Высота технологических рифтов, как правило, не превышает $(1 - 2)s$ и значительно меньше их ширины, что не приводит к значительным утяжкам металла и большим деформациям. Однако радиус контакта с инструментом должен быть не менее установленного ранее (п. 4.5).

Рифты небольшой высоты $(1 - 2)s$ формируется сразу за один (как правило первый) переход. Применение рифтов на подгибаемых полках имеет положительный эффект на предотвращение КВ и может способствовать уменьшению количества переходов.

Нанесение насечки на профиль сходно с формовкой рифтов с тем отличием, что размер наносимой насечки мал, а их количество на единицу площади велико (рис. 5.11). Их величина, как правило, не превышает $(0,5 - 1)s$, а формовка связана с вытяжкой металла. Однако для их заметности и декоративного восприятия радиусы формовки на инструменте уменьшают, что отрицательно сказывается на качестве покрытия. Поэтому применение насечки можно рекомендовать только на наиболее стойких Zn покрытиях. Наиболее опасно с точки зрения НП нанесение насечки на толстом материале, где формовка происходит в результате выдавливания металла; такая насечка не может быть рекомендована при изготовлении профилей с покрытием.

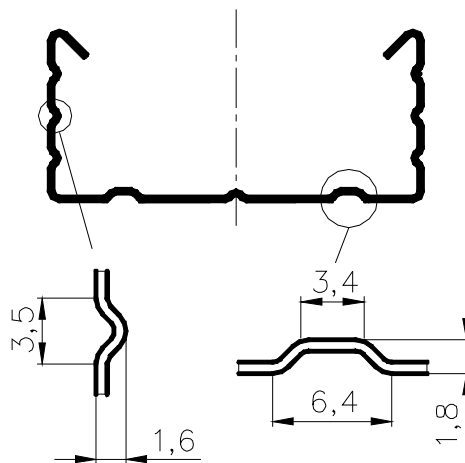


Рис. 5.10. Профиль с рифтами номенклатуры Кнауф



Рис. 5.11. Виды насечек на поверхности профиля

5.2.4. Формовка профилей с замковыми элементами

Для облегчения и уменьшения времени последующей сборки декоратив-

ных панелей (сайдинг, софит, автофальц) часто на профилях используют замковые элементы рис. 5.12.

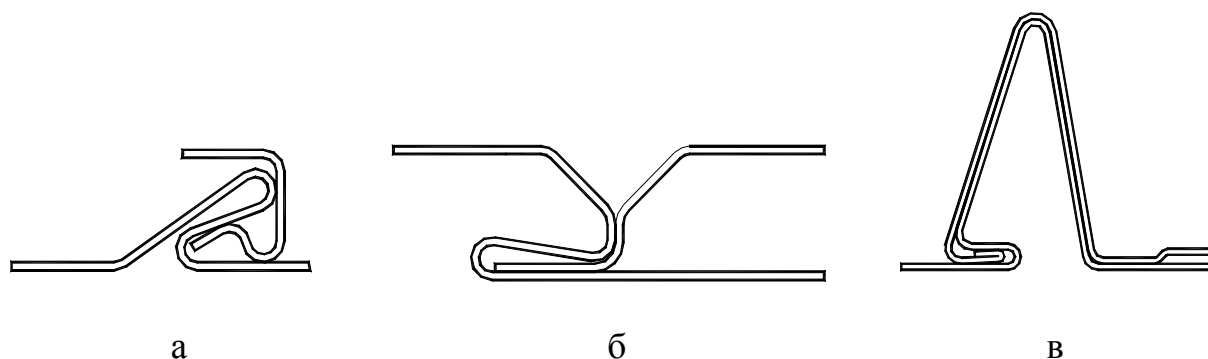


Рис. 5.12. Образование замка при сборке панелей:
а - сайдинг; б – софит; в – автофальц

Для образования замка на профиле используют элементы жесткости:

- отбортовка – петельный элемент (сайдинг, софит);
- петельный элемент – петельный элемент (автофальц).

Петельные элементы жесткости могут располагаться на неподгибаемых или подгибаемых горизонтальных, наклонных или вертикальных элементах. петельные элементы могут быть с прямыми стенками, наклонными, в форме обычной или выгнутой (типа дверной) петли. По отношению к базовому элементу петельные элементы могут выполняться на внутренней или наружной стороне подгибаемых полок.

Выполнение петельных элементов связано со значительной боковой утяжкой материала, что может приводить к кромковой волнистости при небольшой толщине материала. В этом случае возможно использование устраняемых технологических дугообразных рифтов или специальных проводок. Наклонные петельные элементы (1q, см. рис. 5.4) можно формовать первоначально прямым с последующим боковым воздействием на элемент жесткости (так называемое “сваливание”). Формование косых петельных элементов последовательной подгибкой нетехнологично.

Хотя, как правило, основная часть замкового элемента скрыта и декоративная составляющая покрытия не столь важна, в любом случае нарушение покрытия на этих местах не допускается, поскольку, во-первых, это снизит срок эксплуатации такого профиля и, во-вторых, покупатель оценивает качество профиля (в том числе и поверхности) когда замковые элементы хорошо видны.

Формовка петельных элементов зависит от формы этих элементов и места их расположения на профиле. При формовании их требуется приложения значительных контактных сил, которые могут отрицательно воздействовать на покрытие.

Переходы формирования петельных элементов представлены на рис. 5.13.

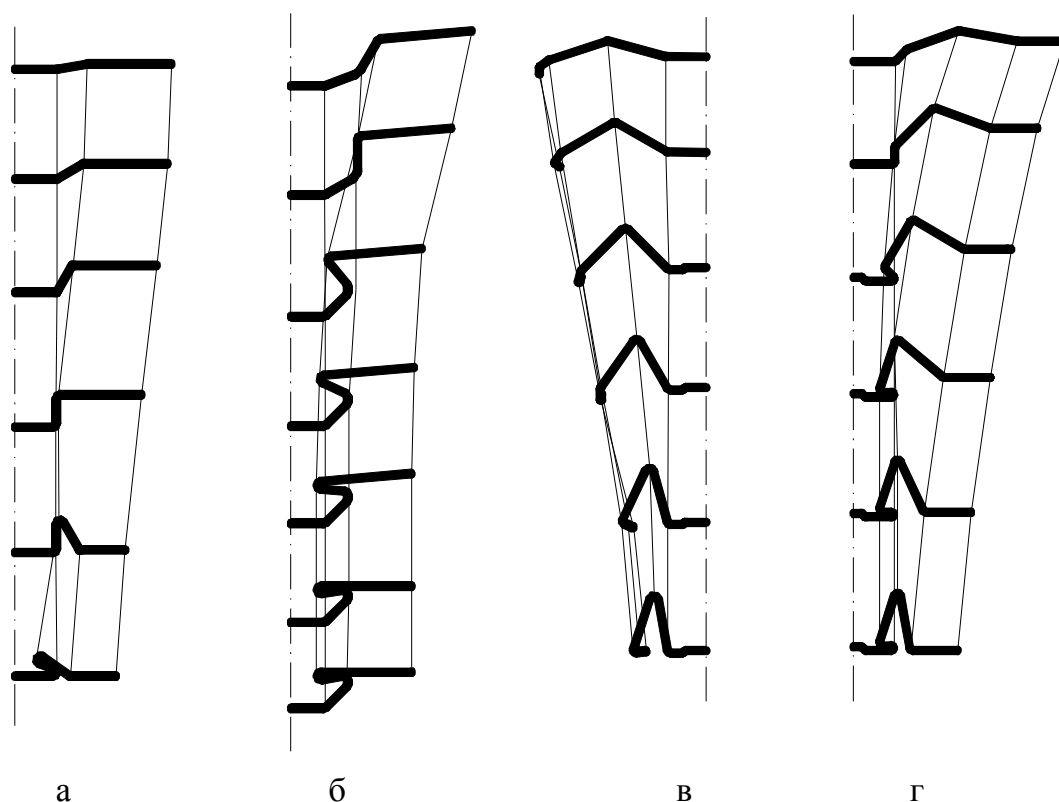


Рис. 5.13. Формование петельных элементов на профилях: а – сайдинг, б – софит, в – внутренняя часть и г – внешняя часть замка автофальца

Схемы формовки, представленные на рис. 5.13 а, б, были применены при разработке и внедрении технологии на предприятиях ЗАО “ИНСИ” (г. Челябинск) и ООО ЛФ “АРС Профнастил”.

Радиусыгиба петельных элементов должны быть не менее приведенных ранее значений (см. п. 2.3). Характерной особенностью формовки петельных элементов является утяжка соседних зон, что вызывает появление КВ или “хлопунов” и значительный перегиб заготовки при заходе. Поэтому рекомендуется освобождать прилегающий участок, например, при формовке сайдинга на величину утяжки в 5 и 6 переходах (рис. 5.14). Часто на последнем переходе для устранения КВ применяют неустранимый технологический рифт (см. рис. 5.14), который увеличивает жесткость края профиля и используется для направления самореза при креплении. После сборки панелей он становится потайным. Данный способ может применяться и для других профилей, подверженных КВ.

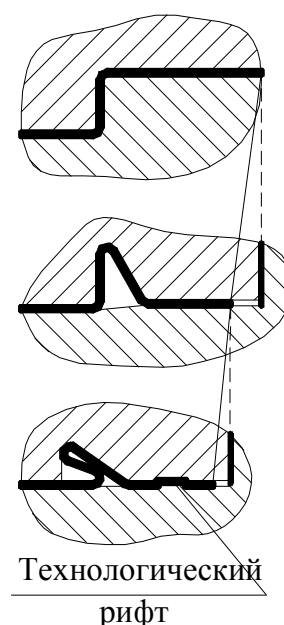


Рис. 5.14. Смещение кромки при формовке замкового элемента и освобождение прилегающего участка

Формовка другой части замка – отбортовки, как правило, не ставит технологических проблем и проблем НП, если подложка тонкая, а ширина отбортовки более $4s$. Проблемы формообразования отбортовок также связаны с обстоятельствами последовательности формирующих операций. В схеме F-p,f,e-FW-h,q,v-I (рис. 5.4) выполнение отбортовки возможно лишь на первых переходах, в то время как схема F-p,f,e-FW-h,q,v-E допускает формообразование отбортовки и на нескольких последних переходах. В случае формообразования отбортовки малой высоты (менее 4-х толщин исходной заготовки) удовлетворительные результаты можно получить за счет применения технологических устраняемых рифтов дугообразной формы R-a-L-T-г. Хотя при формовании полок шириной $(2 - 3)s$ или полок с поперечной кривизной возможны НП. При этом главное внимание следует уделить точности изготовления оснастки, в частности, надлежащему обеспечению зазора.

5.2.5. Формовка профилей с элементами, имеющими поперечную кривизну

Формовка радиусных элементов связана с уменьшением зоны контакта между инструментом и заготовкой и, соответственно, с увеличением давления на профиль.

Контакт инструмента с круговым контуром заготовки может происходить в следующих случаях:

- профиль имеет участки с поперечной кривизной;
- заготовка в процессе формовки приобретает поперечную кривизну.

К профилям, имеющим поперечную кривизну, относятся: прогон, мебельные профили, доборные элементы сайдинга и др. Пример схемы формообразования мебельного профиля П-154 приведен на рис. 5.15. Хотя калибр и повторяет контур профиля, в процессе захода и подгибки сечение профиля по отношению к калибру изменяется, что приводит к увеличению контактных сил.

Часто при формовке профилей МИД прямолинейные элементы могут приобретать на определенных участках поперечную кривизну (радиус) [145].

К таким профилям можно отнести:

- швеллерные и С-образные профили, формируемые при максимально возможных углах подгибки;

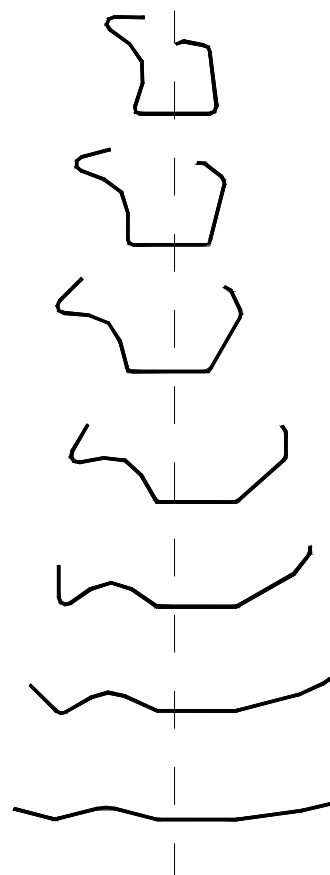


Рис. 5.15. Схема формообразования профиля П-154 с элементами поперечной кривизны

- профили, имеющие подгибаемые внутренние стенки размером менее $(10 - 15)s$.

Образование поперечной кривизны при заходе в калибр возможно в нескольких случаях (рис. 5.16).

1. В результате подгибки полки реакция на приложение сил подгибки проявляется в донном участке профиля с образованием прогиба f (рис. 5.16.а). Далее в калибре происходит контакт нижнего ролика с узким участком дна профиля, в результате чего возможно НП;

2. Прогиб стенки профиля при торцевом поджатии (рис. 5.16.б);

3. Некачественная формовка уголковых зон, в результате чего металл не успевает набраться в уголковых зонах (рис. 5.16.б).

4. Образование радиусной зоны при изготовлении профиля, имеющего стенки величиной менее $(10 - 15)s$, где в процессе интенсивного подгиба малые прямолинейные зоны не успевают формоваться, в результате чего образуется поперечная кривизна.

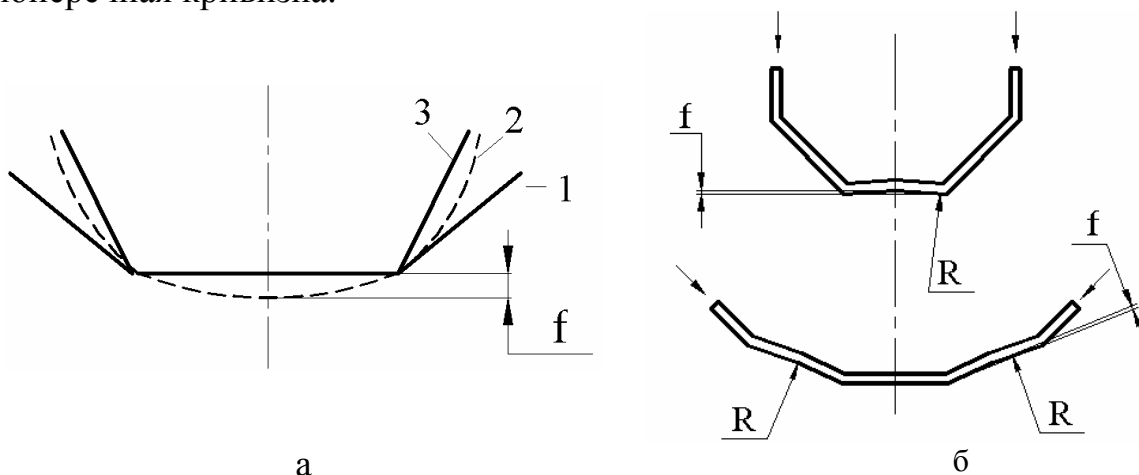


Рис. 5.16. Образование поперечной кривизны при формовке профилей типа швеллер (а) и С-образный (б): 1 – подгибка профиля на предварительном переходе; 2 – предварительная подгибка профиля в текущем переходе; 3 – калибровка профиля по сечению в исследуемом переходе; f – величина прогиба

Основные рекомендации по устранению НП:

- радиусная зона должна сразу формоваться на начальных переходах во избежание дополнительного контакта при подогнутых несущих элементах;
- после формирования радиусной зоны рекомендуется использование межклетевых фторопластовых проводок для уменьшения угла захода полки и, соответственно, излишнего давления со стороны ролика;
- изготовление инструмента должно быть более тщательным, в частности, радиусы на инструменте следует выполнять по соответствующему шаблону.

5.3. Проектирование и изготовление технологической оснастки

Поскольку один из основных дефектов покрытия – сдир – происходит при контакте заготовки с инструментом, то выбор вида калибров для технологических переходов становится одной из основных задач.

При изготовлении профилей СИ и МИД используются замкнутые калибры в связи с лучшим центрированием заготовки, равномерностью зазора в калибре и интенсификацией формообразования [80], за счет чего можно уменьшить количество переходов.

5.3.1. Классификация калибров

Основной технологической оснасткой для формообразования листовых профилей является комплекты формующих роликов, устанавливаемые на валы (верхний и нижний) рабочих клеток профилегибочного стана [80]. Соединение верхнего и нижнего ролика образует роликовую пару с рабочим зазором-калибром, соответствующим форме технологического перехода.

Классический калибр, применяемый при СИ и МИД, является замкнутым по всему периметру рабочего контура (закрытый калибр) на всех переходах. Замыкание рабочего контура, осуществляемое по торцам калибров, обеспечивается специальными конструктивными элементами двух типов: буртами (рис. 5.17. а, б), применяемыми при горизонтальном расположении краевых элементов профиля, и уступами (рис. 5.17. в, г, д) при их вертикальном расположении.

Равномерность боковых (вертикальных) зазоров в калибре, исключение возможности относительного смещения роликов в осевом направлении обеспечиваются соединением верхнего и нижнего ролика торцевыми сопрягаемыми поверхностями посадкой "в замок" по Н7/н7. Нижний ролик при этом, как правило, является охватывающим (базовым), верхний – охватываемым (рис. 5.17. а, б, в). В отдельных случаях (при несимметричной форме профилей) соединение роликов "в замок" следует производить с помощью дополнительных элементов типа "паз-выступ" (рис. 5.17. д).

Диаметры формующих роликов на всех переходах следует выбирать конструктивно, исходя из межцентрового расстояния, диаметров рабочих валов и глубины формовки (глубины "вреза"). При этом для достижения достаточной прочности роликов необходимо обеспечить в местах минимальной толщины в радиальном направлении запас материала не менее 5 – 10 мм. Для станка ГПС-350М6 при глубине формовки до 50 мм рекомендуемые диаметры роликов выбирают в диапазоне от 150 до 200 мм.

В табл. 5.2 представлен классификатор замыкания роликового калибра, применяемый при интенсивном деформировании и образуемые зоны контакта для профилей швеллерного и С-образного типа.

В классификаторе представлены варианты замыкания калибра при различных углах подгибки элементов профиля и наиболее часто применяемые из них.

Выбор калибра зависит как от технологических режимов (угла подгибки), так и прочности покрытия. При изготовлении профилей из материала с прочным (металлическим) покрытием используют классические калибры с вертикальными буртами (№2, №3, табл. 5.2). Для материала с низкими прочностными свойствами (например, полимерные покрытия) используют калибры с коническими участками (№4); они обеспечивают наилучшую сохранность покрытия, но при этом теряется интенсификация процесса, задаваемая вертикальными буртами, что приводит к увеличению числа переходов. Для профилей С-образного типа может применяться вариант замыкания по середине элемента профиля. Однако, при этом возможно “закусывание” края профиля, что требует применения дополнительных межклетьевых проводок.

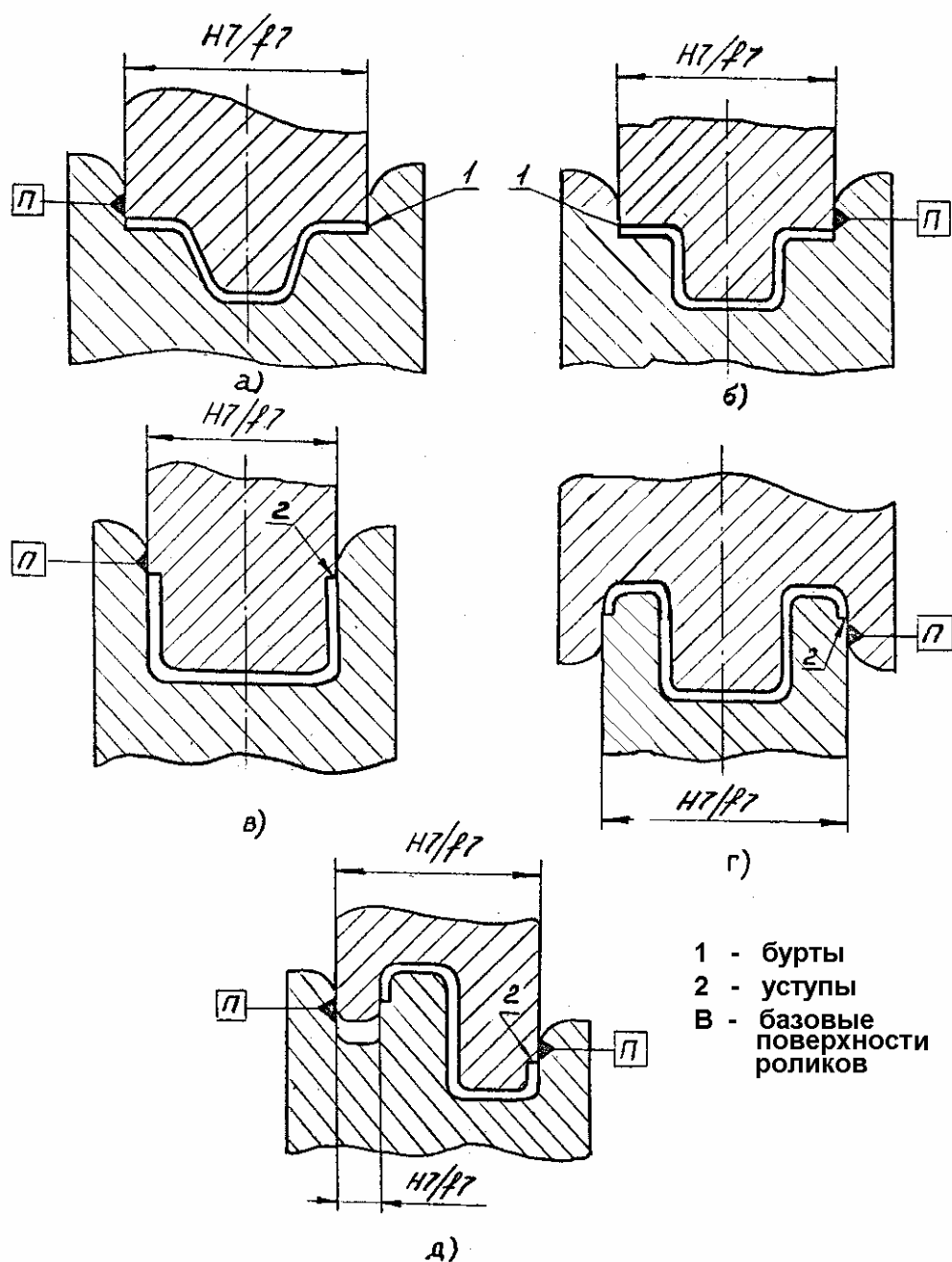
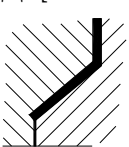
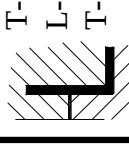
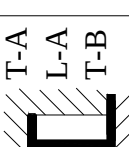
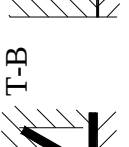
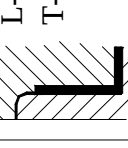
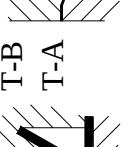
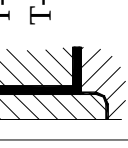
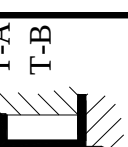
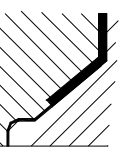


Рис. 5.17. Типы калибров роликов

Таблица 5.2

Классификатор замыкания роликового калибра

N	$\alpha < 90^\circ$ ($\beta < 90^\circ$)	$\alpha < 90^\circ$ $\beta > 90^\circ$	$\alpha = 90^\circ$ ($\beta = 90^\circ$)	$\alpha = 90^\circ$ $\beta > 90^\circ$	$\alpha > 90^\circ$ $\beta > 90^\circ$	Варианты замыкания калибра
1	 L-B T-C	 L-B T-B T-C	 T-A L-A T-C	 T-A L-A T-B	 T-B	- по середине элемента(ов) профиля (в т. наибольшего удаления от оси)
2	 L-B L-A T-C	 L-B T-B L-A T-C	 L-A T-C	 T-B L-A	 T-B T-A	использование вертикального бурта со скруглением, расположенного по ходу подгибки элементов профиля
3	 L-B T-A T-C	 L-B T-B T-A T-C	 T-A T-C	 T-A T-B	 T-B L-A	использование вертикального бурта со скруглением, расположенного против хода подгибки элементов проф.
4	 L-B T-C	 L-B T-B T-C			 T-B	использование вертикального бурта со скруглением с дополнительным коническим участком

L (Low) - нижний ролик

A, B, C - зоны контакта по рис. 2.1.

T (Top) - верхний ролик

Например: L-B - контакт заготовки с нижним роликом (L) по его конической части (B)

Для профилей с краевыми ЭДТ применяют различные виды замыкания рабочего контура (рис. 5.18), выбор которых зависит от технологических параметров процесса и геометрических параметров профиля (табл. 5.3).

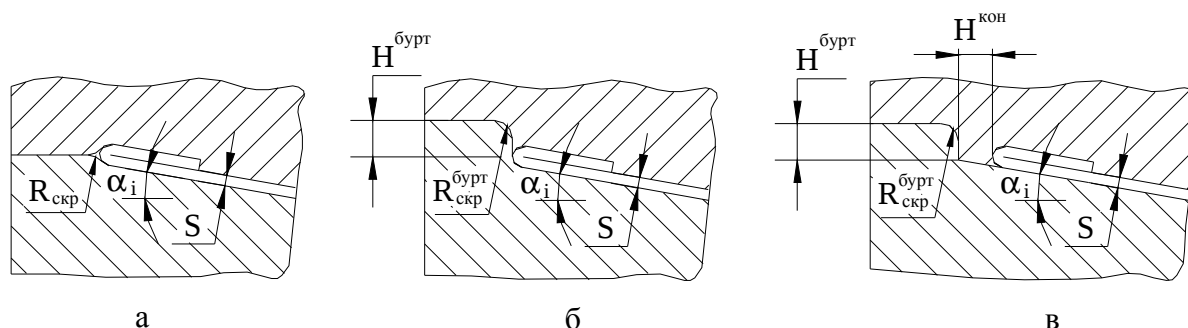


Рис. 5.18. Виды замыкания калибров роликов для профилей с краевым ЭДТ: а – посередине ЭДТ, б – вертикальным буртом, в – буртом и коническим участком

Таблица 5. 3

Выбор схемы замыкания при формировании профиля с краевым ЭДТ

Схема замыкания (рис. 5.18)		Угол подгибки a_i , град	S, мм	Покрытие	Параметры посадочных мест роликов
а	Посередине ЭДТ*	$0 < a_i < 20$	0,5-0,8	Zn, Пл, ПЭ	$R_{скр} = (1,5 - 2)S$
			0,8-1,0	Zn, Пл	
			1,0-1,5	Zn	
б	С вертикальным буртом*	$20 < a_i < 90$	0,5-0,8	Zn, Пл**, ПЭ*(**)	$H_{бурт} = 2 \cdot S \cdot \sin a_i + (7 - 8)$ $R_{скр}^{бурт} = (4 - 5), \text{ см. табл. 5.4}$
			0,8-1,0	Zn, Пл**	
			1,0-1,5	Zn	
в	С буртом и коническим участком	$30 < a_i < 70$	0,5-0,8	Пл, ПЭ	$H_{бурт} = 2 \cdot S \cdot \sin a_i + (7 - 8)$ $R_{скр}^{бурт} = 3$ $H_{кон} = 2 \cdot B \cdot (\cos a_{i-1} - \cos a_i)$
			0,8-1,0	Пл	

* – необходимо применение проводковых устройств при $\Delta a = a_i - a_{i-1} > (10-15)^0$, см. п. 5.4.1;

** – при углах подгибки более 70^0 .

5.3.2. Выбор формы и величины скругления буртов

Радиусы на буртах играют важную роль, поскольку от их величины зависит площадь контакта и, соответственно, величина контактных давлений. Вид классического калибра, применяемого при МИД, приведен на рис. 5.19.

Бурты охватывающих роликов следует проектировать в виде выступов толщиной 15 – 20 мм со скруглением по радиусу не менее 3 мм (рис. 5.20.а), либо в сочетании скругленного и наклонного прямолинейного участка (рис. 5.20.б). Размеры прямолинейных, сопряженных с верхним роликом, участков

буртов должны обеспечивать их перекрытие по высоте не мене 3 – 5 мм. Применение различных форм скругления приведено в табл. 5.4.

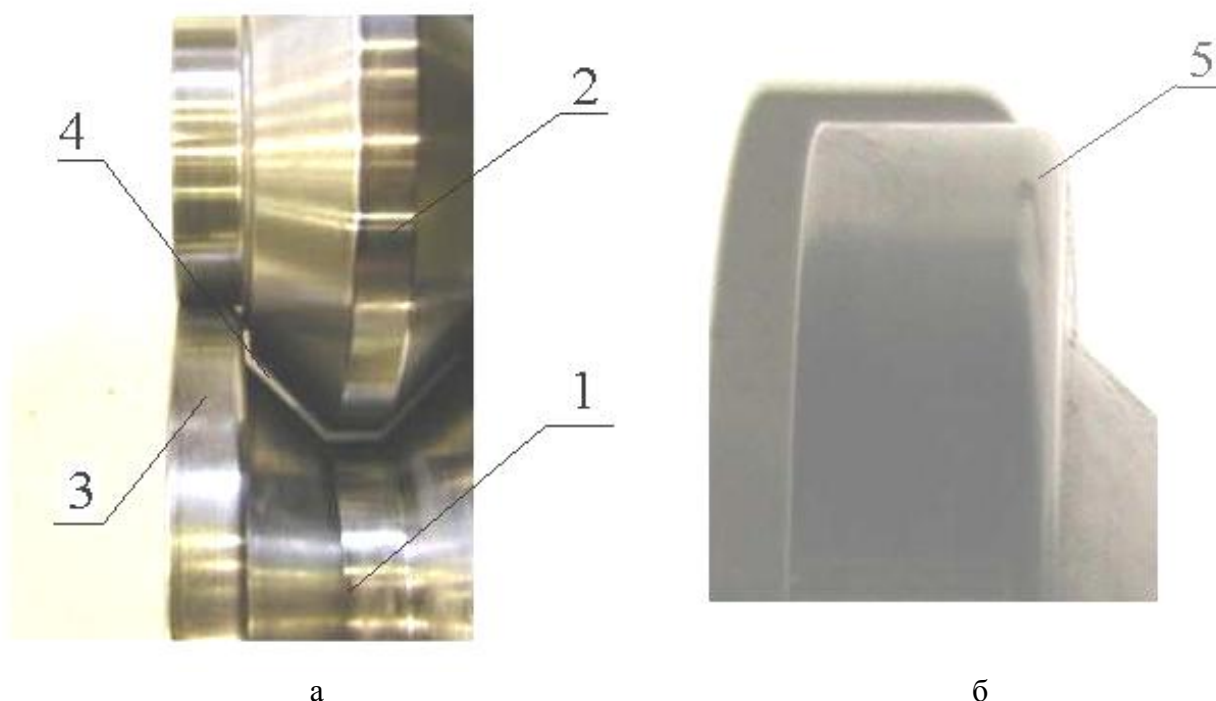


Рис. 5.19. Вид классического калибра (а) и вертикального бурта (б), применяемого при использовании МИД: 1 – нижний ролик; 2 – верхний ролик; 3 – вертикальный бурт; 4 – калибр; 5 – скругление на бурту

Для уменьшения контактных давлений и вероятности НП при углах подгибки полок профиля близких к 90^0 , предложено использовать “скругление” по эллипсу с отношением главных осей $5/3$, при этом большая ось расположена перпендикулярно к оси ролика, а малая ось параллельна оси ролика. При использовании такого вида скругления радиус кривизны в месте контакта по сравнению с радиусом 3 мм увеличивается в 2,2-2,7 раза (п. 3.3.2).

С учетом вышесказанного, для увеличения радиуса кривизны в зоне контакта создано изобретение [150, 151]: роликовая оснастка для получения профилей из листовых заготовок, имеющая закрытый рабочий калибр, ограничивающие его вертикальные бурты со скруглением по внутренним поверхностям на входе в калибр при этом вертикальные бурты выполнены со сглаживанием в виде эллипса с горизонтальной главной осью a и вертикальной главной осью b , при этом отношение их зависит от угла подгибки a и выбирается из условия:

$$\frac{a}{b} = 1,5 - 2 \quad \text{при} \quad 0 < a < 30^0$$

$$\frac{b}{a} = 1,5 - 2 \quad \text{при} \quad 30 < a \leq 90^0$$

где a – главная ось эллипса параллельная осям валков, мм;

b – главная ось эллипса перпендикулярная осям валков, мм;

a - угол подгибки элементов профиля, град.

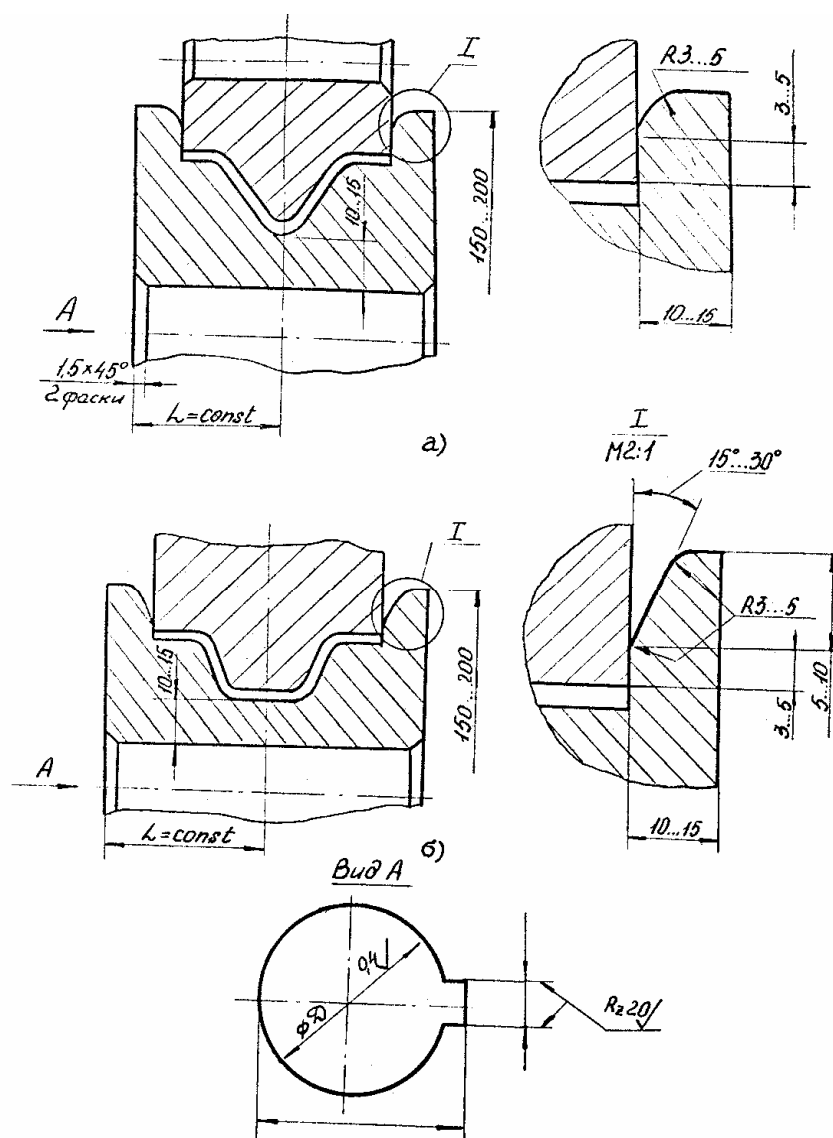


Рис. 5.20. Бурты и посадочные места ролика: а – скругление по радиусу; б – сочетание скругленного и наклонного прямолинейного участка

Таблица 5.4

Назначение формы и величины “скругления” бурта в зависимости от типа профиля

Тип профиля	Толщина, мм	Покрытие	Вид “скругления”	Величина “скругления”
Швеллер	0,5 – 1,0	ПП	по радиусу	R = 3 мм
	1,0 – 2,0	Zn		
Профили с краевыми радиусными зонами или ЭДТ	0,5 – 1,0	ПП	по радиусу	R = 5 мм
			по эллипсному контуру (с главными осями a, b)	$\frac{a_{\phi}}{b_{\phi}} = \frac{5}{3}$
Корытный	0,5 – 1,0	ПП	скругление по радиусу + наклонный участок	радиус R=(3-5) мм + наклонный участок (10-15) ⁰

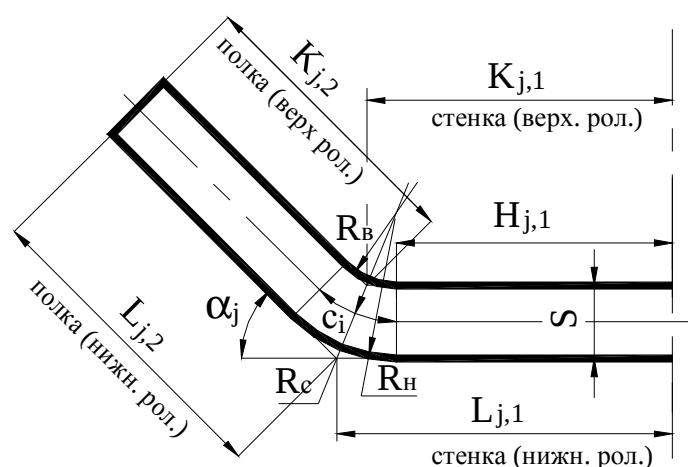
Значение малой оси назначается не менее 3 мм.

Назначение изобретения заключается в снижении контактных сил, действующих со стороны инструмента на заготовку с покрытием, за счет увеличения площади контакта, что достигается увеличением радиуса кривизны инструмента в зоне контакта, при использовании формы “скругления” инструмента в виде эллипса.

5.3.3. Программа для расчета роликового калибра при проектировании оснастки

В настоящее время разработку технологических переходов и прорисовку технологической оснастки производят с помощью компьютерных программ, например, AutoCad. Для расчета координат роликового калибра и последующей прорисовки самого ролика, была разработана программа, позволяющая производить расчет размеров прямолинейных и криволинейных элементов сечения профиля по переходам. Программа написана на языке программирования BASIC и может проводить расчет для профилей несимметричного сечения с несколькими элементами. Параметры, применяемые в расчете, приведены на рис. 5.21.

Основные части программы приведены на рис. 5.22. Расчет параметров сечения осуществляется с последнего перехода. Входными данными программы являются размеры сечения готового профиля (величина элементов $L_{k,i}$, внутренний радиусгиба R_B), толщина исходной заготовки S и количество переходов. Выходными данными – величина калибра верхнего ролика $K_{j,i}$, величина калибра нижнего ролика $L_{j,i}$ и величина прямолинейных участков $H_{j,i}$ по переходам. На экране отображаются результаты вычислений в цифровом и графическом виде.



$j = 1...k$, где k - кол-во переходов

Рис. 5.21. Параметры, применяемые при расчете роликового калибра

5.3.4. Изготовление роликовой оснастки

Основные требования к роликовой оснастке приведены в табл. 5.5. При изготовлении профилей с покрытием особое внимание уделяют соответствию размеров калибра чертежу и качеству поверхности роликов. В большинстве

случаев шероховатость поверхности доводится полировкой до 0,4 мкм. В некоторых случаях при серийном производстве используется нанесение на ролики специальных антифрикционных и износостойких покрытий (нитрид титана, хром и др.), позволяющих уменьшить коэффициент трения заготовки с роликом, повысить износостойкость инструмента и обеспечить ряд других преимуществ.

Таблица 5.5

Основные требования к роликовой оснастке

№	Требование	Параметр
1	Марка материала	9ХС, 9Х1, ШХ15
2	Точность рабочего контура	7 квалитет допуска
3	Шероховатость рабочего контура	0,4 мкм
4	Твердость инструмента (HRC)	58..62 ед
	Радиальное (торцевое) биение	не более 0,05 мм

Изготовление основных формующих роликов производится в следующей последовательности:

1. Резка сортового проката или поковок на заготовки (механическая ножовка, пила Геллера);

2. Токарная обработка отрезанных заготовок в габаритный размер ролика, сверление отверстия под вал (универсальный токарный станок типа 16К20);

3. Черновая токарная обработка по рабочему контуру с припуском 0,5 мм на линейные размеры и 0,5 – 1 мм на диаметральные; труднодоступные места обрабатываются без припусков в чистовой размер (универсальный токарный станок типа 16К20);

4. Сверлильные, долбежные и другие слесарные операции;

5. Термическая обработка до твердости поверхности ролика 58..62 HRC;

6. Шлифовка посадочного отверстия под вал (внутришлифовальный станок) и шлифовка торцев ролика (плоскошлифовальный станок);

7. Чистовая обработка наружного контура в центрах на токарных станках

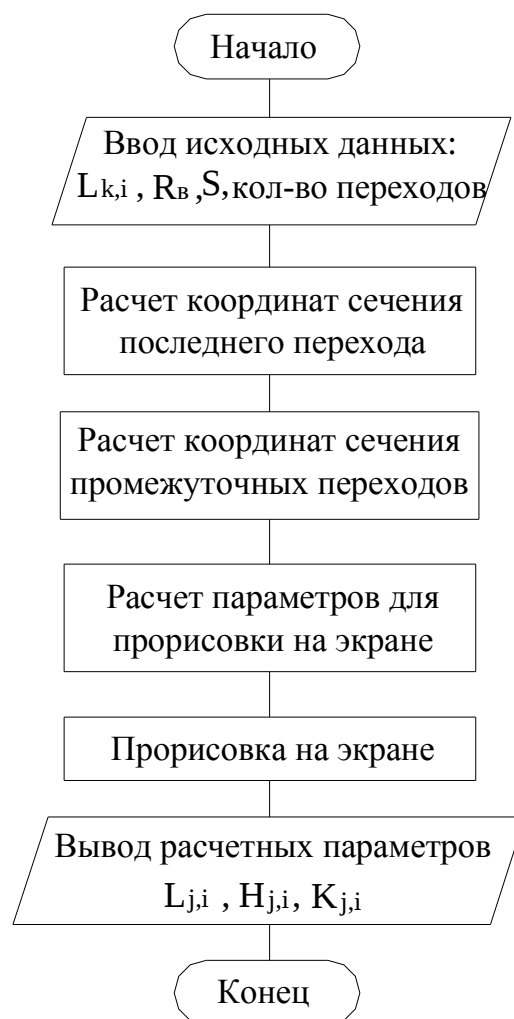


Рис. 5.22. Алгоритм программы для автоматизированного расчета роликовых калибров

(универсальный токарный станок типа 16К20, индикаторная стойка, эльборовый режущий инструмент);

8. Полировка рабочего контура (полировочный станок, наждачная бумага различной зернистости, паста ГОИ, войлок).

При изготовлении инструмента размеры рабочего контура роликов всех переходов контролируются согласно чертежу.

5.4. Отладка процесса формообразования

5.4.1. Выбор и настройка оборудования

В качестве основного (базового) оборудования используется станок ГПС-350М6 (гибочно-прокатный станок с длиной вала 350 мм, с количеством рабочих клеток 6). В зависимости от вида профилей (ширины, толщины развертки профиля, количества технологических переходов) могут использоваться станки того же модельного ряда, начиная от ГПС-200М4 до ГПС-500М12 (где 200 – 500 – максимальная длина вала, 4 – 12 – количество переходов).

Схема станка с обозначениями основных частей приведена на рис. 5.23, перечень основных частей станка приведен в табл. 5.6, основные характеристики станка даны в табл. 5.7.

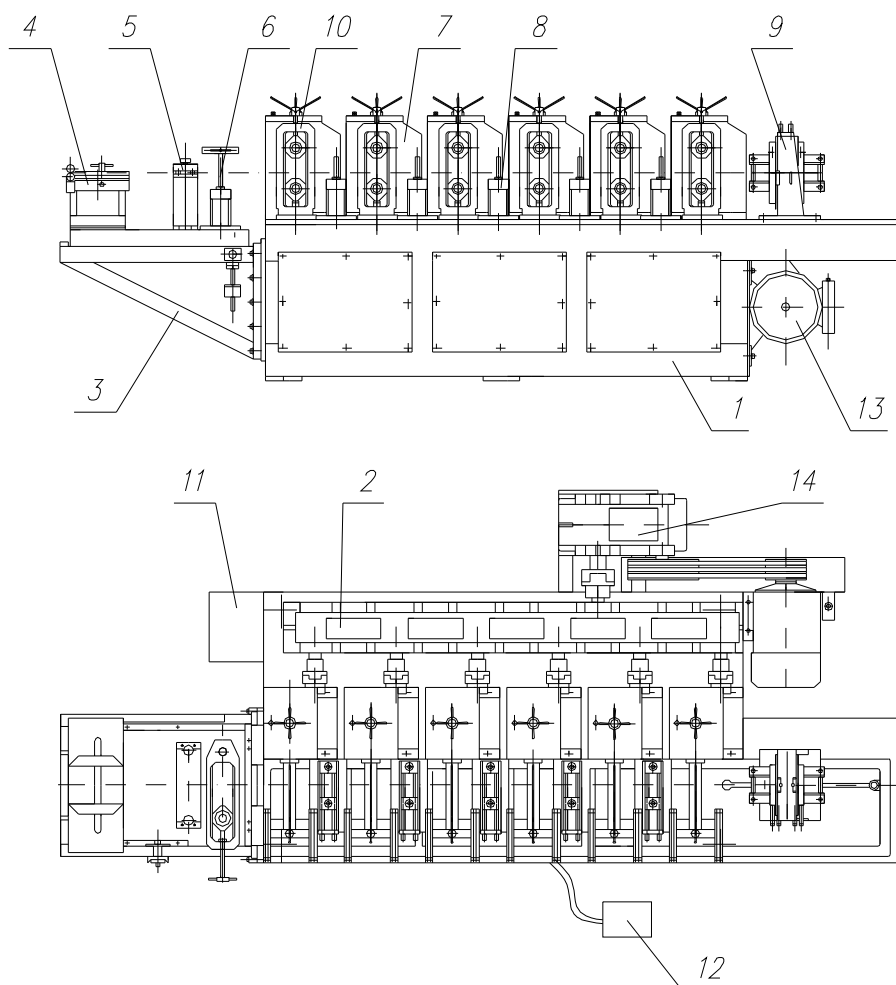


Рис. 5.23. Основные части станка ГПС-350М6

Таблица 5.6

Перечень основных частей станка ГПС-350М6

№ поз	Наименование
1	Станина
2	Коробка распределительная
3	Рама
4	Устройство направляющее
5	Устройство для протирки и смазки ленты
6	Клеть предварительного формообразования
7	Клеть профилирующая
8	Клеть промежуточная
9	Устройство правильное
10	Серьга профилирующей клетки
11	Электрошкаф
12	Пульт управления
13	Электродвигатель
14	Редуктор

Таблица 5.7

Основные характеристики станка ГПС-350М6

Параметр станка	Велич.
Высота поверхности станины над полом, мм	785
Расстояние от поверхности станины до нижнего рабочего вала, мм	155
Наибольшая глубина профилирования, мм	50
Число оборотов рабочих валов, об/мин	25
Скорость профилирования, м/мин ~	8,5
Толщина обрабатываемого материала, мм	0,6 – 2,5
Максимальная ширина заготовки, мм	350
Диаметр рабочих валов, мм	50
Длина рабочей части валов, мм	350
Регулировка верхнего вала клетки профилирующей по вертикали, мм	70
Регулировка нижнего вала клетки профилирующей по вертикали, мм	20
Межосевое расстояние между валами, мм	120–190

5.4.2. Применение дополнительных устройств

Дополнительные устройства и приспособления применяют для предотвращения таких дефектов как НП, КВ, отклонение геометрии профиля; одновременно они осуществляют подгибку элементов профиля, что позволяет уменьшить количество основных переходов (клетей).

Дополнительные устройства (рис. 5.24) можно разделить на предварительные устройства (клетей), стоящие до основных приводных валов, промежу-

точные устройства (клетки), находящиеся между основными валами, и правильные устройства.

Предварительные устройства служат для направления заготовки, предварительной подгибки (рис. 5.24.а) или придания заготовке “направленной потери устойчивости” (рис. 5.24.б). Промежуточные устройства используют для межклетевой подгибки, удержания и направления заготовки (рис. 5.24. в, г).

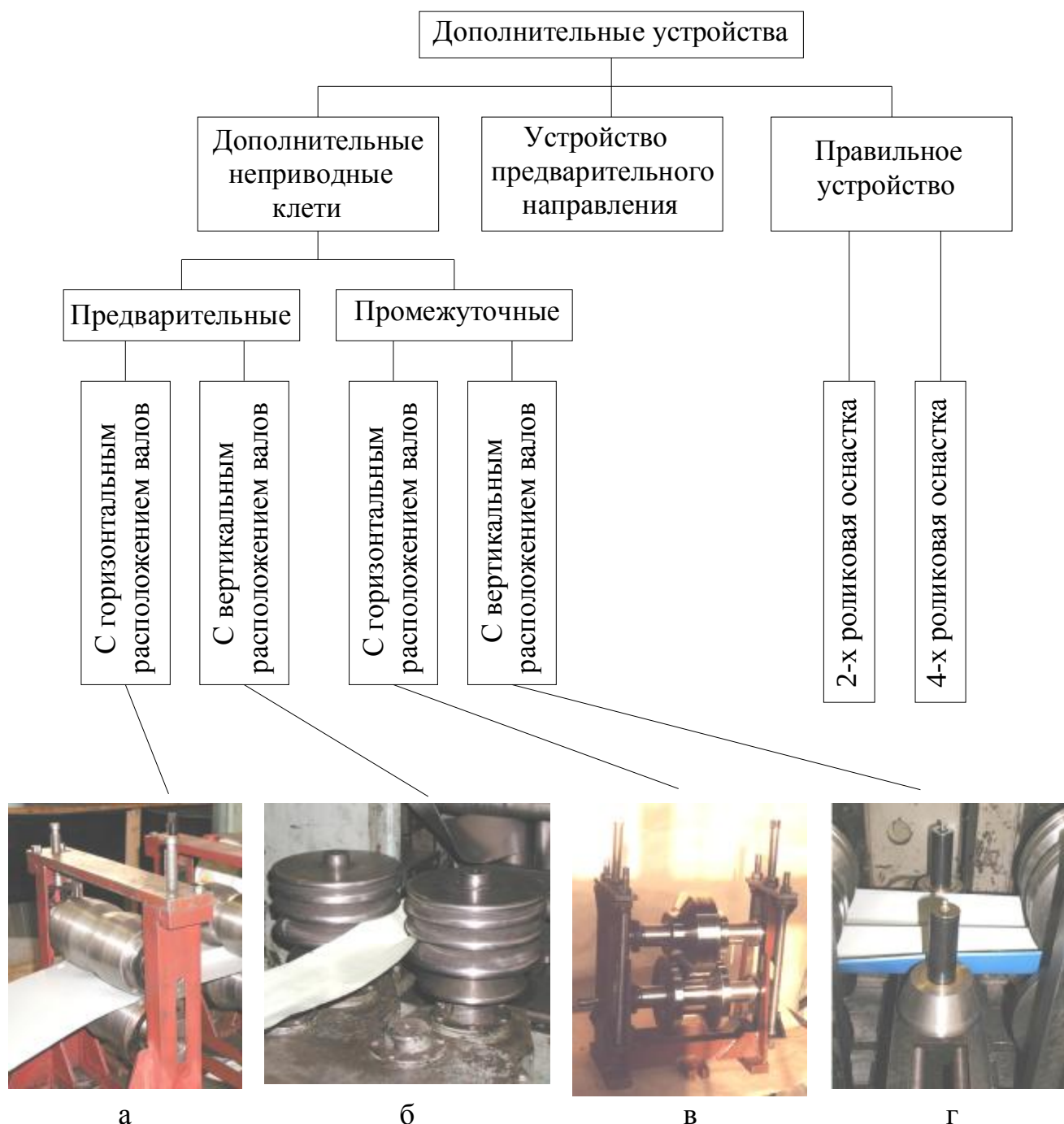


Рис. 5.24. Классификация дополнительных устройств

Особую роль для предотвращения возникновения НП выполняют проводковые пластины, расположенные на промежуточных клетях, которые осу-

ществляют направление заготовки в калибр, предварительную подгибку элементов профиля, уменьшают угол захода края профиля в калибр (рис. 5.25.а). В качестве материала соприкасающейся поверхности используется фторопласт. Кроме того, проводковые пластины могут предотвращать фланирование полки профиля перед входом в калибр (рис. 5.25.б) из-за неравномерных подгибающих сил или утяжек элементов профиля.

Проводковые пластины рекомендуется применять при изготовлении профилей из материала с покрытием при наличии хотя бы одного из условий:

- различие углов подгибки более 25° ;
- угол захода края заготовки перед роликом более $(5 - 7)^{\circ}$;
- зона плавного перехода менее 50 – 70 мм.

Первые два ограничения связаны с углами захода элементов профиля, а последнее ограничение – с неустойчивостью профиля при малых размерах зоны плавного перехода по сравнению с межклетьевым расстоянием станка ГПС (400 мм).



а



б

Рис. 5.25. Проводковые пластины

Проводковые пластины (рис. 5.25.а) применялись при изготовлении профиля “прогон” для ООО “ВАННБОК” (г. Санкт-Петербург).

Применяются также самонастраивающиеся проводковые устройства, расположенные на дополнительных неприводных клетях. Один из упрощенных вариантов такой проводки приведен на рис. 5. 26.

На валу промежуточной клетки 1, который имеет возможность перемещаться в поперечном направлении при помощи винта 2, расположена оправка 3, которая имеет возможность вращаться на валу 1, и предварительно фиксируется на валу 1 при помощи винта 4. К оправке 3 посредством шпильки 5 крепится проводковое устройство, состоящее из основы 6, фторопластовой проводковой пластины 7 и крепежных винтов 8. Проводковая пластина 7 имеет рабочую часть, которая может быть выполнена в виде треугольной выточки А с углом 60° и внутренним радиусом $R = 1,2$ мм.

Проводка может использоваться для профилей, которые в промежуточных переходах имеют следующие сечения:

- угол сгиба между отбортовкой и стенкой составляет от 0 до 60° ;
- угол подгибки стенки находится в пределах от 0 до 45° .

Проводка работает следующим образом: устройство крепится между рабочими клетями станка по возможности ближе к следующему переходу. Край профиля упирается в радиус R выточки A . Ослабляется винт 4 и шпилька 5. При помощи винта 2 устройство прижимают к краю профиля исходя из следующих условий:

- стремятся, чтобы угол захода полок профиля после проводки был близок к нулю;
- недопустимо излишнее перегибание стенки профиля, что может вызвать потерю устойчивости элементов профиля.

Процесс самоустановки проводки осуществляется следующим образом: после прижатия винтом 2 проводка занимает оптимальное положение (в статическом режиме), как в вертикальном так и в продольном направлениях, последнее очень важно с точки зрения обеспечения плавности перемещения края профиля между переходами. В начале прокатки происходит самонастройка проводки, после чего она фиксируется при помощи винта 4 и шпильки 5. Для обеспечения плавного контакта проводки и заготовки форма выточка A в перпендикулярной плоскости должна по возможности иметь форму близкую к форме полки в зоне плавного перехода.

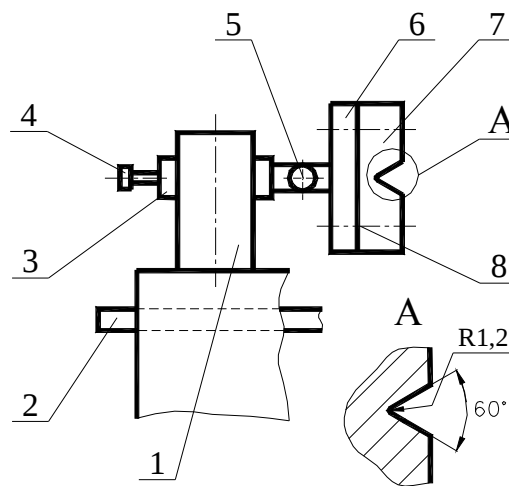


Рис. 5.26. Упрощенная конструкция самонастраивающейся проводки: 1 – вал промежуточной клетки; 2 – винт перемещения вала; 3 – оправка; 4 – винт крепления оправки; 5 – шпилька; 6 – подложка проводки; 7 – проводка; 8 – винты крепления

Приведенная межклетьевая проводка позволяет уменьшить угол захода края профиля в последующий переход, снижая, таким образом, величину контактных сил в основном переходе. Однако контакт профиля с роликом все равно имеет место, что особенно опасно для наружных зон сгиба профиля.

Для предотвращения нарушения покрытия заготовки в наружных местах сгиба, снижения трудоемкости отработки технологии и удобства настройки спроектирована и изготовлена торцевая проводка [152] (рис. 5.27).

Устройство устанавливают вместе с формующими роликами 1, в калибре которых размещена заготовка 2, на рабочие валы 3 через регулировочные втулки 4. Оно содержит опоры 5 (верхнюю и нижнюю – одной и той же конструкции), устанавливаемые на валы клетки через бронзовые вкладыши 6. В опоре размещен механизм регулировки положения вертикальной оси, включающий пружину 7 для возврата цилиндрической ползушки 8, в которой крепится конец вертикальной оси, пробку-направляющую 9 с резьбовым отверстием и регулировочный винт 10, имеющий такую же резьбу, как в пробке-направляющей. Концы вертикальной оси 11, на которой установлены функциональный ро-

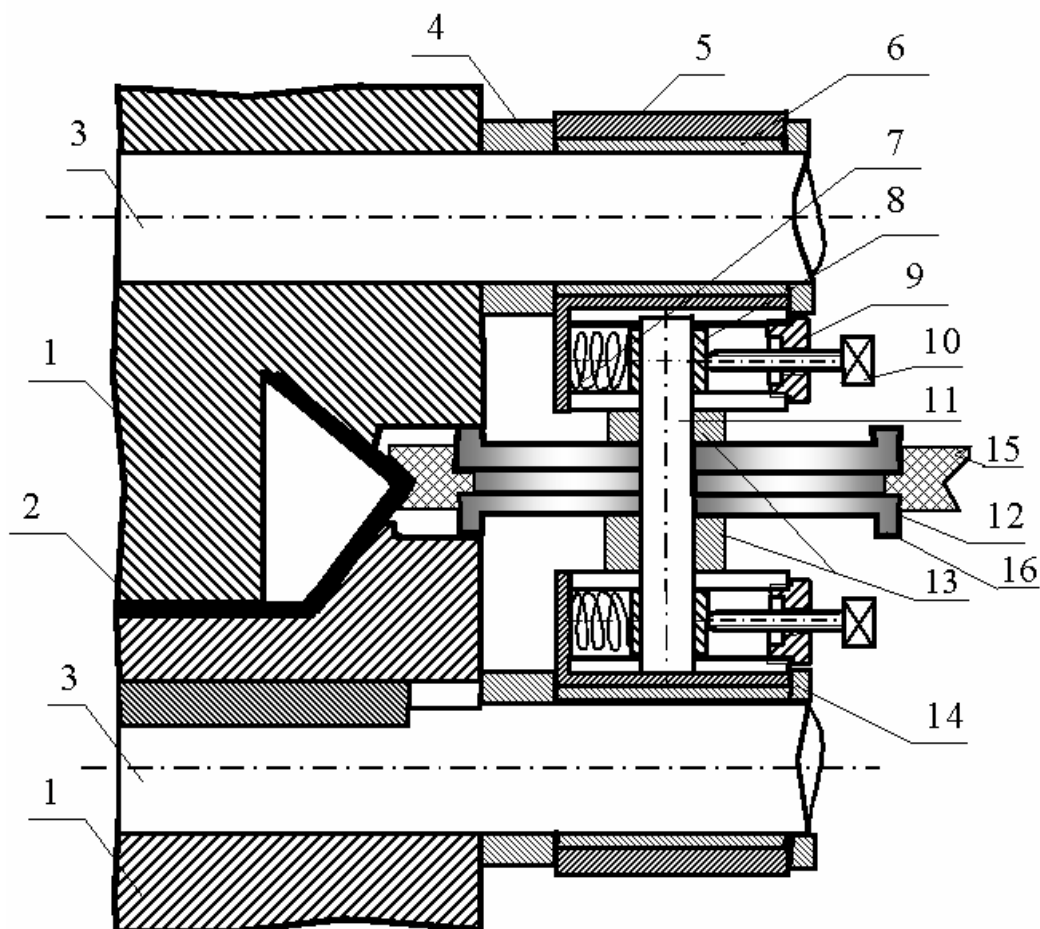


Рис. 5.27. Торцевая проводка: 1 – формующие ролики, 2 – заготовка, 3 – рабочие валы, 4 – регулировочные втулки, 5 – опоры, 6 – бронзовые вкладыши, 7 – пружина, 8 – цилиндрические ползушки, 9 – направляющая пробка, 10 – регулировочный винт, 11 – вертикальная ось, 12 – функциональный ролик, 13 – дистанционные втулки, 14 – регулировочные втулки, 15 – эластичный бандаж, 16 – реборды

лик 12 и дистанционные втулки 13, размещены в ползушках 8 верхней и нижней опор.

Цельный функциональный ролик имеет эластичное покрытие (бандаж) 15 на его рабочих частях, а на торцевых поверхностях – круговые реборды 16 в периферийной части.

Установку устройства и его регулировку осуществляют в следующей последовательности. После размещения на рабочих валах клетки 3 нижнего и верхнего формующих роликов 1 на вертикальную ось 11 проводки устанавливают функциональный ролик 12 и дистанционные втулки 13, а концы оси 11 устанавливают в цилиндрические ползушки 8 опор 5. На рабочие валы помещают внешние регулировочные втулки 14, устанавливают замыкающую серьгу без силового замыкания. Регулировочными винтами 10 производят настройку, перемещая вертикальную ось в плоскости осей симметрии рабочих валов, после чего производят силовое замыкание калибра с помощью регулировочного винта замыкающей серьги и винта разведения валов клетки (условно не показаны).

При работе станка с установленными на нем торцевыми проводками за счет сил трения формирующие ролики 1 приводят в движение функциональный ролик 12. Поступающая в калибр заготовка 2 поджимается со стороны функционального ролика эластичной средой бандажа по наружной поверхности зоны сгиба. При этом создаются условия “мягкого” контакта между инструментом и заготовкой и условия снижения/устранения касательных контактных напряжений.

Наличие реборд позволяет избежать проскальзывания ролика, что уменьшает величину трения скольжения. Наличие эластичной среды на рабочих частях функционального ролика обеспечивает благоприятные условия деформирования; все это создает условия для бездефектного формообразования угловой зоны и исключения повреждения покрытия заготовки.

Для подгибки полок профиля в пределах от 45° до 90° , с целью уменьшения контактных сил, действующих в основных горизонтальных валках, а также для спрямления полок профиля, имеющих предварительную поперечную кривизну, может быть применена межклетевая проводка приведенная на рис. 5.28. Ее особенность заключается в использовании полиуретановой втулки, расположенной с лицевой поверхности профиля, обеспечивающая т.н. “мягкий контакт” при подгибке или спрямлении полки, что особенно актуально при изготовлении профилей из материала с покрытием. Наличие наклона валов промежуточной клетки позволяет избежать применения конусных поджимных роликов, имеющих различную скорость скольжения по образующей стороне ролика.

Межклетевая проводка (см. рис. 5.28) крепится на промежуточной клетки 1, имеющей возможность наклона вала 2, на которой посредством подшипников 3 насажена втулка 4 и полиуретановая втулка 5. Для крепления втулок используются крышки 6. Придерживающая втулка 7 расположена на дополнительном валу 8, который посредством серьги 9 крепится к не приводному валу 2. Для прижима втулок к профилю используется поджимной винт 10 и поджимная вилка 11.

При работе устройства полки профиля 12 располагаются между втулками 4 и 7, где происходит их подгибка (формовка), причем с лицевой стороны про-

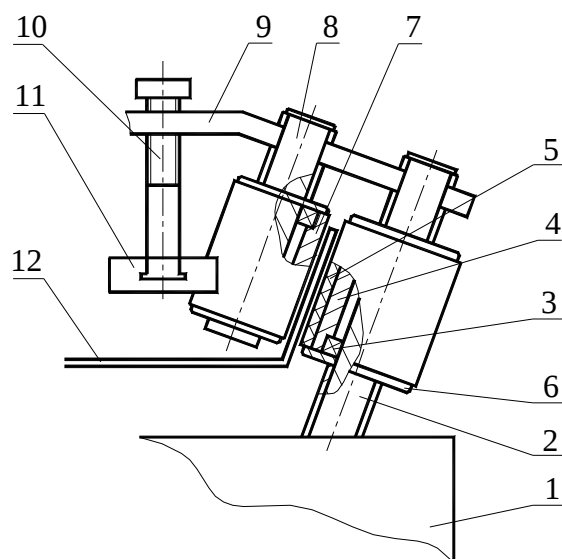


Рис. 5.28. Межклетевая проводка с наклонными валами: 1 – промежуточная клеть, 2 – не приводной вал, 3 – подшипник; 4 – втулка; 5 – полиуретановая втулка; 6 – крышка, 7 – поддерживающая втулка, 8 – дополнительный вал, 9 – серьга, 10 – поджимной винт, 11 – вилка, 12 – профиль

филя расположена полиуретановая втулка 5. Прижатие втулок к профилю и регулировка силы прижатия осуществляется вилкой 11 посредством винта 10.

В представленной конструкции проводки при формовке профиля основные подгибающие (формующие) силы прикладываются со стороны полиуретановой втулки, а втулка 7 выполняет роль поддержки.

5.4.3. Смазочные устройства

Уменьшить величину касательных напряжений на поверхности заготовки и, соответственно, снизить вероятность НП позволяет применение смазочных жидкостей (СЖ), а из дополнительных устройств – применение на станке смазочных устройств и приспособлений.

В зависимости от вида производимого профиля на станке ГПС применяют нанесение СЖ на заготовку или на инструмент (рис. 5.29).

Нанесение СЖ на заготовку окунанием (рис. 5.29.а) или протиркой (рис. 5.29.б) универсально и применимо при изготовлении практически любых профилей.

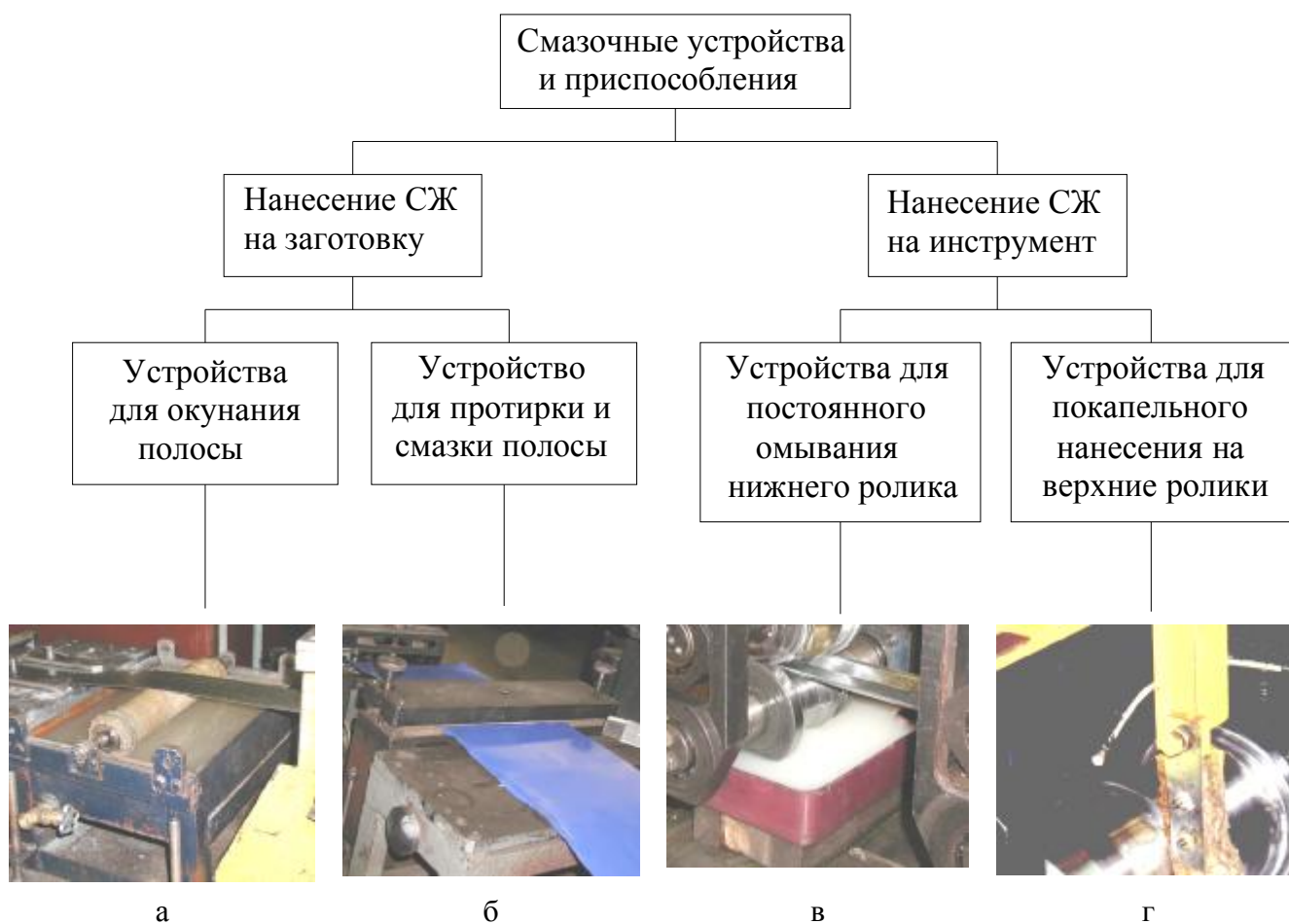


Рис. 5.29. Классификация смазочных устройств и приспособлений

Для нанесения СЖ на инструмент используют постоянное омывание роликов СЖ или нанесение СЖ капательным способом. Для постоянного омывания роликов под нижние ролики ставят емкости со СЖ (рис. 5.29.в) и, вращаясь, они переносят жидкость как на заготовку, так и на верхний ролик. Такой способ применяют при изготовлении профилей, где основные давления на заготовку происходят со стороны нижних роликов (швеллерные, С-образные, козырьчатые профили). Недостаток данного способа заключается в большом расходе СЖ и в необходимости сушки профилей (пока СЖ не сольется) после изготовления. При использовании широких профилей данный вариант не экономичен, поскольку требует большого количества СЖ. К широким профилям (софит, сайдинг, автофальц) приложение контактных давлений осуществляется не по всей поверхности, а только в определенных зонах, к тому же декоративная сторона панели расположена сверху и менее омываема. В таких случаях используют распределительную систему смазки, где СЖ подается в определенные наиболее подверженные НП места (рис. 5.29.г). Преимущества такой системы смазки заключается в экономичном расходе СЖ, что позволяет применять жидкость с более высокими смазывающими свойствами. Другой особенностью данной системы смазки является применение протирок из войлока, которые наряду с постоянной смазкой позволяет убирать с инструмента (в случае наличия) частицы покрытия, а также полировать ролик при работе станка.

Вид применяемой смазочной жидкости зависит от типа профилей, вида покрытия, а также технологических режимов, к которым относятся интенсивность подгибки и взаимодействие заготовки с инструментом, скорость профилирования и др.

Применение СЖ целесообразно при любых режимах профилирования, особенно при серийном производстве и высоких скоростях процесса формообразования. Применение смазочных систем необходимо рассматривать в комплексе с другими способами предотвращения НП.

Смазки на мыльной основе являются самыми дешевыми, но не всегда обеспечивают достаточное качество смазки. Были проведены испытания по применению смазочных систем на основе минерального масла И-20, моющего средства Fairy и водорастворимых смазок. Минеральное масло сложно в удалении с готовой детали, а "Fairy" химически взаимодействует с покрытием, образуя, например, на цинковом покрытии белые матовые пятна. Поэтому они непригодны для изготовления профилей с покрытием.

На предприятии ОАО "Ульяновский НИАТ" коллективом НПК-100 были проведены испытания водорастворимых смазок типа "Синерс-В" производства ФГУП "НИИ Полимеров" г. Дзержинск Нижегородской области. Испытания проводились с целью определения возможности применения дешевых водорастворимых смазок в процессах изготовления профилей холодной гибкой прокаткой, влияния состава смазок на материал профилей и оснастки. Смазки испытывались при прокатке профилей из стали 08кп, оцинкованной стали, оцинкованной и окрашенной стали (полиэфир RAL7001). Смазка наносилась вручную как на рулонную заготовку, так и на гибочные ролики.

На поверхности ленты смазка не создает равномерной пленки, собирается в хаотично расположенные капли. В процессе гибки смазка распределяется достаточно равномерно по сечению профиля, полностью решает задачи по снижению трения на уровне минеральных смазок. Состояние профилей и оснастки контролировалось на 3 – 5 день после прокатки. Смазка не удалялась. Результаты испытания приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8

Результаты испытания водорастворимых смазок типа “Синерс-В”

Наименование	Профиль (сталь 08кп без покрытия)	Профиль (покрытие горячее цинкование)	Профиль (покрытие полиэфир цвет по RAL7001)	гибочные ролики, материал 9ХС (объемная закалка, шлифовка, полировка)
Смазка синтетическая, эфирная, водорастворимая, марки Синерс – В" СВГ	коррозия	нет	нет	коррозия
Смазка технологическая, водорастворимая марки "Синерс – В" СВ ПФ лабораторный образец №25	следы коррозии	нет	нет	коррозия
Смазка технологическая, водорастворимая марки "Синерс – В" СВ ПП лабораторный образец №24	следы коррозии	нет	нет	следы коррозии
Смазка пластичная водорастворимая "Синерс - В"	нет	нет	нет	следы коррозии
Водный раствор 40% "Синерс - В" СВ ПП 60% вода	нет	нет	нет	нет
Водный раствор 30% "Синерс - В" СВ ПП 70% вода	нет	нет	нет	нет
Водный раствор 20% "Синерс - В" СВ ПП 80% вода	нет	нет	нет	нет

Выводы по результатам испытания водорастворимых смазок типа “Синерс-В”:

1. Антифрикционные свойства смазок хорошие, на уровне минеральных масел.
2. Технологические свойства – предпочтительно уменьшить вязкость для оптимизации нанесения и удаления смазки.
3. Антикоррозионные свойства – улучшить.
4. Для применения в процессах холодной гибки прокаткой может быть рекомендована водная смесь следующего состава: 25 – 30% смазки

"Синерс-В" СВ ПП, лабораторный образец № 24 и 70 – 75% воды.

В табл. 5.9. приведены наиболее применимые смазки в зависимости от способа подачи СЖ.

Таблица 5.9

Выбор системы смазки

Способ нанесения СЖ	Толщина заготовки, мм	Покрытие заготовки	Вид профиля	Тип смазочной жидкости
Окунание полосы	0,5 – 1,0	Zn, ПП	Сайдинг, доборные элементы, швеллерные, корытные профили	-мыльный раствор; - водорастворимые смазки
Протирка полосы	1,0 – 2,0	Zn	Швеллерные, корытные, армирующие профили	- эмульсии; - масла (растительные);
Смазка нижних роликов омыванием	0,5 – 2,0	Zn, ПП	Профили сложной конфигурации	- водоэмульсионные смазки
Капельная система	0,5 – 2,0	Zn, ПП	Широкие профили с наличием отдельных зон больших деформаций	- силиконовые смазки

5.4.4. Доработка калибров

Доработка калибров необходима для снижения контактных давлений и предотвращения НП в наиболее опасных местах контакта инструмента с заготовкой без изменения габаритных размеров профиля, в случае, когда на стадии проектирования не были учтены эти моменты. Нужно отметить, что, варьируя величину допуска на номинальные размеры профиля, можно значительно снизить величину контактных давлений.

К доработкам калибра можно отнести: введение дополнительных углов, освобождение прилегающих зон [144] (рис. 5.30 - 5.31).

Введение дополнительных углов g (рис. 5.30) применяют для увеличения плавности захода заготовки, устранения зон излишнего проскальзывания и снижения величины максимальных контактных давлений на профиль. Доработка универсальна и применяется как при небольших углах захода торца профиля, так и при сравнительно больших углах b (точка 1), для устранения контакта торца после выхода из калибра с крайней точкой ролика (точка 2). Данная доработка особенно ощутима при расположении на торцах профиля ЭДТ. В другом случае, когда часть профиля уже отформована в предыдущих переходах,

для предотвращения излишнего контакта вводят дополнительные углы (рис. 5.31.а) или дополнительные проточки (рис. 5.31.б).

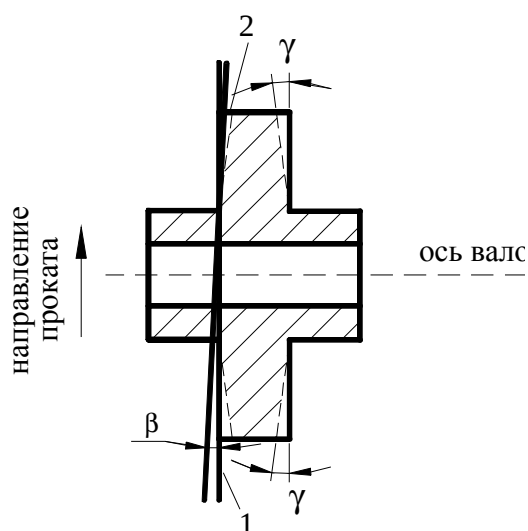


Рис. 5.30. Введение дополнительных углов γ на верхнем ролике при формировании полок с углами подгибки более 90°

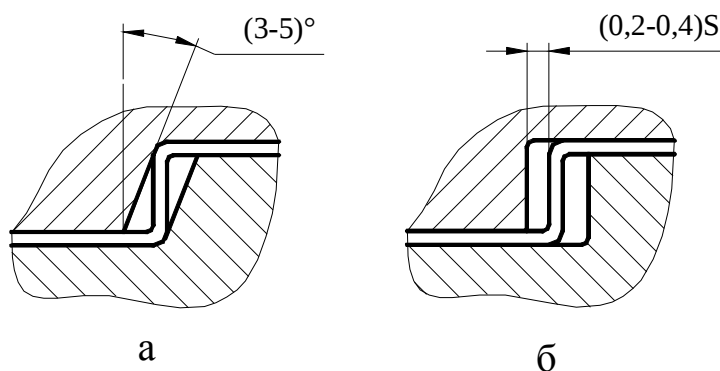


Рис. 5.31. Освобождение прилегающих к профилю зон ролика: а – введение дополнительных углов, б – дополнительная проточка

Дополнительные проточки вводят и при формовке рифтов. Как правило, их формовка осуществляется на первом переходе, на остальных переходах зоны, прилегающие к рифтам, освобождают (рис. 5.32). Освобождают зоны и увеличивают зазор в калибре также при формовке ЭДТ (рис. 5.33).

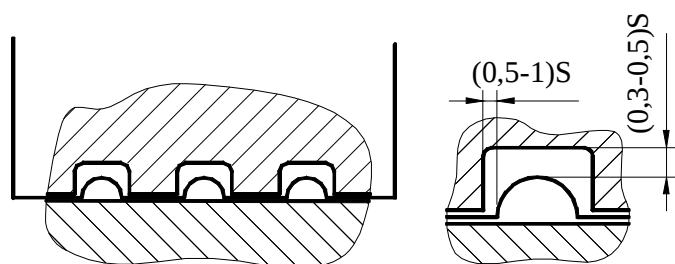


Рис. 5.32. Освобождение участков ролика, прилегающих к рифту

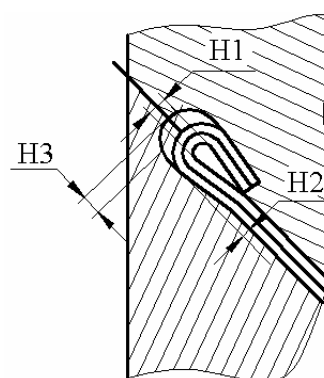


Рис. 5.33. Освобождение участков ролика, прилегающих к ЭДТ

Как отмечено ранее, при формовке ЭДТ для уменьшения контактных давлений и деформаций ЭДТ формуют не полностью. Для этого освобождают зоны, прилегающие к ЭДТ, на величину H_2 (рис. 5.33); при этом образуется зазор $H_1 = 2H_2$. В некоторых случаях вводят зазор H_3 с края профиля. Нужно от-

метить, что размеры профиля не должны выходить за пределы допуска, но даже величина зазора $H_1 = 0,2 - 0,25$ мм (для $S = 0,6$ мм) позволяет уменьшить контактные давления в (1,5 – 2) раза (см. рис. 2.10).

Снизить контактное давление позволяет формовка профилей с углами, отличными от 90^0 всего на $(1-2)^0$. Один из способов устранения упругого пружинения приведен на рис. 5.34. Угол пружинения рассчитывают, исходя из свойств исходного материала и технологических параметров процесса. Применение такого калибра позволяет увеличить зону контакта заготовки с инструментом и таким образом снизить контактные давления. При этом ролик желательно делать составным (сборным).

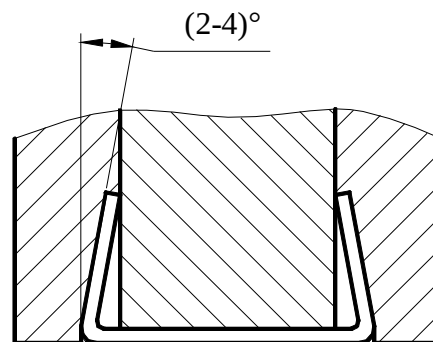


Рис. 5.34. Уменьшение контактных давлений с одновременным устранением пружинения

5.5. Алгоритм разработки технологии изготовления профилей с покрытием

Разработка технологии изготовления различных профилей с покрытием методом интенсивного деформирования связана с учетом технических и экономических факторов. На рис. 5.35 приведен укрупненный алгоритм разработки технологии изготовления профилей из материалов с покрытием, охватывающий все этапы, от проектирования технологических переходов до стадии получения готового профиля.

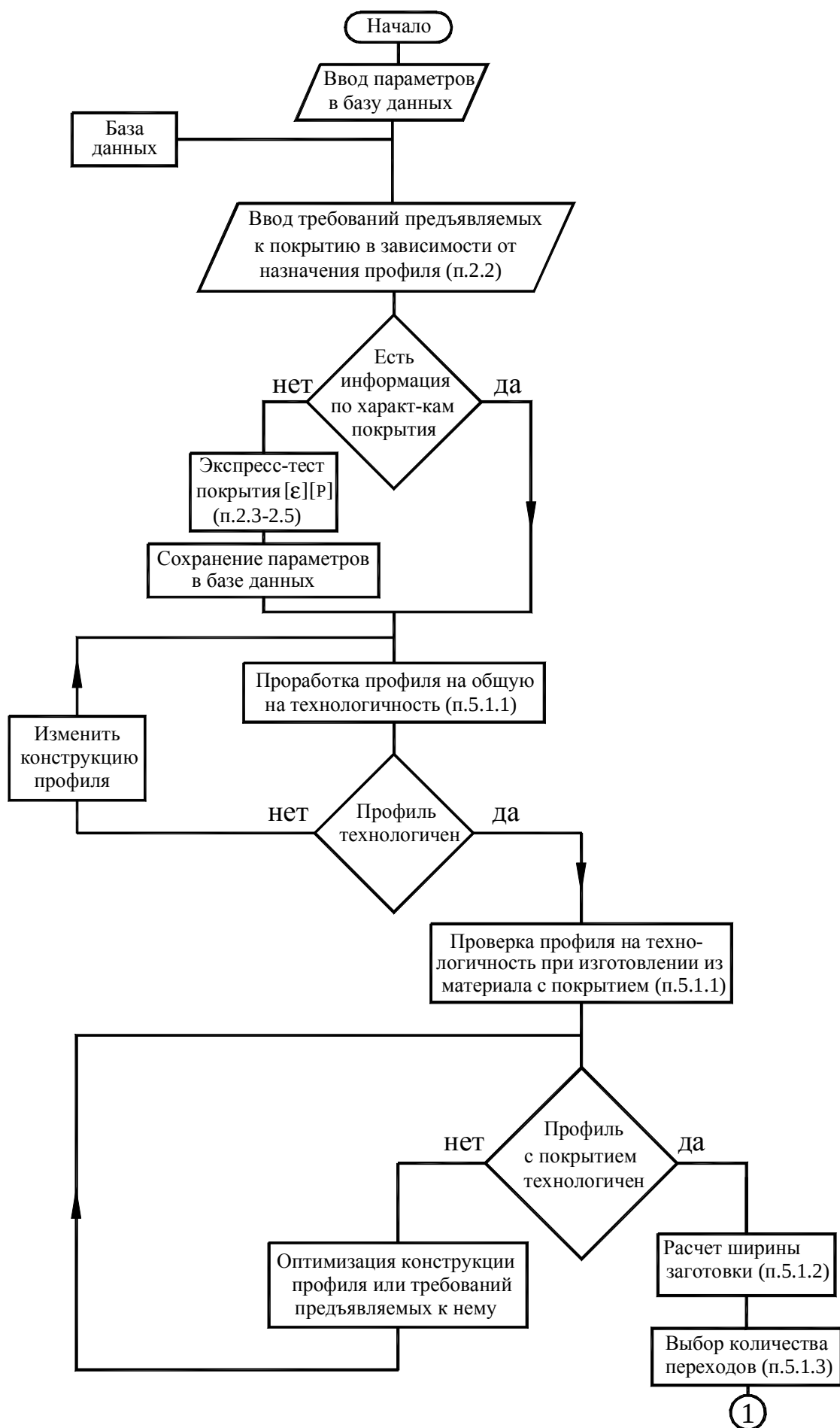
Алгоритм состоит из укрупненных блоков (этапов). На первом этапе осуществляется ввод параметров в базу данных или использование уже имеющихся данных. В случае отсутствия необходимых данных по характеристикам покрытия проводят испытания покрытия.

На втором этапе осуществляют проработку профилей на общую технологичность, используя рекомендации источников [153, 154] и на технологичность изготовления профилей из материала с покрытием. Если профиль не технологичен, то изменяют (оптимизируют) его конструкцию.

На третьем этапе осуществляют расчет или выбор технологических параметров процесса (расчет ширины заготовки, выбор количества переходов, системы формовки уголкового зон, вида калибра, формы и величины скругления на буртах).

На четвертом этапе осуществляют теоретический расчет контактных давлений на поверхности заготовки и сравнивают с допустимыми контактными давлениями для покрытия. В случае превышения контактных давлений осуществляют оптимизацию схем формовки или конструкции формирующих роликов.

На 5-м этапе изготавливают технологическую оснастку и осуществляют опробование (изготовление) профиля "в металле". В случае наличия дефектов



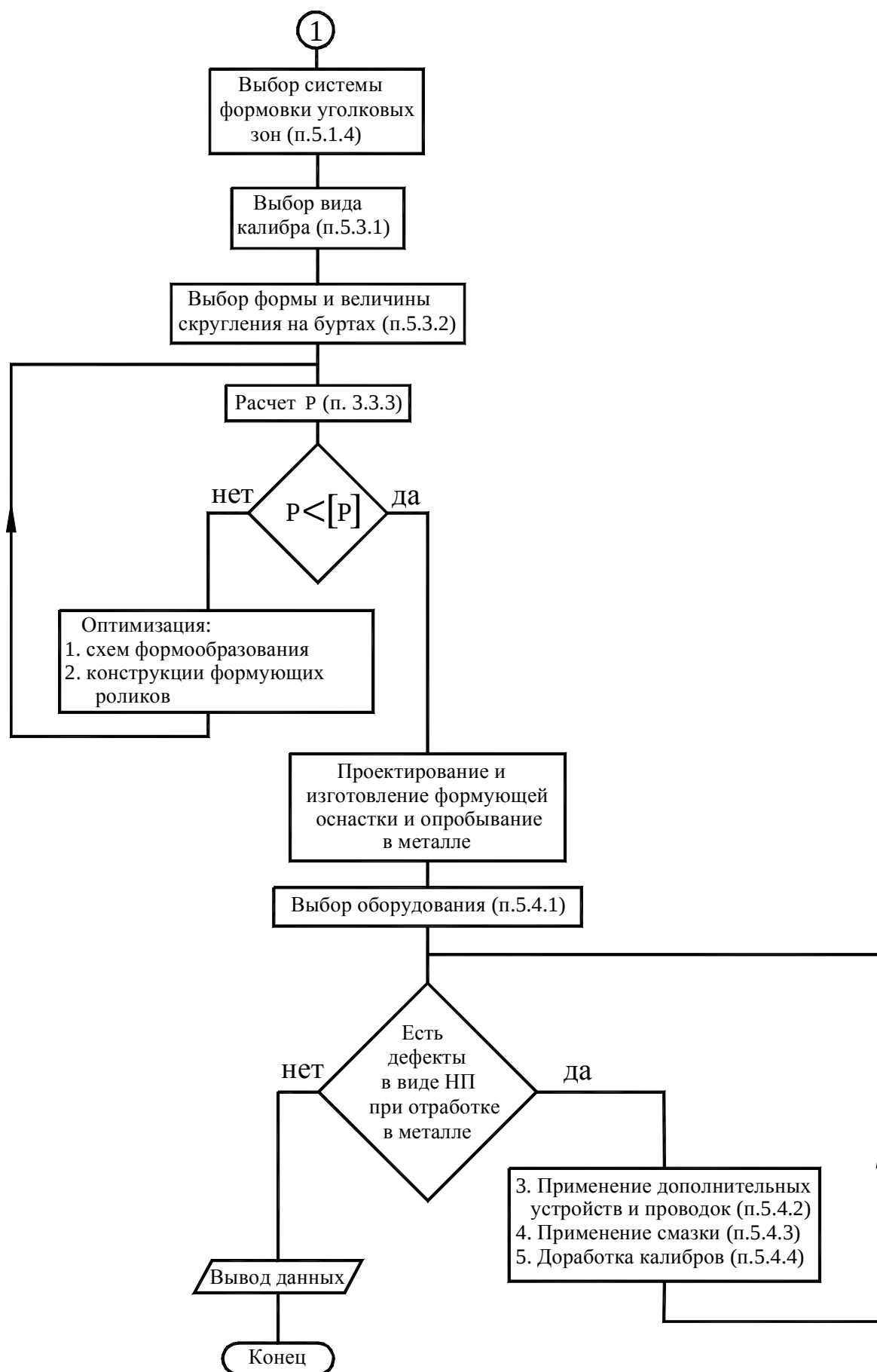


Рис. 5.35. Алгоритм разработки технологии изготовления профилей с покрытием

НП применяют дополнительные способы устранения НП (применяют дополнительные устройства и проводки, устройства смазки, осуществляют доработку калибра).

В алгоритме (рис. 5.35) при расчете или выборе необходимого параметра даны ссылки на пункты в соответствующих разделах книги.

Общие технологические рекомендации:

1. Покрытие на заготовке должно быть применимо для деформирования и проверяться на входных испытаниях:

- испытанием на изгиб;
- испытанием на контактное воздействие.

2. Возможность применение материала с цинковым или полимерным покрытием для изготовления различных видов профилей указано в табл. 5.10.

3. При разработке технологических схем необходимо стремиться к уменьшению контактных воздействий со стороны инструмента:

- избегать углов подгибки на 90^0 (например, назначением углов 88^0 , 92^0);

- назначать величину внутренних радиусовгиба профиля не менее полученных при входных испытаниях на изгиб.

- использовать постепенное уменьшение радиусагиба профиля по переходам (для Пл, ПУ, Zn покрытий на первых 2 – 3 переходах).

4. При разработке роликовых калибров необходимо:

- назначать уклоны величиной $1 - 2^0$ на вертикальных участках или зоны освобождения величиной $(0,2 - 0,3)S$;

- освобождать отформованные участки профиля (рифты, ЭДТ и др.) на величину $(0,3 - 0,5)S$ от излишнего контакта с инструментом;

- применять для профилей с краевыми ЭЖ роликовые калибры с наклонными участками.

5. При изготовлении роликовой оснастки:

- строго соблюдать размеры и допуска указанные на чертежах;
- доводить шероховатость рабочей поверхности роликов до величины не более $0,4 \text{ мкм}$;

6. При установке роликов на станок необходимо строго соблюдать инструкцию по установке и наладке роликовой оснастки, при этом необходима особенно тщательная настройка линии профилирования.

Что касается скоростных режимов при изготовлении профилей с покрытием методом интенсивного деформирования, то скорость профилирования назначается в пределах $8 - 20 \text{ м/мин}$, что связано как со временем, необходимым для релаксации полимерных составляющих покрытия при деформировании, так и для времени “установления” заготовки между переходами. При скоростях больших, чем указано выше, возникают ударные воздействия со стороны инструмента на покрытие, что может привести к нарушению покрытия. Данное значение скорости применяется на всех станках, производимых ОАО “УлНИ-АТ”.

Таблица 5.10

Возможности применения цинковых и полимерных покрытий на листовых материалах при изготовлении профилей различного поперечного сечения

Покрытие	Виды профилей							
	Швеллерные и С-образные профили (профили простой конфигурации) с толщиной подложки S					Профили с ЭЖ (профили сложной конфигурации)		
	S=0,5	S=1,0	S=1,5	S=2,0	S=2,5	S=0,5	S=1,0	S=1,5
Цинковое								
- горячеоц-е	+	+	+	+	+	+	+	+
- электролит.	+	+	+	-	-	+	+	-
Полимерное								
- полиэфировое	+	+	+			+/-	-	-
- полиуретановое	+	+	-			+	+	-
- пластизольное	+	+	-			+	+	-

Среди отличительных возможностей профилирования заготовок с покрытием по сравнению с изготовлением без покрытия можно отметить следующие:

1. Формовка угловых зон профиля по переходам с переменным радиусом;
2. Применение роликового инструмента с отличительными параметрами такими как:
 - увеличенные радиусы на криволинейных поверхностях инструмента;
 - применение уклонов и зон освобождения;
3. Применение различных смазочных систем;
4. Ограничение толщины исходной заготовки.

В качестве рекомендаций по нанесению покрытий на исходную заготовку можно указать следующие:

1. Полное соблюдение всего технологического процесса при нанесении покрытия (подготовки, обезжиривание и др.);
2. Повышение адгезионных и когезионных свойств покрытия;
3. Повышение пластичности и прочности покрытия.

Среди требований, которые предъявляются к покрытию, можно отметить:

1. Соответствие характеристик покрытия всем требованиям ГОСТ или ТУ, по которому оно наносится (соответствие толщины, адгезионных характеристик, декоративных свойств и др.);
2. Стойкость покрытия к контактным воздействиям и деформациям изгиба (проверяется в дополнительных испытаниях).

Выводы

1. Выявленные технологические требования к конструкции профиля с покрытием (внутренние радиусыгиба профиля, размеры отбортовок, толщина исходной заготовки) позволяют оценивать технологичность при анализе профилей с покрытием на предмет их изготовления в роликах методом интенсивного деформирования.

2. Анализ систем калибровки и способов формовки позволил определить в качестве основной при изготовлении профилей с покрытием параллельную систему калибровки с переменным радиусом зоны сгиба по переходам, в зависимости от прочности покрытия.

3. Приведены конкретные схемы изготовления профилей различного поперечного сечения.

4. Дан анализ по применению различных калибров для типовых профилей с покрытием и предложены теоретически обоснованные изменения формы буртов роликов для получения качественного профиля. Для формовки профилей с краевыми ЭДТ обосновано применение калибров с коническими посадками, что позволяет предотвратить нарушения покрытия на участках двойной толщины.

5. Указаны технологические особенности при изготовлении профилей с элементами жесткости, приведены основные схемы их формовки и дан их анализ с точки зрения предотвращения нарушения покрытия.

6. Даны рекомендации по доработке роликовых калибров для предотвращения излишнего контакта с заготовкой с целью предотвращения возникновения дефекта нарушения покрытия.

7. Разработанная программа на языке программирования BASIC позволяет ускорить процесс расчета роликового калибра при проектировании оснастки для профилей различного поперечного сечения.

8. Проведенные испытания по применению различных смазочных жидкостей при изготовлении профилей с покрытием позволили выработать соответствующие рекомендации с целью уменьшения вероятности нарушения покрытия.

9. Разработаны, изготовлены и внедрены в серийное производство проводковые устройства скольжения и системы смазки, позволяющие избежать дефектов нарушения покрытия.

10. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований, а также приведенных технологических рекомендаций представлен алгоритм разработки изготовления профилей с покрытием для создания эффективной технологии производства гнутых профилей МИД.

ГЛАВА 6

ВНЕДРЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ

6.1. Характеристики изготавливаемых профилей с покрытием

Характеристика и анализ исходных материалов приведены в первой главе данной книги.

6.1.1. Требования к гнутым профилям с покрытием

Гнутые профили изготавливают длиной от 1 до 12 м. Предельные отклонения по длине не должны превышать ± 2 мм на 1 м длины. Предельные отклонения по толщине должны соответствовать предельным отклонениям по толщине заготовки нормальной точности проката по ГОСТ 19904. Предельные отклонения не распространяются на отклонение по толщине профиля в местах изгиба. Размерные и другие параметры должны соответствовать чертежу готового профиля.

Общие требования, предъявляемые к качеству гнутого профиля [88]:

- поперечное сечение профиля должно соответствовать чертежу профиля;
- серповидность профилей не должна превышать 1 мм на 1 метр длины; общая серповидность не должна превышать произведения допускаемой серповидности на 1 метр на длину профиля в метрах;
- продольный прогиб профилей не должен превышать 1 мм на 1 метр длины; общий продольных прогиб не должен превышать произведения допускаемого прогиба на 1 метр на длину профиля в метрах;
- скручивание профиля вокруг продольной оси не должно превышать произведения 1^0 на длину профиля в метрах, но не более 10^0 ;
- волнистость кромки не должна превышать 1 мм;
- трещины на торцах и по длине профиля не допускаются;
- профили должны быть обрезаны под прямым углом, отклонение от перпендикулярности реза к оси профиля не должно выводить профиль за номинальные размеры по длине.

Качество покрытия зависит от назначения профиля и требований, предъявляемых к профилю (п.2.2).

В случае отсутствия этих данных должны выполняться следующие требования:

- качество ЛКП по показателям внешнего вида должно быть не менее III – V класса по ГОСТ 9.032-74;
- в местах, примыкающих к торцам профиля, допускается уменьшение толщины Zn покрытия и отслоение ЛКП на расстоянии не более 0,3 – 0,5 мм;

- адгезия ЛКП должна быть не более 1 балла по ГОСТ 15140, проверенная методом обратного удара с использованием липкой ленты на приборе У-1 (У-1А);
- на поверхности цинкового и лакокрасочного покрытий допускаются потертости, риски, следы формообразующих валков не нарушающие сплошности покрытия [55, 155];
- в местах изгиба лакокрасочных покрытий не допускаются микротрещины, видимых через лупу $10^{\times}$ [55, 155];
- допускается уменьшение толщины цинкового покрытия на поверхности профиля на (10-20)% в зависимости от класса покрытия, полученной по ГОСТ 14918-80, но не меньше установленных значений для рассматриваемого класса покрытия;
- на поверхности плакированного материала допускается уменьшение толщины плакированного слоя на глубину не более половины его начальной толщины [80].

6.1.2. Методы контроля

Марка и свойства исходного материала должны быть удостоверены документом о качестве предприятия-изготовителя.

Контроль линейных размеров профилей, серповидность и продольный изгиб проводят измерительным инструментом: рулеткой по ГОСТ 7502, металлической линейкой по ГОСТ 427, штангенциркулем по ГОСТ 166. Допускается замена указанных измерительных инструментов другими, аналогичными по назначению, классом точности не ниже предусмотренных указанными стандартами.

Материал покрытия, его толщина, цвет принимаются в соответствии с указаниями, приведенными в рабочих чертежах.

Ниже приведена процедура оценки качества покрытия профилей на площадях заказчика.

Профили с цинковым покрытием.

Качество поверхности проверяют внешним осмотром без применения увеличительных приборов.

Толщину цинкового покрытия контролируют на прямолинейных участках профиля по прибору ИТП-1 или определением массы Zn покрытия на определенной площади вырезанной части профиля.

Профили с ЛКП.

Качество поверхности, цвет и блеск покрытия на прямолинейных участках профиля проверяют внешним осмотром без применения увеличительных приборов, в местах изгиба – при помощи лупы ЛП-1- $10^{\times}$ по ГОСТ 25706-83.

Визуальный контроль проводят при дневном или искусственном рассеянном свете, на расстоянии 0,3 м от предмета осмотра [156].

Контроль качества покрытия допускается проводить по образцу, изготовленному и утвержденному в соответствии с требованиями стандартов или ТУ

на изделие [156]. При оценке качества покрытия профиля в качестве образца может использоваться покрытие на исходной заготовке.

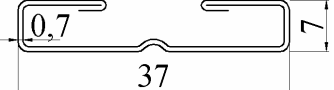
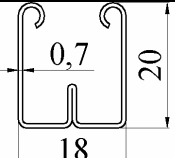
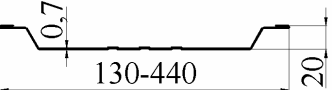
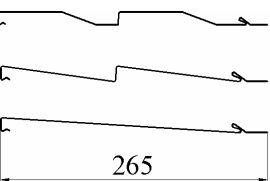
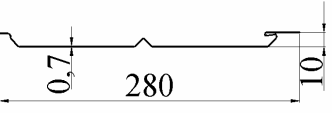
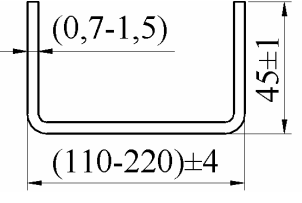
В случае отличия параметров покрытия от приведенных выше, уточняют назначение профиля и требования, предъявляемые к покрытию.

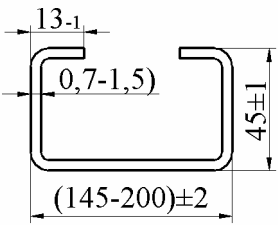
6.1.3. Характеристики профилей с покрытием

Название, вид сечения и применяемые покрытия на профилях, поставленных заказчику, приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Профили, поставленные заказчику

Тип профиля	Название профиля	Вид и габаритные размеры профиля	Покрытие профиля	Предприятие заказчик
1	2	3	4	5
Профили с ЭЖ	Стойка		ПЭ	ООО “ВАННБОК” (г. Санкт-Петербург)
	Прогон		ПЭ	ООО “ВАННБОК”
	Профиль ко- рытный с ЭДТ		ПУ, Пл	ОАО “ПЗТСК” (г. Перво- уральск)
	Сайдинг		ПЭ	ЗАО “ИНСИ” (г. Челябинск)
	Софит		ПЭ	ООО ЛФ “АРС Проф- настил”
Швеллерные и С-образные профили	Швеллер		Zn	ЗАО “ИНСИ”

1	2	3	4	5
	Термопрофиль С-образный		Zn	ЗАО “ИНСИ”

Геометрические и угловые размеры профилей контролировали на соответствие их номинальным размерам с учетом соответствующих допусков с применением штангенциркуля, угломера, радиусомера.

Состояние покрытия на профилях оценивали в соответствии с требованиями, приведенными выше; объем выборки составил (5 – 10)% от каждой партии одного наименования. Результаты оценки представлены в табл. 6.2.

Как видно из табл. 6.2 на поверхности профиля отсутствуют дефекты покрытия, которые бы выходили за допустимые пределы. Габаритные размеры соответствуют требованиям заказчика.

Таблица 6.2

Качество поверхности профиля

Название профиля	Покрытие	Толщина исх. заготовки, мм	Наличие дефекта покрытия	
			Допустимого	Не доп-ого
Стойка	ПЭ	0,7	-	-
Прогон	ПЭ	0,7	-	-
Корыто	ПУ, Пл	0,6	-	-
Сайдинг	ПЭ	0,6	отслоение на торцах профиля величиной 0,3 мм	-
Софит	ПЭ	0,6		-
Швеллер	Zn	0,7	-	-
		1,0	-	-
		1,2	риски, потертости	-
		1,5	риски, потертости	-
С-образный	Zn	0,7	-	-
		1,0	риски, потертости	-
		1,2	риски, потертости	-
		1,5	риски, потертости	-

Для подтверждения сохранности защитных свойств покрытия на профилях были проведены испытания в ОАО НИИЛКП с ОМЗ “Виктория” на пред-

мет влияния деформации на качество антикоррозионных покрытий фасадных облицовочных панелей “сайдинг” и “софит”.

Испытание проводили в камере солевого тумана, причем особое внимание обращалось на состояние деформируемых участков. В качестве образцов использовали фрагменты облицовочных панелей с ПЭ, Пл и Zn покрытием. Результаты испытаний приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Результаты испытания покрытий в камере солевого тумана

Наименование	Цвет покрытия	Время испытания, ч			
		48	96	120	260
ПЭ	красный	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
	вишневый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
	коричневый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
Пл	светло-зеленый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
	темно-зеленый	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм
Zn	-	б/изм	б/изм	б/изм	б/изм

Как видно из приведенных данных, после 260 часов испытаний все покрытия остались без изменений – изменения защитных свойств не происходило, а на оцинкованных образцах выхода продуктов коррозии основного металла на поверхность не наблюдалось. Таким образом, результаты испытаний защитных покрытий на фрагментах фасадных облицовочных панелей в камере солевого тумана показали, что деформация в процессе производства не привела к нарушению целостности ни цинкового, ни лакокрасочного покрытия.

В лаборатории ОАО “Ульяновский НИАТ” были проведены коррозионные испытания на предмет сравнения стойкости покрытия на профиле после изготовления из материала с покрытием по данной технологии по сравнению с покрытием, нанесенным на профиль после изготовления. Испытания проводились в течение 1 года.

Для проведения сравнительных коррозионных испытаний были взяты 3 образца профиля типа “сайдинг” из материала, приведенного в табл. 6.4. (образцы 2 и 3 – из материала различных производителей).

Таблица 6.4

Исходный материал профиля для испытания

№	Исходный материал
1	Оцинкованная сталь ОЦ А-0,55 ГОСТ 19904-74 08 кп ГОСТ 14918-80 и окрашенная краской МЛ
2, 3	Сталь с полимерным покрытием ЛКПОЦ 0,55 ТУ 14-1-4792-90 08ю ГОСТ 1050-74

Сравнительные испытания проводились в водной среде следующего состава: 10% NaCl, 4% уксусной кислоты при комнатной температуре. Образцы располагались вертикально. Периодически их вынимали из раствора и высушивали на воздухе в течение 15 – 20 мин. Сечение профиля и условные обозначения исследуемых зон показаны на рис. 6.1. Результаты испытаний в течение первых 4 месяцев приведены в табл. 6.5, результаты испытаний по истечении 1 года в табл. 6.6.

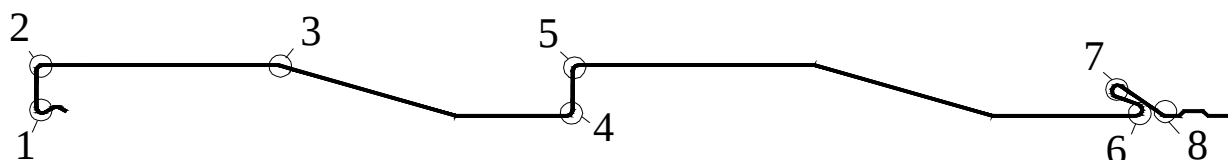


Рис. 6.1. Образец профиля, представленный на испытание, и контролируемые зоны

Таблица 6.5

Результаты испытаний по анализу состояния покрытия профиля
в течение первых 4 месяцев

№	Продолжительность испытаний, мес.		
	0,5	2,5	4
1	При визуальном осмотре обнаружено отслоение краски от поверхности образца	Поверхностная равномерная коррозия без отличия зон сгиба от прямолинейных участков	Поверхностная равномерная коррозия без отличия зон сгиба от прямолинейных участков
2	нет изменений	Единичные очаги по наружному контуру зоны сгиба углов № 1, 2, 5, 6	Единичные очаги по наружному контуру зоны сгиба углов № 3, 7; По углам №1, 2, 5, 6 наблюдается распространение очагов коррозии по всей поверхности наружного контура зоны сгиба
3	нет изменений	Единичные очаги по наружному контуру зоны сгиба углов № 1, 2, 5, 6	Единичные очаги по наружному контуру зоны сгиба углов № 3, 7; Единичные очаги по внутреннему контуру зоны сгиба угла № 5; По углам №1, 2, 5, 6 наблюдается распространение очагов коррозии по всей поверхности наружного контура зоны сгиба

**Результаты испытаний по анализу состояния покрытия профиля
после 1 года испытаний**

№	Результат испытания
1	При визуальном осмотре обнаружено отслоение краски от поверхности образца; Поверхностная равномерная коррозия без отличия зон сгиба от прямолинейных участков.
2	Единичные очаги по наружному контуру зоны сгиба углов № 1, 2, 5, 6; Единичные очаги по наружному контуру зоны сгиба углов № 3, 7; По углам №1, 2, 5, 6 наблюдается распространение очагов коррозии по всей поверхности наружного контура зоны сгиба.
3	Единичные очаги по наружному контуру зоны сгиба углов № 1, 2, 5, 6; Единичные очаги по наружному контуру зоны сгиба углов № 3, 7; Единичные очаги по внутреннему контуру зоны сгиба угла № 5; По углам №1, 2, 5, 6 наблюдается распространение очагов коррозии по всей поверхности наружного контура зоны сгиба.

В результате испытаний установлено, что профиль “Сайдинг”, изготовленный из материала с покрытием ЛКПОЦ ТУ 14-1-4792-90, обладает гораздо большей коррозионной стойкостью, чем такой же профиль с окраской МЛ, нанесенной после изготовления.

6.2. Внедрение технологии на площадях заказчика

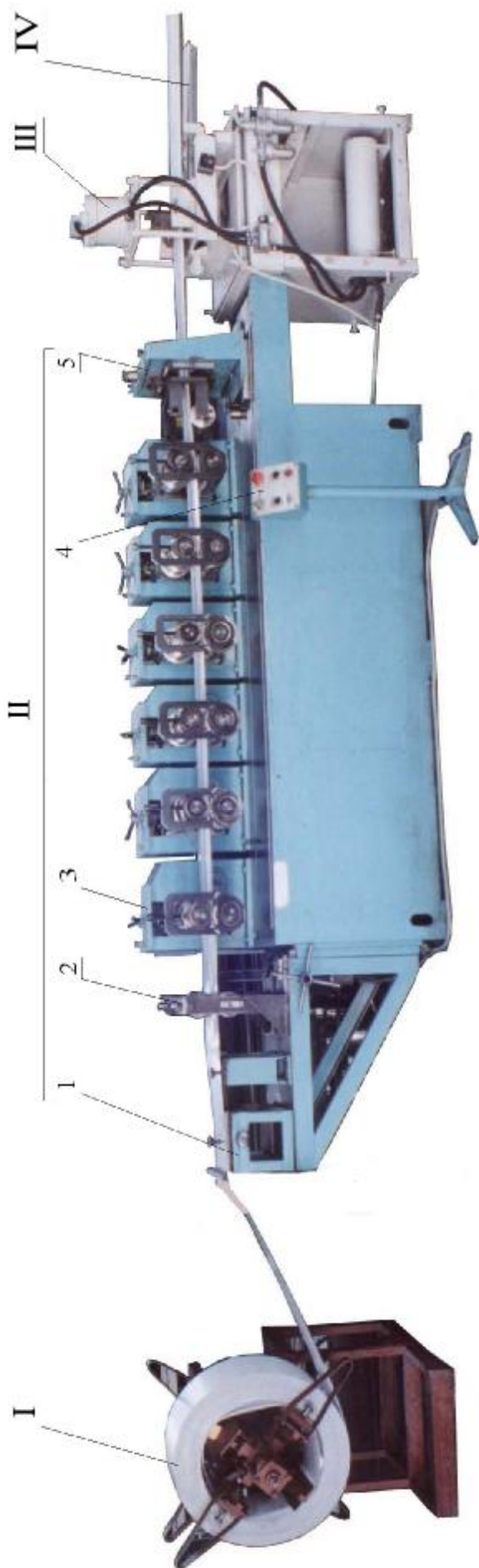
Работы по внедрению технологии включали следующие этапы:

1. Проведение теоретических и экспериментальных исследований;
2. Разработка технологических схем и режимов формообразования;
3. Проектирование технологического оснащения;
4. Доработка, отладка оборудования и внедрение технологического оснащения;
5. Внедрение технологического процесса.

Совместно с технологией была внедрена линия по производству профилей на базе станка ГПС-350М6.

Состав линии (рис. 6.2):

- I. Рулонница подающая;
- II. Станок гибочно-прокатный ГПС-350М6;
- III. Устройство отрубное пневматическое;
- IV. Стол приемный;
- V. Счетчик;
- VI. Электронный блок управления.



СОСТАВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ

I – рулонница подающая;

II – станок гибочно-прокатный ГПС-350М6;

1 – устройство направляющее;

2 – устройство предварительного формообразования;

3 – клеть профилирующая;

4 – пульт управления;

5 – устройство правильное;

III – устройство отрезное пневматическое;

IV – стол приемный (условно не показан).

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ:

Наибольшие размеры заготовки, мм.....2,5x250

Скорость профилирования, м/мин.....до 20

Наибольшая глубина профилирования, мм.....60

Время переналадки, мин.....до 60

Потребляемая мощность, кВт.....до 20

Рис. 6.2. Автоматизированная линия на базе станка ГПС-350М6

6.3. Применение рассматриваемых профилей с покрытием

В книге были рассмотрены процессы изготовления профилей различного поперечного сечения на гибочно-прокатном стане, которые нашли применение в различных отраслях производства и строительства. Профили с покрытием находят широкое применение в строительстве, авиастроении, при производстве мебели и др.

6.3.1. Применение профилей в строительстве

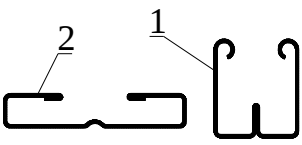
В настоящее время профили с покрытием нашли самое широкое применение в строительной индустрии, где они применяются, начиная от декоративной отделки и заканчивая силовыми элементами несущих конструкций зданий (рис. 6.3). Назначение профилей, рассматриваемых в работе, приведены в табл. 6.7.

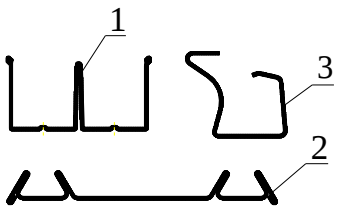
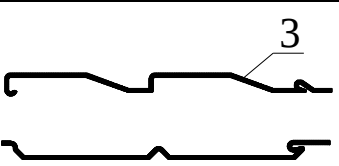
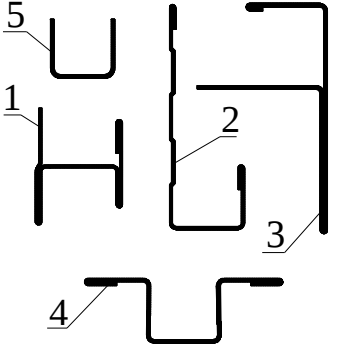


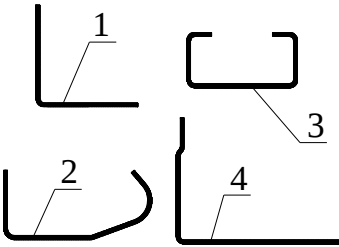
Рис. 6.3. Профили с покрытием, применяемые в строительстве и изготовленные МИД

Таблица 6.7

Назначение профилей, рассмотренных в работе

№	Назначение профилей	Вид профилей	Схемы изготовления	Примечание
1	2	3	4	5
1	Профили для отделки ванн		стр. 132	Предназначены для крепления пластиковых панелей перед ванной, профиль 1 (стойка) служит для перемещения в его пазах пластиковой панели, профиль 2 (прогон) для крепления по бокам ванны

1	2		3	4	5
2	Профили для шкафов-купе			стр. 132, 132, 139	Профили 1 (верхний трек) и 2 (нижний трек) – направляющие двери-купе, профиль 3 – ручка двери-купе
3	Профили для легкосборного строительства	каркасов		стр. 126	См. рис. 6.4
		наружной облицовки		стр. 138	
		кровли		стр. 138	Профиль “автофальц” предназначен для покрытия крыш, позволяет осуществлять ускоренную сборку
4	Профили системы Knauf			стр. 126	Предназначены для отделки помещений, крепления гипсокартона, подвесных потолков
5	Профили для внутренней облицовки помещений, используются при креплении гипсокартона			стр. 126, 127, 132, 133	1 – профиль H-образный для стыковки гипсокартона между собой; 2 – профиль L-образный закрывает края гипсокартона; 3 – профиль F-образный для стыковки углов гипсокартона; 4 – желоб, крепится между панелями гипсокартона и предназначен для электропроводки; 5 – крышка желоба
6	Профили для армирования стеклопакетов			стр. 126	Усилители ПВХ-окон и дверей
7	Профили для мансард и фасадов			стр. 126	Несущие балки

1	2	3	4	5
8	Профиля для раздвижных ворот		стр. 126	1 – монтажный уголок, 2, 3 – профиль С-образный, 4 – угол вертикальный

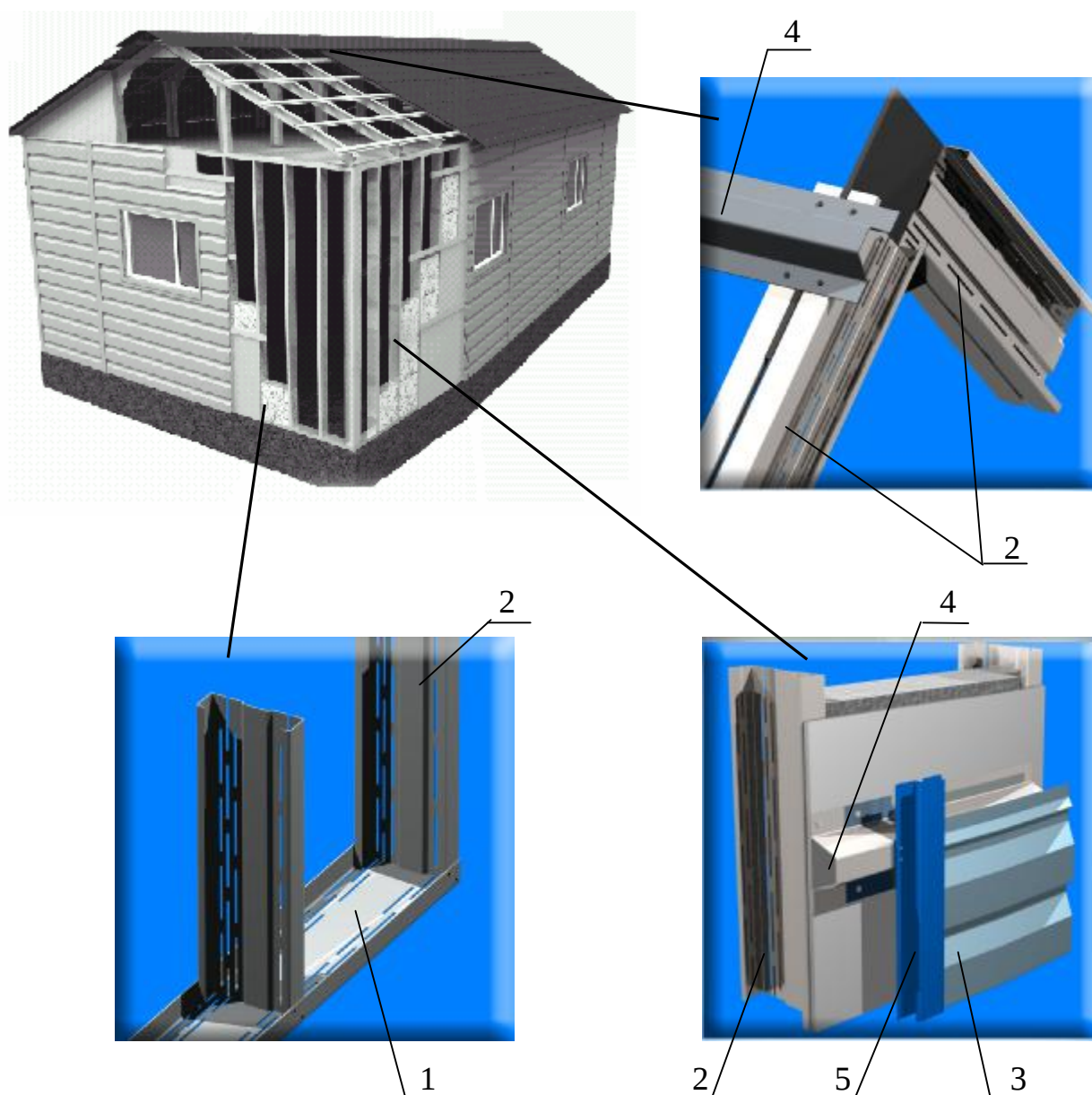


Рис. 6.4. “Теплый дом” и элементы “Теплового дома”: 1 – термопрофиль швеллер 204х40х1,2; 2 – термопрофиль С-образный 200х40х1,2; 3 – сайдинг 245х12х0,6; 4 – профиль корытный 80х40х1; 5 – обрамление 20х45х0,6 (доборный элемент “сайдига”)

6.3.2. Применение профилей в авиастроении

В авиастроении профили с покрытием применяют в качестве несущих силовых элементов каркаса самолета (стрингеров, шпангоутов, лонжеронов), представленных в виде профилей уголкового, швеллерного, корытного, Z-образного типа с отбортовками или без них (рис. 6.5).

Пример применения Z-образных профилей приведен на рис. 6.6.

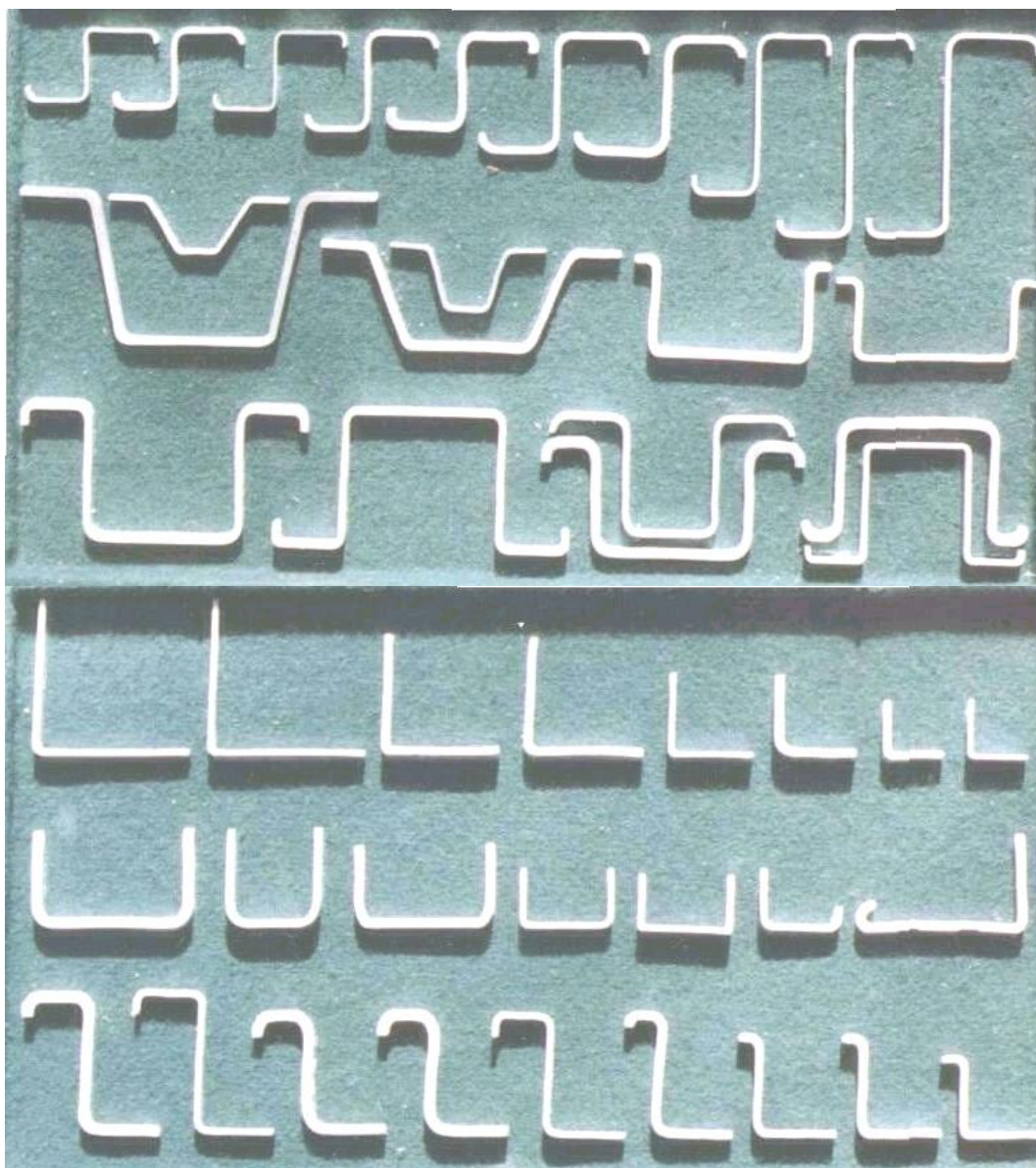


Рис. 6.5. Профили авиационной номенклатуры, изготовленные в ОАО “Ульяновский НИАТ”

В качестве исходных заготовок используются листовые материалы Д16АМ, В95АМ по ОСТ 1 90246-77 с алюминиевым покрытием. Профили, изготовленные из этих материалов, применяются на изделиях Ил-114, Бе-200, Ту-334, Ан-70. В 2006 г. планируется внедрение Z-образных профилей с отбортовками на изделие Ан-140 Воронежского самолетостроительного завода.

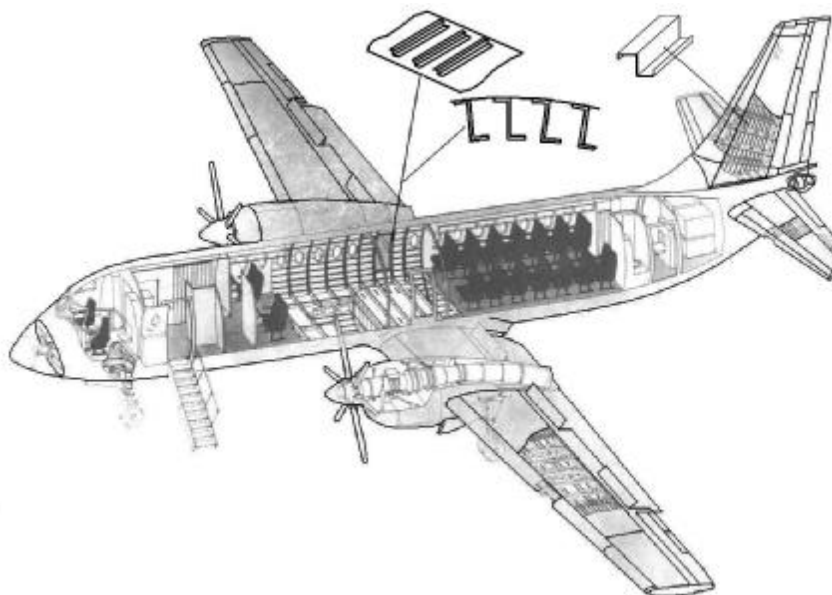


Рис. 6.6. Самолет АН-12 с панелью из Z-образных профилей

Применение МИД при проектировании, разработке и внедрении технологического оснащения позволило:

- производить профили из материала с покрытием за минимальное количество переходов (4 – 8) как простого, так и сложного сечения;
- сохранить целостность цинкового и полимерного покрытия при производстве профилей сложной конфигурации;
- применять покрытия с различной адгезионной и когезионной прочностью;
- снизить стоимость применяемого оборудования и средств на его эксплуатацию в связи с уменьшением количества переходов;
- уменьшить время и упростить наладку оборудования.

Выводы

1. Качество профилей подтверждается проведенным анализом готовых изделий на месте изготовления, при внедрении технологии на площадях заказчика, а также соответствующими испытаниями на остаточное качество защитно-декоративного покрытия.

2. Испытание профилей, изготовленных из материала с покрытием, в агрессивных средах подтверждает гораздо большую стойкость такого покрытия по сравнению с профилем, окрашенным после изготовления.

3. Проведенные в ОАО НИИЛКП с ОМЗ “Виктория” коррозионные испытания в камере солевого тумана облицовочных профилей, изготовленных МИД из материалов с покрытием, подтверждают сохранение покрытием своих защитных свойств.

4. Проведено внедрение оборудования двух автоматизированных линий и технологического оснащения на площадях заказчика.

ГЛАВА 7

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7.1. Экономическая эффективность работы

Расчет экономической эффективности позволяет подтвердить преимущества предлагаемой технологии по экономической составляющей. В качестве сравниваемой технологии был принят процесс изготовления профилей на профилегибочных станках той же модели с последующей окраской профилей в окрасочных камерах полимерными красками.

Годовой экономический эффект определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = (C_1 + K_1 E_H) b - (C_2 + K_2 E_H), \quad (7.1)$$

где C_1, C_2 - себестоимость годового объема производства соответственно по сравниваемому и предложенному варианту, руб.;

K_1, K_2 - капитальные вложения соответственно по сравниваемому и предложенному варианту, руб.;

E_H - нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;

b - коэффициент эквивалентности приведения показателей от обоих вариантов.

Для определения экономической эффективности процесса необходимо провести расчет капитальных затрат и себестоимости продукции по предлагаемой и сравниваемой технологии.

7.1.1. Расчет капитальных затрат

Расчет капитальных затрат включает расчет стоимости основных производственных фондов (ОПФ) и оборотных средств (ОС) (табл. 7.1-7.3).

Таблица 7.1

Стоимость действующего оборудования

Наименование оборудования	Кол-во	Затраты на ед., тыс. руб.		Всего, тыс. руб.	
		Оптовая цена	Транс. и монтаж	Предл. технология	Сравн. технология
1	2	3	4	5	6
1. Автоматиз. линия	1	1700	34	1734	
2. Рулонница	1	10	0,2	10,2	
3. Стол приемный	1	15	0,3	15,3	
4. Стол упаковочный	1	15	0,3	15,3	
5. Кран-балка	1	200	40	240	
6. Окрасочная камера	1	120	12	—	132

Продолжение табл. 7.1

1	2	3	4	5	6
7. Печь полимеризации	1	540	54	–	594
8. Транспорт. системы	1	300	30	–	330
9. Доп. оборудование	1	150	15	–	165
Итого				2015	3236

Площади, занимаемые оборудованием по предлагаемой и сравниваемой технологии, составляют соответственно 40,1 м² и 110,1 м²

Стоимость зданий 2005 и 5505 тыс. руб. соответственно.

Стоимость инструмента и технологической оснастки 445 и 465 тыс. руб. соответственно.

Таблица 7.2

Расчет стоимости ОПФ

Наименование	Сумма в тыс. рублях		Прим.
	Предлагаемая технология	Сравниваемая технология	
1. Здания и сооружения	2005	5505	
2. Оборудование			
станочное	1734	2955	
дополнительное	40,8	40,8	
подъемно-транспортное	240	240	
3. Инструмент и приспособления	445	465	
4. Инвентарь	60	97	3%, п.2
Итого	4525	9302	

Таблица 7.3

Капитальные затраты

Наименование	Сумма в тыс. руб.		Прим.
	Предлагаемая технология	Сравниваемая технология	
1. ОПФ	4525	9302	
2. ОС	2263	4702	50 % п.1
Капитальные затраты	6788	14004	

7.1.2. Расчет себестоимости продукции

Расчет себестоимости продукции включает затраты на сырье, материалы и комплектующие изделия, затраты на топливо и энергию на технологические цели, заработную плату производственных рабочих, налоги, расходы на содер-

жание и эксплуатацию оборудования, цеховые и общезаводские расходы, коммерческие расходы.

При расчете себестоимости продукции учитывали коэффициент использования станка при максимальной загрузке окрасочной линии. Коэффициент использования рассчитывали как время работы оборудования на расчетной операции к общему времени работы. При производительности станка ГПС-350М6 – 10 м/мин коэффициент использования станка равен 0,1.

Годовую программу рассчитывали исходя из максимальной производительности окрасочной камеры. В табл. 7.4 приведены затраты на основные материалы, в табл. 7.5 зарплата производственных рабочих при производстве по предлагаемой и сравниваемой технологии.

Таблица 7.4

Затраты на основные материалы

Показатели	Значения показателей	
	Предлагаемая технология	Сравниваемая технология
1. Годовая программа, шт	72000	
2. Наименование материала, марка	сталь 08кп+ЛКП	сталь 08кп
3. Годовой расход металла, кг	289000	
4. Норма расхода металла на 1 изделие, кг	4,015	
5. Оптовая цена материала на 1 м ² , руб.	112	52
6. Оптовая цена расхода краски на 1 м ² , руб.	-	22,5
7. Стоимость годового расхода материала, тыс. руб.	7514	3468
8. Стоимость годового расхода краски, тыс. руб.	-	1442
9. Годовые затраты на материал, тыс. руб.	7514	4910
10. Материальные затраты на 1 дет., руб.	104	68,2

Количество рабочих 8 и 20 чел. соответственно.

Таблица 7.5

Заработная плата производственных рабочих

Профессия	Кол-во чел	Тарифная ставка, руб./ч	Фонд рабочего врем., ч	Коэфф. премии	Сумма, тыс.руб.
1	2	3	4	5	6
Предлагаемая технология					
1. Слесарь-наладчик	2	28,8	1920	1,85	204,6

Продолжение табл. 7.5

1	2	3	4	5	6
2. Упаковщик	4	23,4			332,5
3. Слесарь	2	25,2			179
Всего	8				716,1
Сравниваемая технология					
1. Слесарь-наладчик	2	28,8	1920	1,85	204,6
2. Упаковщик	4	23,4			332,5
3. Слесарь	2	25,2			179
4. Маляр	12	25,2			1087
Всего	20				1803

Заработная плата (при коэффициенте использования для линии 0,1; для окрасочной камеры 1) составляет по предлагаемой технологии 71,6 тыс. руб., по сравниваемой технологии 1158,6 тыс. руб.

Затраты на амортизацию соответственно 379,8 и 665,7 тыс. руб.

Затраты на ремонт оборудования и зданий соответственно 149,6 и 378,4 тыс. руб.

Затраты на износ инструмента соответственно 84,3 и 104,3 тыс. руб.

Затраты на электроэнергию и обтиро-смазочные материалы соответственно 72,4 и 496,3 т.руб.

Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования приведены в табл. 7.6.

Таблица 7.6

Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования

Наименование	Предлагаемая технология			Сравниваемая технология		
	Стоимость, тыс.руб.	Коэфф. использования	Сумма	Стоимость, тыс. руб.	Коэфф. использования	Сумма
1. Затраты на амортизацию оборудования	379,8	0,1	38	379,8	0,1	38
2. Затраты на амортизацию окрасочной линии	-		-	203	1	203
3. Затраты на ремонт	149,6	0,1	15	378,4	0,1	37,8
4. Затраты на износ инструмента	84,3	1	84,3	104,3	1	104,3
5. Затраты на электроэнергию	72,4	0,1	7,2	496,3	1	496,3
Всего			144,5			879,4

Цеховые и общезаводские расходы (250% от зарплаты) составляют соответственно 290,3 и 2897 тыс. руб.

Расчет себестоимости продукции приведен в табл. 7.7, основные технико-экономические показатели по предлагаемой и сравниваемой технологии в табл. 7.8.

В соответствии с формулой (7.1) экономическая эффективность составляет:

$$\mathcal{E} = (9995,6 + 14105 \cdot 0,9 \cdot 0,16) - (8003,7 + 6788 \cdot 0,1 \cdot 0,16) = 3914 \text{ тыс. руб.}$$

При этом применяется коэффициент использования оборудования, который составляет соответственно 0,1 и 0,9. Годовой объем производства и качество профилей для обоих вариантов принимается одинаковым.

Таблица 7.7

Себестоимость продукции

Статьи расхода	Предлагаемая технология		Сравниваемая технология	
	на 1 дет., руб.	на год. прогр., тыс. руб.	на 1 дет., руб.	на год. прогр., тыс. руб.
1. Основные материалы	104	7488	68,2	4910
2. Основная заработная плата	0,99	71,6	16,1	1158,6
3. Отчисления во внебюджетные фонды	0,13	9,3	2,1	150,6
4. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	2,0	144,5	12,2	879,4
5. Цеховые и общезав. расходы	4,0	290,3	40,2	2897
<u>Производственная себестоимость</u>	<u>111,2</u>	<u>8003,7</u>	<u>138,8</u>	<u>9995,6</u>
6. Внепроизводные расходы	3,33	240,1	4,2	299,8
<u>Полная себестоимость</u>	<u>114,5</u>	<u>8243,8</u>	<u>143</u>	<u>10295,5</u>
7. Прибыль	22,9	1648,7	28,6	2059
<u>Оптовая цена</u>	<u>137,4</u>	<u>9892,6</u>	<u>171,6</u>	<u>12354,6</u>

Таблица 7.8

Основные технико-экономические показатели

Показатели	Значение показателей	
	Предлагаемая технология	Сравниваемая технология
1	2	3
Мощность электродвигателей, кВт	12	82

Продолжение табл. 7.1

1	2	3
Занимаемая площадь, м ²	40,1	110,1
Годовая программа, дет	72000	72000
Объем производства, т	289	289
Стоимость ОПФ, тыс. руб.	4525	9302
Капитальные затраты, тыс. руб.	6788	14105
Число рабочих	8	20
Производительность труда, шт/(чел*час)	22,4	1,4
Материалоемкость, руб./шт	104,4	68,2
Фондоемкость, руб./шт	62,8	129,2
Трудоемкость, чел*мин/шт	2,68	42,8
Себестоимость продукции, тыс. руб.	8003,7	9995,6
Оптовая цена, тыс.руб.	9892,6	12354,6
Годовой экономический эффект, тыс. руб.	3914	

Годовой экономический эффект при изготовлении по данной технологии составляет 3914 тыс. руб. по сравнению со сравниваемой технологией. При этом себестоимость изготовления продукции на 19,9 % ниже. Это обусловлено более высокой производительностью процесса и малой занимаемой площадью.

7.2. Основные направления дальнейших исследований

Среди основных направлений развития данных исследований можно выделить следующие:

1. Дальнейшее изучение процесса изготовления профилей методом интенсивного деформирования:

- интенсификация процесса при обеспечении качества продукции;
- увеличение производительности процесса;
- снижение стоимости применяемого технологического оснащения;
- разработка программ для автоматизированного расчета технологических переходов и проектирования технологического оснащения.

2. Разработка моделей механики контактного взаимодействия при МИД (например, на основе ANSYS).

3. Расширение номенклатуры профилей с покрытием, применяемых в различных областях:

- применение профилей с покрытием в новых областях (авиостроение, автостроение, тракторостроение);
- изготовление профилей из материала с покрытием, при толщине подложки 3 – 4 мм;

- изготовление профилей из высокопрочных материалов (алюминиевые и титановые сплавы, высокопрочные стали).

4. Дальнейшее изучение свойств покрытий (полимерных, металлических, пленочных) и применимость их при различных видах формообразования:

- использование на заготовках новых (перспективных) покрытий, обеспечивающих улучшенные декоративные и защитные функции профиля (толстые пористые покрытия, противозумные покрытия, специальные многослойные покрытия);
- более глубокое изучение свойств покрытий (адгезионной и когезионной прочности, стойкости к деформациям и др.) и сфер их применимости;
- применение новых методов и способов оценки качества покрытий, применение и разработка новых устройств для испытания покрытий.

5. Применение результатов и используемых методов в других областях (листовой штамповке, в строительстве при оценке качества покрытий).

6. Усовершенствование применяемого профилегибочного оборудования (снижение стоимости оборудования, упрощение конструкции станков, усовершенствование дополнительных устройств, обеспечение удобства настройки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования по применению метода интенсивного деформирования к производству гнутых профилей из материала с покрытием, а также полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработан и исследован классификатор видов воздействия на поверхность заготовки при МИД. Установлено, что наибольшее влияние на возникновение дефекта НП оказывает контакт заготовки с криволинейными зонами ролика, а также воздействие деформации изгиба.

2. Определены значения допустимой деформации изгиба для 4-х видов материала с покрытием и допустимые значения контактных сил для полимерных покрытий. Определено, что наиболее стойкими являются:

- при воздействии деформации изгиба: из металлических покрытий – цинковые; из полимерных покрытий – полиуретановые и пластизолевые;
- при воздействии контактных сил – полиэфирные покрытия.

Определены значения минимальных внутренних радиусовгиба профиля для наиболее распространенных видов материала с покрытием. Показано, что минимальная величина внутреннего радиусагиба профиля (для сохранения покрытия наружного слоя) находится в пределах:

- для полиэфирных покрытий – $(1 - 2)S$;
- для полиуретановых покрытий – $(0 - 2)S$;
- для пластизолевых покрытий – $(0 - 1,5)S$;
- для цинковых покрытий – 0.

Установлено, что при деформировании покрытия быстрее снижают свои защитные свойства, чем декоративные. При обжиге тонкие покрытия более устойчивы к большим степеням деформации, чем толстые.

3. Разработанная модель контактного взаимодействия инструмента и заготовки позволила установить зависимость контактных сил от технологических параметров процесса и геометрических параметров профиля. Следует избегать подгибки полки на 90 градусов в связи с резким увеличением прикладываемых контактных сил. Для уменьшения вероятности нарушения покрытия следует применять эллипсную форму контактных частей бурта ролика.

4. Определены предельные параметры процесса и геометрические параметры профиля с использованием значений допустимых контактных сил для покрытий.

5. Экспериментально установлены зависимости образования дефекта нарушения покрытия:

- на наружной стороне профиля швеллерного и С-образного типа из заготовки с ПЭ покрытием в зависимости от толщины исходной заготовки, угла подгибки и разности углов подгибки;
- на наружной стороне полки профиля из заготовки с ПЭ покрытием при подгибке на 90 град. в зависимости от высоты полки, толщины исходной заготовки и разницы углов подгибки;

- на внутренней стороне зоны сгиба профиля при формовке на первом переходе от толщины исходной заготовки, величины формующего радиуса ролика из материала с четырьмя различными видами покрытия.

Построены соответствующие номограммы. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими показало сходимость результатов в пределах (15-20)%.

6. Теоретические и экспериментальные исследования, разработанные технологические схемы, оптимальные конфигурации формующих роликов, дополнительных устройств и приспособлений позволили создать эффективный алгоритм проектирования технологии производства профилей различных сечений с покрытием. Предложенная программа позволяет ускорить процесс расчета роликового калибра, а разработанные устройства скольжения и системы смазки позволяют избежать образование дефекта нарушения покрытия.

7. Результаты проведенных исследований и разработок внедрены на 4 предприятиях РФ (ООО “ВАННБОК”, ОАО “ПЗТСК”, ЗАО “ИНСИ”, ООО ЛФ “АРС Профнастил”). Внедрены две профилегибочные автоматизированные линии и комплекты технологического оснащения на 53 типоразмера профилей. Годовой экономический эффект составляет 3900 тыс. руб. при снижении себестоимости изготовления на 20% по сравнению с базовым вариантом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Карякина, М.И. Механизм защитного действия лакокрасочных покрытий / М.И. Карякина // ЛКМ. – 1991. – № 6. – С. 49 – 54.
- 2 Колотыркин, Я.М. Металл и коррозия / Я.М. Колотыркин. – М.: Металлургия, 1985. – 88 с.
- 3 Полякова, К.К. Полимерные покрытия полосового проката / К.К. Полякова, Ю.Г. Зельцер. – М.: Металлургия, 1971. – 120 с.
- 4 Steel cladding profiles: the ever changing scene. Carey F.B. "Sheet Metal Ind.", 1986, 63, № 8, 466, 468, 470.
- 5 Effect of deformation on the damage to the coating of sheet steels / Gronostajski Jerzy, Ali Waleed, Ghattas Magdy Samuel // J / Mater. Process. Technol. – 23, № 3. – С. 321 – 332.
- 6 Coil coating with stands forming, deep drawing // Mod. Metals. – 1989. – 45, № 7. – С. 96, 98, 100.
- 7 Лакокрасочные покрытия в машиностроении. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. канд. техн. наук М.М. Гольдберга. – М.: Машиностроение, 1974. – 576 с.
- 8 Карякина, М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М.И. Карякина. – М.: Химия, 1988. – 272 с.
- 9 Производство и рынок профнастила и металлочерепицы в России. Информационный обзор: Металл – Информ. Май 1999 г.
- 10 Pre-painting of aluminium strip by coil coating / Brown David // Alum. ind.– 1988. – 7, № 4. – С. 18 – 20.
- 11 Яковлев, А.Д. Порошковые краски / А.Д. Яковлев. – Л.: Химия, 1987. – 216 с.
- 12 Покрытия из полиуретановых эластомеров. Fortteile und Beschichtungen aus Polyurethan – Elastomeren // Techn. Rept.–1993. – 20, №5.
- 13 Utilization of flexible coating on steel to impart superior scratch and chip resistance: Пат. 5283126 США, МКИ В 32 В 15 / 08 / Rumusstn William A., Jackson Michael; Bee chemical. 905931; заявл. 29.06.92; опубл. 12.94; НКИ 428 / 437
- 14 Санжаровский, А.Т. Физико–механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий / А.Т. Санжаровский. – М.: Химия, 1978. – 184 с.
- 15 Zemiere pretrattate nel settore dell`auto. balboni Pietro. "Trat. efinit.", 1986, 26, № 7 – 9, 29 – 31.
- 16 Probleme de l`entretien des bardages en acier galvanise/ Bellens Gerard // Galvano – trait, surface. – 199991. – 60, № 615. – С. 401 – 402, 405 – 406, 409 – 410, 412, 287.
- 17 Арзамасцева, Э.А. Применение цинка для нанесения покрытий (обзор, Ч.1) // Автомоб. пром – сть США. – 1995. – № 2. – С. 213.
- 18 Применение листовой стали с покрытиями / Ямато Тэцудзи // Пусэсу гудзюцу = Press work. – 1991. – 29, № 13. – С. 18 – 23.
- 19 Беняковский, М.А. Производство оцинкованного листа / М.А. Беняковский, Д.Л. Гринберг. – М.: Металлургия, 1973. – 256 с.

- 20 Липухин, Ю.В. Производство эффективных видов оцинкованной листовой стали / Ю.В. Липухин, Д.А. Гринберг. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
- 21 Гарин, В.Н. Полимерные защитные и декоративные покрытия строительных материалов / В.Н. Гарин, Н.Н. Долгополов. – М.: Стройиздат, 1975. – 191 с.
- 22 Baner Dietrich, Gucker Eike Gerhard. Benrteilen der Umformeigen schaften oberflachenveredelter Bleche. “Bander–BlecheRohre”, 1988, 29, № 6, 24 – 28, 4, 6, 8.
- 23 Ravini Enico / The solution precoating // Itul. Mach. And Equir. – 1988. – 20, № 107. – С. 19, 20 – 21.
- 24 ГОСТ 14918–80. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий. Технические условия. 1987. – 11 с.
- 25 Doppelter Schutz. Schichtverbund and Zink und organischem Decklack verhindert korrosion von Bauteilin / Oeterent kari – Albert van // Maschihenmarkt. – 1993. – 99. № 21. – С. 54 – 56.
- 26 Тенденции развития органических покрытий для окраски в ленте и листах. Trend in organic coating / Simcock R.A., Robinson A.J. // Sheet Metal Ind.–1994.– 68, №12. – С. 28.
- 27 Покрытия с длительным сроком службы для металлов. Long–life coating for metal / Boxall J. // Polim., Paint colour J.–191.–181, №4284.– с. 334, 336.
- 28 Берукштис, Г.К. Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях / Г.К. Берукштис, Г.Б. Кларк. – Наука. 1971. – 159 с.
- 29 Флакс, В.Я. Оценка долговечности горячеоцинкованной стали с лакокрасочным покрытием / В.Я. Флакс, Н.В. Кириченко, Д.А. Окунявская // ЛКМ. – 1978. – № 5. – С. 30 – 31.
- 30 Estudios de laboratorio de distintos pret ramientos sobre chapa electrozincada. Galvan J.C., Morcillo M. “Rev. iberoam. corros. yprot.”, 1986, 17, № 4, 284 – 286.
- 31 Developpement des toles prepeintes pour l`industrie automobile / Maze E., Tournillon C. // Galvano–ordano–trait. surface. – 1991. – 60, № 616. – С. 543 – 550, 500, 502.
- 32 Материалы семинара “Современная технология окраски и отделки рулонов и листовых материалов”. – Л.: Дом научно–технической пропаганды, 1976. – 90 с.
- 33 ТР 1.4.1780–87. Изготовление профилей из плакированных листов алюминиевых сплавов Д16ч, 1163, В95пч методом стесненного изгиба – М.: НИАТ – 1988.
- 34 Formability of qalvanized steelsheet/ Ru Zheng, Overby Dave // 4 Semin plast. Umfarung, ghor, 16–18 uni, 1988. – Budapest, s.a. – С. 94 – 99.
- 35 / Ohtsubo Hiriyuki // Эхрумэ дайгакубу кие = Met. Fac. Eng. Ehime Univ. – 1992. – 12, № 3. – С. 523 – 531.
- 36 ГОСТ 4765–73. Материалы лакокрасочные. Методы определения прочности при ударе.
- 37 ГОСТ 30246–94. Прокат тонколистовой рулонный с защитно–декоративным лакокрасочным покрытием для строительных конструкций. Технические условия.

- 38 ГОСТ 29309–92. Покрытия лакокрасочные. Методы определения прочности при растяжении. 1992. – 6 с.
- 39 Харламов, Ю.А. Методы измерения адгезионной прочности покрытий (обзор) / Ю.А Харламов // “Завод. лаб.” – 1987. – 53, № 5 – С. 63 – 69.
- 40 ГОСТ 15140–78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии.
- 41 Металлополимерные материалы и изделия / под ред. В.А. Белого. – М.: Химия, 1979. – 312 с.
- 42 Verfahren zur Messung der Haftfestigkeit: Заявка 3702752 ФРГ, МКИ G 01 N 19 / 04 / Pintat Theo; fraunhofen–Ges zur Forderung der angewandten Fjrschung V. – № 3702752. 2; Заявл. 30.01.87; Оpubл 11.08.88.
- 43 Методы исследования механических свойств покрытий. Wisklyama Itzue, Takahashi Kense // Мицубиси дэнки гихо. – 1990. – 64, №4. – с. 49–52.
- 44 А.С. 1350558, СССР, МКИ G 01 N 19 / 04. Способ определения качества сцепления покрытия с подложкой / И.И. Горшков, С.В. Медведьева. Заявл. 23.12.85, № 3992610 / 25–28, опубл в Б.И., 1987, № 41.
- 45 Каллойда, Ю.В. Установка для определения качества сцепления покрытий с металлической основой. / Ю.В. Каллойда, М.В. Харичко, О.А. Павлов О.А // "Объем и поверхностное упрочнение деталей машин. – Новосибирск, 1987. – С. 133–137.
- 46 Selected bibliography on adhesion measurement of films and coating / Mittal K.L. // test metal / and inorg. Coat.: Symp., Chicago, Ill., 14 – 15 Apr., 1986. – Philadelphia, Pa, 1987. – С. 343 – 362.
- 47 А.с.1176217, СССР, МКИ. G 01 N 19/04. Устройство для определения прочности сцепления покрытия с подложкой при отслоении / С.С. Негматов, Д.И. Усманов, К.У. Садыков, А.М. Несматова – опубл. В Б.И. 1985 – № 32.
- 48 The peeling off resistance of zinc and iron–zinc coated steel sheets in stamping / inagaki Jun–cihi, Nakamura selji, Yoshida Masafumi, Nishimoto Akihiki // SAE Techn. Pap, Ser. – 1989. – № 890349. – С. 57 – 65.
- 49 Die Materials and treatments with Electrogalvanized Steels. Meuleman D.J., Dwger T.E. “SAE Nechn. Pap. Ser.”, 1988, № 880369, 61 – 69.
- 50 Sakai N. // Дзайре то пуросэсу = Curr. Adv. Mater. And Proc. – 1990. – 3, № 2. – С. 406 – 409.
- 51 Reibverhalten und Oberflächenverschleib Von beschichteten. Feinblechen / Brox H. // Ind. – Anz. – 1988. – 110, № 96. – С. 40, 45.
- 52 Елисаветский, А.М. Защитные свойства деформированных покрытий / А.М. Елисаветский, В.М. Простяков // ЛКМ. – 1976. – № 3. – С. 24 – 26.
- 53 ГОСТ 9.042. Методика оценки состояния покрытия при испытании в жидких агрессивных средах.
- 54 Charakteristische Beispiele furdie Auwendung bandbeschichteter Feinblechwerkstoffe / Sardemann Klaus, Drewes Erust – Jurgen, Wolfhard Dietrich // Blech Rohre Profile. – 1993. – 40, № 5. – С. 386 – 389.
- 55 ГОСТ 24045 – 86. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофраами для строительства. Технические условия. 1986. – 22 с.

- 56 Vollverzinkt fe Bleche fur den karosserieban / Kruger B. // Blech Rore Profile. – 1991. – 38, № 7–8. – С. 567 – 569.
- 57 Japahese antosdrive up coating demand // Metal Bull. Mon. – 1992. – № June. – С. 68.
- 58 Now prepaait Solves manufacturing problems // Mod. Metals. – 1990. – 46, № 8. – С. 76, 78, 80, 84.
- 59 Профили гнутокатанные из листовых алюминиевых сплавов: науч.–техн. отчет № 5448–227–88.–М.: НИАТ, 1988.–75 с.
- 60 Марковцев, В.А. Разработка и внедрение технологии и оборудования для изготовления прямолинейных листовых профилей авиационных конструкций методом СИ: дис. канд. техн. наук: 05.07.04. / В.А. Марковцев. – М.: НИАТ, 1991. – 2002 с.
- 61 Obrzut Y.Y. Iron Age, 1967, V. 200, № 14, p. 83.
- 62 Finish in first – Then Fabricate / winship John r. // Metal form. – 1989. – 23, № 4. – С. 3 – 4, 6, 8, 10 – 13.
- 63 Колганов, И.М. Классификация типовых элементов жесткости гнутых профилей и особенности их формообразования / И.М. Колганов, В.А. Марковцев, В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // Авиационная промышленность. – 2001. – № 3. С. 21 – 25.
- 64 Гнутые профили проката. Справочник / под ред. И.С. Тришевского. – М.: Металлургия, 1980. – 352 с.
- 65 Ренне, И.П. Пластический изгиб листовой заготовки / И.П. Ренне // Труды Тульского механического института. – 1950. – Вып.4. – С. 146 – 162.
- 66 Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
- 67 Давыдов, В.И. Производство гнутых тонкостенных профилей / В.И. Давыдов, М.П. Максаков. – М.: Металлургиздат, 1959. – 240 с.
- 68 Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
- 69 Ершов, В.И. Совершенствование формоизменяющих операциях листовой штамповки / В.И. Ершов. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.
- 70 Тришевский, И.С. Теоретические основы процесса профилирования / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов – М.: Металлургия, 1980. – 288 с.
- 71 Drei Grossen end drei Ausfuhrungen // Industrie – Auzeiger. – 1999. – V.21. – N 50.S. 48.
- 72 Скрипачев, А.В. Изготовление из листа профилей повышенной жесткости стесненным изгибом на кромкогибочных машинах: дис. канд. техн. наук / А.В. Скрипачев. – Тула: ТПИ, 1983. – 242 с.
- 73 Вдовин, С.И. Прогрессивные технологические процессы гибки листовых заготовок / С.И. Вдовин, Д.В. Голенков, В.А. Жердов, С.В. Семин // Кузнечно–штамповочное производство. – 1998. – №1. – С. 19–21.
- 74 Modern manufacturing process engineering / Niebel B.W., Draper A.B., Wysk R.A.– New York: Mc Gray – Hill Publishing Company, 1989. – 986 p.
- 75 Ершов, В.И. Изгиб идеально пластичной полосы со сжатием в штампе / В.И. Ершов, А.С. Зажигин // Известия вузов. Авиационная техника. – 1972. – №2.–

- 76 Комаров, А.Д. Развитие и совершенствование процессов штамповки деталей эластичной средой / А.Д. Комаров // Кузнечно–штамповочное производство. – 1982. – №12. – С. 27–30.
- 77 Производство гнутых профилей (оборудование и технология) / под общ. ред. И.С. Тришевского и др. — М.: Металлургия, 1982. — 384 с.
- 78 Проскуряков, Г.В. Стесненный изгиб / Г.В. Проскуряков // Авиационная промышленность. – 1966. – № 2. – С. 9 – 13.
- 79 ТР 1.4.1624–86. Изготовление гнутых профилей методом стесненного изгиба из сплава 1420 / Г.В. Проскуряков, В.И. Филимонов, А.С. Москвин – М.: НИАТ, 1986. – 24 с.
- 80 РТМ 1.4.2005 – 90. Изготовление профилей из листов алюминиевых сплавов Д16, В95, 1420 методом стесненного изгиба / Ю.М. Арышенский, Г.В. Проскуряков, В.И. Филимонов и др. – М.: НИАТ, 1991. – 85 с.
- 81 Марковцев, В.А. Изготовление методом интенсивного деформирования профилей из листа и их внедрение в авиастроении / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов, И.М. Колганов, С.В. Филимонов, М.В. Илюшкин // Авиационная промышленность. – 2001. – №4. – С. 21 – 23.
- 82 Филимонов, С.В. Разработка технологии интенсивного формообразования гнутых тонкостенных профилей в роликах: дис. канд. техн. наук / С.В. Филимонов. – Нижний Новгород: Нижегородский ГТУ, 2003. – 223 с.
- 83 Филимонов, С.В., Филимонов В.И. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 246 с.
- 84 Филимонов, В.И. Концепция исследования предельных возможностей процесса профилирования / В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // Ресурсосберегающие технологии листовой и объемной штамповки. Всероссийская научно–техническая конференция. Тезисы докладов. – Ульяновск: УГТУ, 1997. – С. 69–70.
- 85 Игнатенко, А.П. Исследование процесса двухслойной формовки тонкостенных гофрированных профилей / А.П. Игнатенко, Я.В. Хижняков, С.И. Заика // В сб.: Теория и технологии производства гнутых профилей проката. Харьков: УкрНИИМет, 1982, С. 5–12.
- 86 Теория и технология производства экономичных гнутых профилей проката / под ред. И.С. Тришевского. Сборник трудов. Выпуск XV. Изд. Харьков, 1970 г.
- 87 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.
- 88 Производство и применение гнутых профилей проката. Справочник. / под ред. И.С. Тришевского. – М.: Металлургия, 1975. – 536 с.
- 89 А.С. 1072949 СССР, МКИ В 21 D 5 / 06. Валок рабочей клетки профилегибочного стана / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов, Н.В. Пшеничная, Б.А. Обозный – Опубл. 15.02.84., Бюл. № 6.

- 90 А.С. 1593727 СССР, МКИ В 21 D 5 / 06. Клеть профилегибочного стана / М.Е. Докторов, Н.В. Пшеничная, С.А. Батулин, С.А. Чиж – Оpubл. 23.09.90., Бюл № 35.
- 91 Патент 2015770 Россия, МКИ В 21 D 5 / 06. Профилегибочный стан – Оpubл. 15.07.94. – Бюл № 13.
- 92 Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл – М.: ГИТТЛ, 1956. – 407 с.
- 93 Головня, Ю.Н. О влиянии процесса профилирования на качество защитных покрытий / Ю.Н. Головня, Г.П. Мастепанова, С.Я. Серденко // В сб.: Совершенствование технологии производства гнутых профилей проката. Харьков: УкрНИИМет, 1983. – С. 88 – 96.
- 94 Томенко, Ю.С. Исследование изменения качества покрытия при формовке оцинкованного настила / Ю.С. Томенко, Г.В. Олейник, Е.Н. Горбач, Е.В. Федорова // Совершенствование технологии производства сортового проката и гнутых профилей: Отрасл. сб. науч. тр. – Харьков: УкрНИИМет, 1989. – С. 37 – 41.
- 95 Олейник, Г.В. Особенности технологии профилирования облегченного оцинкованного настила / Г.В. Олейник, Е.Н. Горбач, В.И. Крылов, Н.П. Ковалев // Гнутые профили проката: Отрасл. Сб. научн. Тр.– Харьков: УкрНИИМет, 1987. – С. – 57 – 60.
- 96 Тришевский, И.С. Исследование возможности применения изгиба с радиальным растяжением при формообразовании профилей с покрытием. / И.С. Тришевский, Ю.Н. Головня // В сб.: Освоение производства и повышение качества гнутых профилей проката. Харьков: УкрНИИМет, 1985. – С. 5 – 14.
- 97 Головня, Ю.Н. Разработка и исследование технологии производства сложных профилей с поливинилхлоридным покрытием / Ю.Н. Головня, Н.Л. Волковой, Г.П. Мастепанова, Н.И. Дружинская // В сб.: Освоение производства и повышение качества гнутых профилей проката. Харьков: УкрНИИМет, 1985. – С. 62 – 68.
- 98 Воронин, И.В. Влияние статического изгиба на свойства полимерных покрытий / И.В. Воронин, Э.К. Кондрашов // ЛКМ. – 1980. – № 4. – С. 31 – 32.
- 99 Айнберг, С.Б. Свойства полимеров в различных напряженных состояниях / С.Б. Айнберг, Э.Л. Тюнина, К.И. Цируле. – М.: Химия, 1981. – 232 с.
- 100 Тришевский, И.С. и др. В кн: Тематический сборник научных трудов УкрНИИМет. Вып. 2. Харьков, изд. УкрНИИМет. 1974. С 5–17.
- 101 Река, Б.А. Исследование внутренних напряжений в деформированных лакокрасочных покрытий / Б.А. Река и др. // ЛКМ. –1985. –№1 – С. 16 – 18.
- 102 Санжаровский, А.Т. Методы определения механических и адгезионных свойств полимерных покрытий / А.Т. Санжаровский. – М.: Наука, 1974. – 116 с.
- 103 Протасов, В.Н. Исследование прочности и механизма разрушения полимерного покрытия при контактном нагружении / В.Н. Протасов // ЛКМ. – 1988. – № 5. – С. 34–36.

- 104 Скоков, Ф.И. Разработка и освоение технологии производства уголоковых профилей с отобортовками / Ф.И. Скоков, С.В. Колоколов, М.Е. Докторов, В.В. Клепандо / Теория и технология производства экономичных гнутых профилей проката. – Харьков: УкрНИИМет. –1970. – №15. – С. 277 – 283.
- 105 Патент 2118213 СССР, МКИ В 21 В 5 / 06. Способ производства С-образного гнутого профиля / В.Г. Антипанов, М.Ф. Сафронов, С.В. Кривоногов, В.Л. Корнилов – Оpubл. 25.06.97, Бюл. № 24.
- 106 А.С.1696042 СССР, МКИ В 21 В 6 / 06. Способ изготовления гнутых тонкостенных профилей / Н.Л. Волковой, Р.Ю. Деревбеев, А.И. Клементьева и др. – Оpubл. 7.12.91, Бюл. № 45.
- 107 Патент 1431158 Россия, МКИ В 21 D 5 / 06. Способ производства гнутых профилей проката типа швеллеров с гофрами жесткости / В.Г.Антипанов, В.И. Гридневский, В.Н. Кочубеев и др. – Оpubл. 15.12.84, Бюл. № 23.
- 108 А.С. 1750777 СССР, МКИ В 21 D 5 / 06. Способ изготовления полузамкнутых профилей / Н.Л. Волковой, В.С. Колоколов, И.С. Мамаев и др. – Оpubл. 30.07.92., Бюл. № 28.
- 109 А.С. 2025136 Россия, МКИ В 21 D 5 / 06. Способ изготовления полузамкнутых гнутых профилей / Н.Л. Волковой, Н.И. Дружинская, Т.П. Евстафьева и др. – Оpubл 30.12.94., Бюл. № 24.
- 110 А.С. 1003962 СССР, МКИ В 21 В 5 / 06. Способ производства гнутых профилей / И.С. Тришевский, Я.В. Хижняков, В.Ф. Гробин и др. – Оpubл. 15.03.83., Бюл. № 10.
- 111 А.С.755369 СССР, МКИ В 21 В 5 / 06. Способ изготовления профилей / И.С. Тришевский, Э.С. Дахновский, В.И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 15.08.80., Бюл. № 30.
- 112 А.С. 1291237 СССР, МКИ В 21 D 5 / 06. Способ изготовления сортовых гнутых профилей / А.Л. Игнатенко, Я.В. Хижняков, А.П. Антипенко и др. – Оpubл. 23.02.87., Бюл. № 7.
- 113 А.С.755369 СССР, МКИ В 21 В 5 / 06. Способ изготовления профилей / И.С.Тришевский, Э.С. Дахновский, В.И. Мирошниченко и др. – Оpubл. 15.08.80., Бюл. № 30.
- 114 А.С. 1736658 СССР, МКИ В 21 D 5 / 06. Способ изготовления гофрированных профилей / А.И. Медведев, В.П. Стукалов – Оpubл. 30.05.92., Бюл №20.
- 115 А.С. 997901 СССР, МКИ В 21 D 5 / 06. Способ изготовления профилей / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов, Н.В. Пшеничная – Оpubл. 23.02.83, Бюл.№7.
- 116 А.С. 541533 СССР, МКИ В 21 D 5 / 06. Способ изготовления профилей / В.И. Ершов – Оpubл. 05.01.77., Бюл №7.
- 117 Семчиков, Ю.Д. Высокомолекулярные соединения: Учеб. для вузов. Ю.Д. Семчиков. – М.: Издательский центр "академия", 2003. – 368 с.
- 118 Головня, Ю.Н. Распределение и мощность сил трения при формообразовании профилей с покрытиями / Ю.Н. Головня, В.Н. Ильющко, Н.Л. Волковой // В сб.: Производство гнутых профилей проката. Харьков: УкрНИИмет, 1986, С. 20 – 31.
- 119 А.С. 1754266 СССР, МКИ В 21 D 5 / 06. Способ изготовления гнутых тонко-

- стенных профилей / Н.М. Волковой, И.Я. Приходько, В.В. Костицын и др. – Оpubл. 15.08.92., Бюл. № 30.
- 120 Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. Справоч. изд. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
- 121 Тришевский, И.С. Оптимальный коэффициент трения при профилировании / И.С. Тришевский, В.Н. Бороденко, А.Б. Юрченко // В сб.: Освоение производства и повышение качества гнутых профилей проката. Харьков: УкрНИИМет, 1985, С. 44–48.
- 122 А.С. 1347432 СССР, МКИ С10 М 141 / 02. Смазочное покрытие для холодной деформации металлов. Б.А. Вавильев, А.Г. Черненко, В.Г. Смирнов, В.И. Соколовский, А.Н. Годин, А.К. Гаврилов, И.И. Домнин, В.Г. Шарипов; Урал. политехн. ин–т. опубл. 10.12.85. Бюл №34.
- 123 Painting: Urethane coatings have big fufure // Mod. Metals. – 1990. – 46, № 7. – С. 126 – 128.
- 124 Пат. 2156567 (ФРГ), 1971.
- 125 Verfahren zur formgebenden Bearbeitung von Vetallteilen mit anschlie Bender Lackierung: Заявка 4313752 ФРГ, МКИ В 21 D 37 / 18 / Naumann Matthias.
- 126 Инструмент с покрытием для обработки прокаткой, прессованием и вытяжкой. Miteinem Uberzug Versehene Werkzeuge fur das Umformen, insbesondere Walzen, Pressen und Ziehen: Пат. 689696 Швейцария, МПК С 23 С 014 / 04 / Rechberger Johann; Vilab AG. – № 02642 / 94; Заявл. 30.08.94; опубл. 31.08.99.
- 127 Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / под ред. И.С. Тришевского – Киев.: Техника, 1980. – 535 с.
- 128 Мударисов, З.Х. Гибочно–прокатный станок ГПС–200М / З.Х. Мударисов // Состояние и перспектива изготовления и применение листовых профилей в изделиях отрасли: материалы совещания. – НИАТ, 1990. – С. 23–25.
- 129 Мударисов, З.Х. Гибочно–прокатный станок ГПС–200М / З.Х. Мударисов, Г.В. Проскуряков, Б.М. Пигалов // Авиационная промышленность. – 1989. – № 12. – С. 9 – 11.
- 130 Тришевский, И.С. Исследование профилирования в валках, создание промышленной технологии производства гнутых профилей проката: автореферат, дис. д–ра техн. наук / И.С. Тришевский. – 1967. – 288 с.
- 131 Филимонов, В.И. Интенсификация процесса формообразования стесненным изгибом профилей для авиационных конструкций: дисс. канд. техн. наук / В.И. Филимонов. – Самара, СГАКУ, 1993. – 190 с.
- 132 Илюшкин, М.В. Влияние интенсификации процесса на нарушение покрытия профиля при изготовлении в роликах / М.В. Илюшкин, А.В. Филимонов // Актуальные вопросы промышленности и прикладных наук (ЗНТК-2004 г): Сборник статей международной заочной научно-технической конференции (1 окт. – 20 дек.). Ульяновск: УлГТУ, 2004. – С. 52.
- 133 Филимонов, В.И. Теория обработки металлов давлением: курс лекций / В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 208 с.

- 134 Илюшкин, М.В. Технологические особенности профилирования лент с покрытием / М.В. Илюшкин // Вузовская наука в современных условиях: Тез. докл. 38 науч.- техн. конф. (26 янв. – 1 февр.). – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – Ч.1. – С. 29.
- 135 Заявка № 4712196/28 от 29.06.89. Контрольный элемент для замера деформации поверхности металлов.
- 136 Патент на полезную модель № 37221 Россия, МКИ7 G 01 N 19 / 04 Устройство для испытания покрытия на отслоение / М.В. Илюшкин, В.И. Филимонов, А.В. Филимонов – Оpubл. 10.04.2004., Бюл. № 10.
- 137 Илюшкин, М.В. Расчет параметров бездефектного изготовления при формовке в роликах профилей из материалов с покрытием / М.В. Илюшкин, К.В. Турундаев // Актуальные вопросы промышленности и прикладных наук (ЗНТК-2004 г): Сборник статей международной заочной научно-технической конференции (1 окт. – 20 дек.). Ульяновск: УлГТУ, 2004. – С. 48.
- 138 Абанин, В.В. Моделирование контактного взаимодействия «инструмент – заготовка» при производстве в роликах гнутых профилей для автомобилестроения / В.В. Абанин, В.И. Филимонов, М.В. Илюшкин, В.А. Марковцев, С.В. Филимонов // Труды III Международной научно-практической конференции "Автомобиль и техносфера", Казань, 17-20 июня 2003 г., Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. – С. 148 – 153.
- 139 Илюшкин, М.В. Напряженно-деформированное состояние материала с покрытием в контактной зоне / М.В. Илюшкин, В.И. Филимонов // Вестник Ульян. гос. техн. ун-та. – Ульяновск, 2003 г. – № 3 – 4. – С. 28 - 30.
- 140 Мышкис, А.Д. Лекции по высшей математики / А.Д. Мышкис. – М.: Наука, 1969. – 640 с.
- 141 Марковцев, В.А. О соотношении силовых параметров при профилировании полосы / В.А. Марковцев, В.И. Филимонов, С.В. Филимонов // Сб. научных трудов УлГТУ "Механика и процессы управления". – 1998. – С. 50 – 55.
- 142 Гоффман, О. Введение в теорию пластичности для инженеров / О. Гоффман, Г. Закс. – М.: Машгиз, 1957. – 279 с.
- 143 Камке, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
- 144 Филимонов, В.И. Особенности технологии производства в роликах полузакрытых профилей с элементами жесткости из материала с покрытием / В.И. Филимонов, М.В. Илюшкин, В.А. Марковцев, С.В. Филимонов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2004. – №11. – С. 12 – 17.
- 145 Илюшкин, М.В. Особенности профилирования металла с покрытием /М.В. Илюшкин // 25-ая Научно-техническая конференция: Тезисы докладов. Ульяновск: УГТУ, 2002. – С. 41 – 42.
- 146 Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
- 147 Шенх, Х.Я. Теория инженерного эксперимента / Х.Я. Шенх. – М.: Мир, 1972 – 381 с.

- 148 Илюшкин, М.В. Определение предельных геометрических параметров сечения профиля при изготовлении в роликах из материалов с покрытием / М.В. Илюшкин, А.В. Филимонов // Актуальные вопросы промышленности и прикладных наук (ЗНТК-2004 г): Сборник статей международной заочной научно-технической конференции (1 окт. – 20 дек.). Ульяновск: УлГТУ, 2004. – С. 54 – 58.
- 149 Положительно решение по заявке № 2004103765/02 от 09.02.2004. МКП7 В 21 D 5/06. Способ изготовления швеллеров преимущественно из материалов с покрытием / В.И. Филимонов, В.А.Марковцев, М.В. Илюшкин, С.В. Филимонов.
- 150 Заявка № 2005117689 от 07.06.05 г. Роликовая оснастка для получения профилей из листовых заготовок / И.М. Колганов, К.В. Турундаев, М.В. Илюшкин.
- 151 Колганов, И.М. Влияние кривизны бурта формующего роликового инструмента на качество профиля при профилировании / И.М. Колганов, К.В. Турундаев, М.В. Илюшкин // Авиационная промышленность. – 2005. – № 3. – С. 35 – 37.
- 152 Положительное решение по заявке № 2004111825/02 от 19.04.2004. МКП7 В 21 D 5/06. Торцевая проводка клетки профилегибочного стана / В.И. Филимонов, М.В. Илюшкин, В.А. Марковцев, С.В. Филимонов.
- 153 Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979.– 520 с.
- 154 Технологичность конструкции изделия: Справочник / под ред. Ю.Д. Амирова. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.
- 155 Березовский, С.Ф. Производство гнутых профилей / С.Ф. Березовский, Ф.М. Кропылев. – М.: Металлургия, 1978. – 152 с.
- 156 ГОСТ 9.032–74. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения.