

*Ульяновский государственный
технический университет*

*Ульяновский государственный
педагогический университет*

В.И. Филимонов, В.В. Левщанов

**Моделирование процессов
формообразования
гнутой профилей в роликах**

**Ульяновск
2009**

УДК 539.375+517.9+681.3

ББК 22.251

Ф53

Рецензент:

профессор кафедры «Материаловедение и ОМД» Ульяновского государственного технического университета, д.т.н. Ю.А. Курганова

Одобрено редакционно-издательским советом

Филимонов В.И., Левщанов В.В.

Моделирование процессов формообразования гнутых профилей в роликах / В.И. Филимонов, В.В. Левщанов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2009. – 50 с.; илл. 362.
ISBN 5 – 89146 –

Книга предназначена для разработчиков, технологов и конструкторов, работающих в области профилирования заготовок в роликах и создания профилировочного и профилегибочного оборудования.

УДК 539.375+517.9+681.3

ББК 22.251

Научное издание

ФИЛИМОНОВ Вячеслав Иванович, ЛЕВЩАНОВ Владимир Викторович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ В РОЛИКАХ

Редакторы О.С. Бычкова, О.А. Семенова

Технический редактор В.Н. Кокорин

Подписано в печать 30. 10. 2008. Формат 60 × 84/16. Бумага тип. №1. Печать трафаретная. Уч.–изд. л. 3,2. Тираж 100 экз. Заказ xxx .

Ульяновский государственный технический университет

432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32

ISBN 5 – 89146 –

© Филимонов, В. И., Левщанов В.В., 2009

© Оформление. УлГТУ, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
1. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ	4
2. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ (оборудование, технологическое оснащение)	8
3. ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ	11
4. МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ	12
4.1 Модель интенсивного деформирования перфорированных заготовок при профилировании	12
4.2 Модель деформационного упрочнения материала при профилировании с высвобождением угловой зоны	18
4.3 Модель формовки угловых зон с высвобождением в калибре	24
4.4 Моделирование угловой зоны при посадке полки	28
4.5 Модель зоны плавного перехода при интенсивном формообразовании профиля из упрочняющегося материала	31
4.6 Моделирование реализации аксиального сжатия	37
4.7. Моделирование формовки гофр в донной части профиля	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	49

ВВЕДЕНИЕ

«Профильный бум» последнего десятилетия в условиях меняющейся конъюнктуры и постоянного совершенствования конструкций профильных деталей для строительной индустрии вызвал необходимость создания мало-переходной технологии производства гнутых профилей в роликах и компактного оборудования для их производства. Технология и оборудование такого класса делают возможным их приобретение и использование небольшими производственными фирмами, не располагающими значительными инвестиционными ресурсами [1]. За последние два десятилетия также произошли существенные изменения в номенклатуре и качестве производимых листовых и рулонных материалов, используемых в качестве заготовок для производства гнутых профилей, что позволило расширить сферы применения гнутых профилей [2].

Разработка новых технологий интенсивного формообразования, оборудования, освоение производства в роликах новых типоразмеров гнутых профилей связаны с решением ряда технических вопросов на основе состоятельных математических моделей процессов их формообразования.

Данная книга посвящена именно разработке таких моделей.

1. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Гибку профилей из ленты и листовых заготовок можно производить различными методами (рис. 1). Обладая определенными достоинствами и недостатками, эти методы изготовления профилей имеют свои области применения и различную экономическую и технологическую эффективность [3]. Выбор метода производства гнутого профиля зависит от его типоразмера, требований к нему и имеющегося на предприятии или приобретаемого оборудования, что определяет технологическую эффективность производства. Учет организационных мер, конъюнктуры рынка и других сопутствующих факторов позволяют оценить и экономическую эффективность.

В последние годы наметилась устойчивая тенденция ко все большему использованию технологий интенсивного формообразования (см. п. 5.2 классификатора рис. 1) для изготовления длинномерных тонкостенных деталей постоянного поперечного сечения из различных материалов, преимущественно с покрытием, на парно-роликовых профилегибочных станках.

В сравнении с другими методами производства таких деталей (гибкой в штампах, прессованием, гибкой в машинах с поворотной траверсой, традиционным профилированием), технологии интенсивного формообразования (стесненный изгиб [4] и метод интенсивного деформирования [1], см. рис. 1) обладают рядом преимуществ:

- возможность изготовления профилей минимальной толщины разнообразной номенклатуры;
- возможность замены сочетания нескольких стандартных профилей в конструкциях одним, имеющим сложную конфигурацию;

- возможность изготовления профилей из заготовок с покрытием;
- возможность производства профилей повышенной жесткости (с утолщением зоны сгиба до 20-30 % и минимальным радиусомгиба в 2-3 меньше допустимого радиусагиба, принятого для традиционных методовгибки; возможность деформирования высокопрочных и композиционных материалов, обладающих низкими пластическими свойствами;

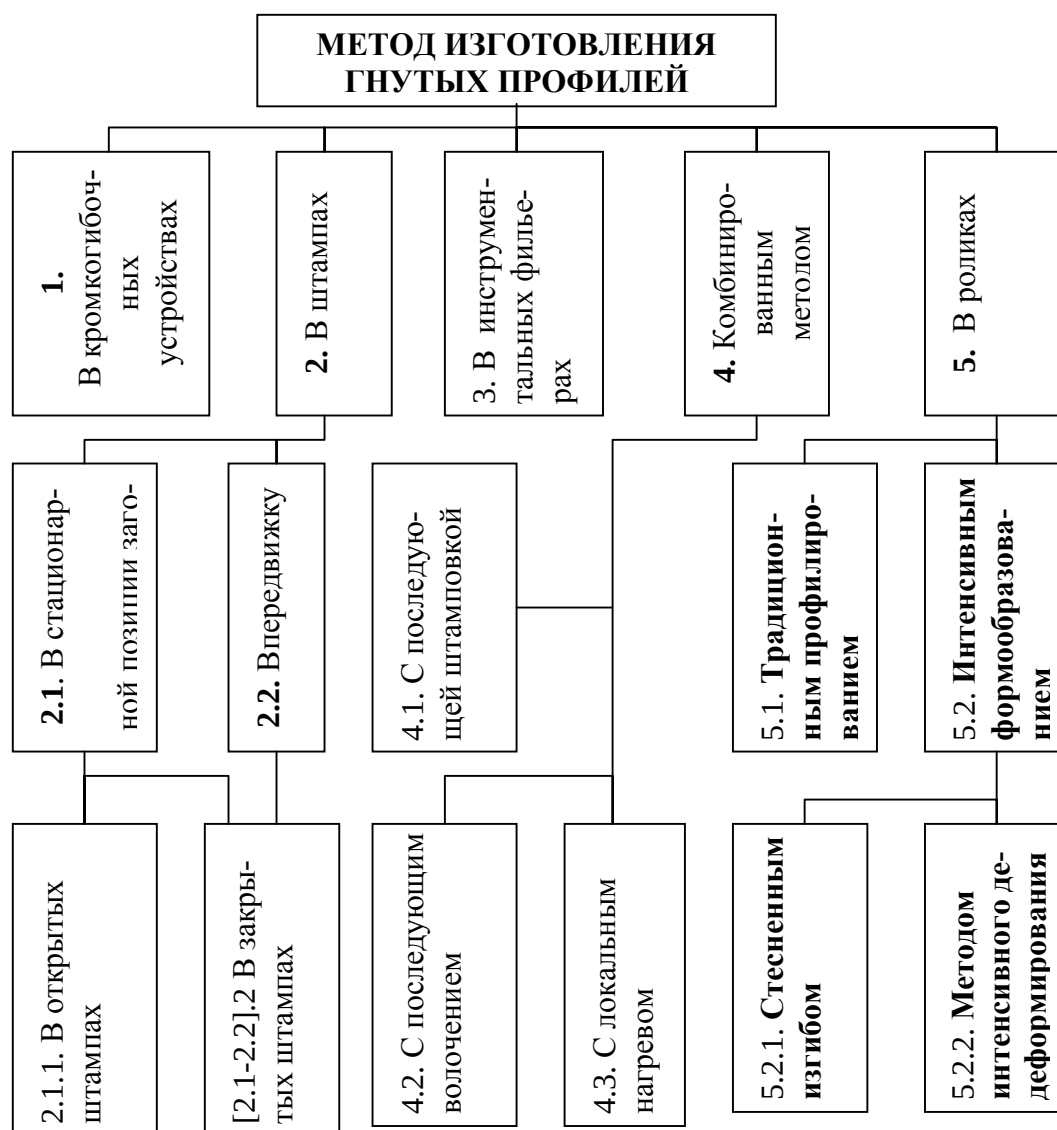


Рис. 1. Классификатор методов изготовления гнутых профилей

- незначительные отходы металла (не превышающие обычно 1...2 %);
- высокое качество поверхности профиля, с шероховатостью, не превышающей, как правило, 0,63 мкм;
- высокая точность размеров профилей, не ниже точности 8 – 10 квалитетов;
- возможность использования компактного оборудования, имеющего низкое энергопотребление, малые габариты и невысокую стоимость;
- применение малого количества технологического оснащения, что позволяет сократить затраты на технологическую подготовку

производства и уменьшить время и трудоемкость переналадок оборудования;

- сравнительно высокая производительность труда и адаптируемость процесса к масштабам производства;
- возможность совмещения профилирования с другими производственными процессами (правка, отрезка, гибка по контуру) - возможность механизации и автоматизации производства и др.

В принципе, традиционное профилирование и интенсивные методы формообразования относятся к процессам гибки заготовки в роликах. Однако при всей условности такого разделения процессов, оно позволяет более четко определять производственную ориентацию, научную и технологическую специфику соответствующих направлений. Причем, это разделение имеет достаточно веские основания. В табл. 1 приведены характерные отличительные черты каждого из этих методов формообразования профиля в роликах: **традиционное профилирование (ТП), метод интенсивного деформирования (МИД) и стесненный изгиб (СИ).**

При использовании МИД нейтральный слой деформаций (НСД) практически совпадает со средней линией (СЛ), в то время как при традиционном профилировании нейтральный слой деформаций смещается к внутреннему контуру, а при стесненном изгибе – к наружному контуру зоны сгиба (рис. 2). Отсюда видно, что при стесненном изгибе и методе интенсивного деформирования происходит разгрузка наружного контура зоны сгиба, что позволяет достигать меньших радиусов изгиба без разрушения заготовки. Весьма существенным отличием МИД от других методов изготовления профиля в роликах является знакопеременная продольная деформация подгибаемых полок по переходам. Обеспечение технологических режимов, позволяющих дифференцированно изменять продольную деформацию полок позволяет предотвратить ряд дефектов профиля, в частности, кромковую волнистость, излом полок, боковое выпучивание. Режим знакопеременной деформации осуществляется за счет изменения соотношений диаметров формирующих роликов от перехода к переходу, настройкой профилировочного станка или же путем использования специальных межклетевых проводок [1].

При стесненном изгибе наряду с малым радиусом зон сгиба (меньшим допустимого для данного материала) возможно получение утолщения в уголковогой зоне за счет придания заготовке волнообразной формы с последующей ее осадкой [4]. Возможны схемы с торцевым поджатием при плоской стенке, однако для набора утолщения в угловой зоне данная схема пригодна лишь для профилей с малой шириной полок (до $(20...30)S_0$, где S_0 – толщина исходной заготовки). С увеличением ширины полки происходит либо потеря ее устойчивости (неплоскостность полки в поперечном направлении), либо возникает кромковая волнистость. Общим и существенным недостатком метода стесненного изгиба являются его весьма ограниченные технологические возможности. Этим методом можно изготавливать только профили открытого сечения, позволяющие производить осадку изогнутых в продольном направлении элементов.

Таблица 1

Характеристика методов формообразования профиля в роликах

Характерный показатель	Традиционное Профилирование	Метод Интенсивного Деформирования	Степанный Изгиб
1. Толщина заготовки, мм	0,5...3,0	0,5...3,0	0,5...3,0
2. Скорость профилирования, м/мин	12...60 (до 180)	6...30	2...15
3. Углы подгибки за переход, град.	8..12	10...40	10...40*
4. Тип калибра	Открытый с высвобождением	Закрытый	Закрытый
5. Форма калибра	Прямолинейные участки с сопряжением в углах	Прямолинейные участки с сопряжением в углах	Волнообразная
6. Диаметры роликов (по межосевому расстоянию)	D	$(0,4...0,7) \cdot D^{**}$	$(0,5...0,7) \cdot D$
7. Число переходов	N	$(0,5...0,7) \cdot N$	$(0,4...0,7) \cdot N$
8. Приложение дополнительных сил	—	Аксиальная, торцевая***	Торцевая, осадка заготовки
9. Правильное устройство	Не обязательно	Обязательно	Обязательно
9. Режим формовки радиусагиба	Плавный по переходам	На первых переходах	На последних переходах
10. Форма линии профилирования	Прямая	Кривая	Кривая
11. Технологические возможности: а) Н/С (отношение высоты профиля к ширине его дна) б) r_B/s_0	Любые $r_B/s_0 > (r_B/s_0)_{\text{доп.}}$	Любые $r_B/s_0 > 0,5$	$H/C \leq 2$ для прямой схемы; $H/C < 5$ для обратной схемы $r_B/s_0 > 0$
* – измеряется по наклону прямолинейного участка боковой стенки; ** – различие в значениях средних диаметров; *** – для специальных схем			

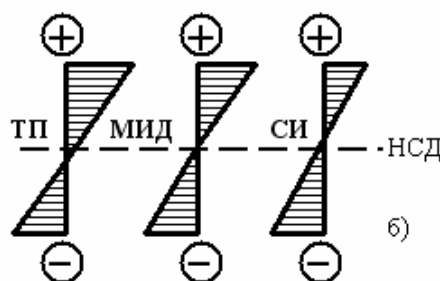
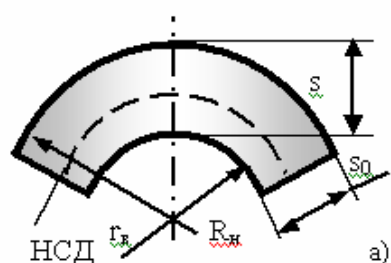


Рис. 2. Угловая зона и окружные деформации при различных методах изготовления профиля в роликах: а – зона сгиба; б – эпюры окружных деформаций

Таким образом, из рассмотренных методов изготовления гнутых профилей в роликах предпочтительным является метод интенсивного деформирования.

2. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ИНТЕНСИВНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Оборудование. Метод интенсивного деформирования реализуется на автоматических линиях профилирования [1, 5], содержащих обычно разматывающую рулонницу, перфоратор, профилировочный станок с правильным устройством, летучий отрезной штамп и приемный стол (рис. 3).

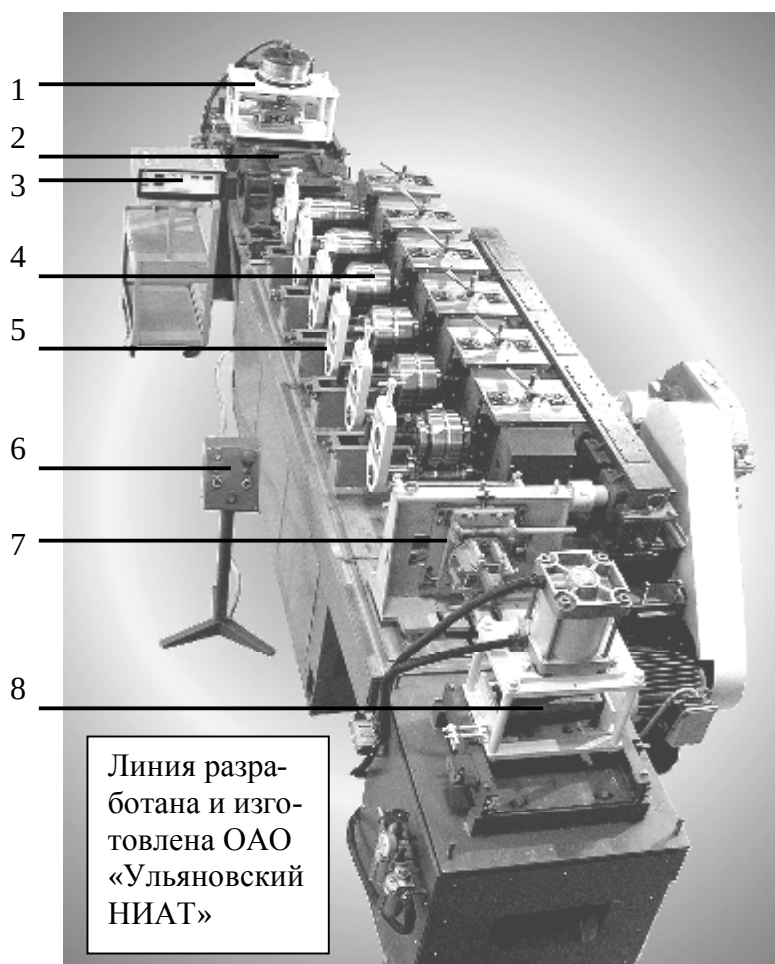


Рис. 3. Автоматическая линия профилирования на базе станка ГПС-300М6 (разматывающая рулонница и приемный стол условно не показаны): 1 – перфоратор; 2 – направляющее устройство; 3 – отсчитывающее устройство; 4 – клеть станка; 5 – серьга зажимающая; 6 – пульт управления; 7 – правильное устройство; 8 – летучий штамп отрезной

него и верхнего ползунов в вертикальной плоскости осуществляется вращением соответствующих винтов. Крутящий момент рабочим валам передается от раздаточной коробки через карданные валы. На рабочих валах клетки при помощи замыкающей опоры закреплены ролики. Замыкающая опора представляет собой основание, в котором установлены стойки с перемещающи-

В качестве примера ниже дается описание универсального профилирующего станка СПУ-400К8х65 разработки ООО «Спецтехнология», предназначенного для изготовления методом интенсивного деформирования в роликах мелкосортного гнутого профиля. Станок [6] состоит из двух секций с четырьмя профилирующими клетями каждая, направляющего устройства, правильного устройства и системы управления.

Основными узлами стана являются профилирующие клетки. Клеть представляет собой основание, в котором установлены стойки с перемещающимися по ним ползунами. В ползунах на подшипниках качения установлены рабочие валы. Перемещение ниж-

мися ползунами. В ползунах зафиксированы концы рабочих валов профилирующей клетки. Регулировка перемещения нижнего и верхнего ползунков осуществляется посредством ходовых винтов.

Заготовка, после центрирования в направляющем устройстве, захватывается роликами профилирующей клетки с горизонтальным расположением приводных рабочих валов и подается последовательно в профилирующие клетки. Между профилирующими клетями могут быть установлены промежуточные клетки с роликами или фильерами на вертикальных осях. За последней профилирующей клетью установлено устройство правильное с роликами, которое крепится болтами к торцу станины.

Технические характеристики СПУ-400К8х65 приведены ниже.

Максимальная глубина профилирования, мм	60
Скорость профилирования, м/мин	8 - 10
Максимальная толщина заготовки, мм	2,0
Максимальная ширина заготовки, мм	360
Клеть профилирующая:	
Диаметр рабочих валов, мм	65
Длина рабочей части валов, мм	400
Регулировка верхнего вала клетки по вертикали, мм	50
Межосевое расстояние между роликами с оснасткой:	
минимальное, мм	130
максимальное, мм	190
Мощность электродвигателя стана, кВт.	11

Технологическое оснащение. Технологическое оснащение для изготовления листовых профилей по группам основных операций включает: 1) оснастку для раскройно-заготовительных операций в составе ножей многодисковых, инструмента для обсева скосов; 2) оснастку для пробивки отверстий (перфорационные штампы летучего типа, перфорационные штампы на базе летучих прессов); 3) оснастку для формообразования профилей в составе роликов формующих, втулок распорных, роликов правильных, роликов или фильер промежуточных; 4) оснастку для резки профиля в размер (отрубные штампы летучего типа, отрубные штампы на базе летучих прессов).

Основным инструментом являются формующие ролики, которые должны отвечать не только требованиям функционального назначения и стойкости, но и ряду эргономических требований: удобство установки ролика на станок; удобство настройки горизонтальной оси профилирования; удобство установки зазора в паре роликов и т.п.

Особенности интенсивного формообразования [3, 7] не позволяют заимствовать схемы традиционного профилирования и конструкцию гибочных роликов. Главной особенностью рабочих калибров для интенсивного формообразования является замкнутый по всему периметру рабочий контур (закрытый калибр). Замыкание рабочего контура, осуществляемое по торцам калибров, обеспечивается специальными конструктивными элементами двух типов: буртами, применяемыми при горизонтальном расположении краевых

элементов профиля, и уступами – при их вертикальном расположении. К основным достоинствам закрытого калибра можно отнести следующее:

1) обеспечение условий интенсификации процесса профилирования; 2) обеспечение устойчивости процесса формообразования гнутых тонкостенных профилей; 3) обеспечение точности поперечного сечения профиля; 4) удобство в процессе изготовления инструмента (возможность контролировать зазор в паре роликов); 5) удобство установки роликов на станок.



Рис. 4. Комплекты формирующих роликов для реализации технологии интенсивного формообразования

Конструктивно ролики технологических переходов могут быть выполнены цельными или сборными. Применять конструкции сборных роликов рекомендуется в случаях: 1) невозможности или сложности обработки рабочей поверхности инструмента; 2) необходимости изготовления гаммы однотипных профилей, например, профилей швеллерного типа с различной шириной донной части; 3) частой замены быстроизнашивающейся рабочей части ролика.

Диаметры формирующих роликов на всех переходах выбирают конструктивно, исходя из межцентрового расстояния, диаметров рабочих валов и глубины формовки (глубины "вреза"). Для достижения достаточной прочности роликов необходимо обеспечить в местах минимальной толщины в радиальном направлении запас материала не менее 10 мм. При глубине формовки

Основным недостатком инструмента такой конструкции является сложность его изготовления.

На рис. 4 представлены ролики для интенсивного формообразования профилей, которые располагают на горизонтальных осях профилировочных станков. Однако для предварительных переходов возможно использование роликов с вертикальными осями (рис. 5).

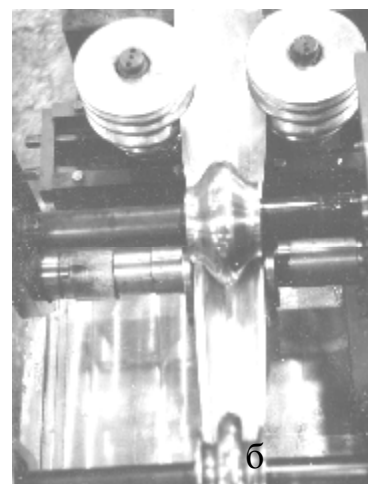


Рис. 5. Ролики с вертикальными осями для придания заготовке направленной потери устойчивости

до 50 мм рекомендуется диаметры роликов выбирать в диапазоне от 90 до 200 мм.

Важным вопросом обеспечения качества технологического оснащения и, следовательно, качества изготавливаемого профиля является выбор материала. Ниже указаны материалы профилегибочного инструмента с указанием его твердости в результате термической обработки:

- Сталь 20, 20X – оси вспомогательных роликов с цементацией и закалкой до твердости HRC = 60...63; дистанционные втулки без термообработки.
- Сталь 40X – оси вспомогательных роликов, с закалкой до HRC = 42...46.
- 9X, 9XBG, XBG – формовочные валки сложной конфигурации, применяются после термической обработки с твердостью HRC = 55...59.
- 9XC – формовочные валки сложной конфигурации, применяется после закалки с твердостью HRC = 58...62. Эта сталь является лучшим материалом для изготовления валкового инструмента сложной формы.
- Ст. 45 – формовочные валки простых конфигураций, небольших диаметров, применяются после термической обработки при HRC = 55...59.

Геометрические параметры рабочих контуров формирующих роликов и другие размеры получают в результате разработки технологии.

3. ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

Применение метода интенсивного формообразования для мелкосерийного производства гнутых профилей имеет некоторые ограничения, обусловленные спецификой процесса формообразования [8]. Укажем основные из них: 1. Формообразование перфорированных заготовок сопровождается деформацией отверстий или разрушением заготовки; 2. При незначительной подсадке полки в закрытом калибре с высвобождением угловых зон напряженно-деформированное состояние упрочняющейся заготовки существенно влияет на характеристики точности. При этом важно учитывать смещение нейтральных поверхностей в процессе формообразования; 3. При значительной подсадке основной подгибаемой полки появляется возможность влиять на пружинение заготовки, однако это может приводить к микроскладкам и разрушению заготовки на внутреннем контуре зоны изгиба; 4. При назначении завышенных углов подгибки может происходить переформовка заготовки, а в случае формообразования широких профилей из тонких заготовок, наоборот, возможны резервы для увеличения углов подгибки, обусловленные эффектом упругой отдачи донной части заготовки; 5. В некоторых случаях возникает необходимость предотвратить утонение или существенно повысить жесткость угловой зоны, однако значительный избыток заготовки для заполнения угловой зоны роликового калибра не приводит к желаемому результату – происходит вытяжка материала в осевом направлении.

Указанные проблемы могут быть отчасти решены путем моделирования соответствующих процессов, что позволяет существенно снизить затра-

ты на освоение технологии производства соответствующих типоразмеров гнутых профилей.

4. МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ

4.1. Модель интенсивного деформирования перфорированных заготовок при профилировании [9]

В последние годы резко возрос спрос на гнутые профили с различными формами отверстий весьма разнообразной топологии. Технология производства длинномерных перфорированных (просечных) профилей, ориентированная на их изготовление в роликах профилегибочных машин, может иметь различные варианты сочетаний процессов перфорации и собственно профилирования [9, 10]: 1. Перфорация ленты в штампе – профилирование в роликах; 2. Перфорация ленты в роликах – профилирование; 3. Профилирование ленты – перфорация в штампах (роликах).

Преимущество первого процесса состоит в возможности обеспечения высокой точности размеров пробиваемых отверстий и их расположения. Однако отверстия значительных размеров могут существенно осложнять процесс профилирования в отношении обеспечения размерной точности отверстий и самого профиля: размеры отверстий могут изменяться; ослабление сечения может приводить к поводкам (прогибу, скрутке) или же локальной потере устойчивости (кромковой волнистости, излому полок).

Второй процесс может быть реализован двумя преимущественными способами: 1) перфорацией в роликах перед профилированием (например, в первых клетях на горизонтально плоских участках); 2) комбинированным способом, когда перфорация осуществляется перед собственно профилированием на участках заготовки, подлежащих подгибке, и в срединных клетях на неподгибаемых элементах. В этом случае возможна некоторая диверсификация процесса, например, перфорация в последних клетях, перфорация на наклонных подгибаемых элементах. Однако все комбинации данного процесса связаны с понижением параметров точности изготавливаемого профиля, усложнением технологической оснастки, снижением стабильности технологического процесса.

Перфорация профиля в штампах или роликах после его формообразования хотя и возможна, однако она имеет существенные ограничения: перфорирование возможно лишь на открытых участках (преимущественно донная часть профиля или горизонтальные полки). В отличие от первых двух процессов здесь не предусматривается своего рода калибровка профиля в роликах, которая сглаживает мелкие дефекты типа локальной вытяжки вблизи отверстия при притуплении матриц и пуансонов, поводок, возникающих вследствие перераспределения остаточных напряжений и т.д.

Хотя на практике применяются все три варианта реализации технологии, все же предпочтение следует отдавать процессу, предусматривающему предварительную пробивку отверстий и последующее профилирование [11],

что может сопровождаться изменением формы и размеров отверстий. Это может привести к тому, что весь профиль окажется непригодным к использованию или же ухудшатся его служебные характеристики из-за высокого уровня и неравномерного распределения остаточных напряжений. В ряде случаев возможны разрушения металла вблизи зон с высокой концентрацией напряжений и значительными деформациями.

Здесь задача состоит в изучении напряженно-деформированного состояния металла вблизи отверстий при профилировании перфорированной ленты и учету его в технологии производства гнутых перфорированных (просечных) профилей. При профилировании перфорированной заготовки методом интенсивного деформирования [3], она подвергается действию не только изгибающих моментов, но также и действию торцевого поджатия в закрытом калибре. Наличие закрытого калибра (а также межклетевых проводок в некоторых схемах формообразования) не допускает потери устойчивости заготовки в форме бокового выпучивания.

В первом приближении часть заготовки в межклетевом пространстве можно рассматривать как пластину ограниченной или неограниченной длины, что определяется применяемой схемой формообразования. Так, в отсутствие межклетевых проводок при значительном торцевом поджатии влияние смежных с очагом пластической деформации участков на расстоянии, соизмеримом с шириной подгибаемого элемента профиля, несущественно, а нагружение можно считать близким к нагружению сосредоточенной силой.

При наличии скользящей межклетевой проводки с роликовым треком пластину следует считать бесконечной, а нагружение равномерным. Эти две схемы нагружения представлены на рис. 6.

Рассмотрим вторую схему в качестве предпочтительной для обеспечения надлежащего качества изготавливаемого профиля (рис. 6, б) на двух стадиях: упругого сжатия и закритического сжатия в торец.

Пусть полка с центрально расположенным круговым отверстием нагружена равномерно распределенной сжимающей силой интенсивностью q (или напряжением $s_0 = q/S_0$, где S_0 – толщина полки). Начало системы коор-

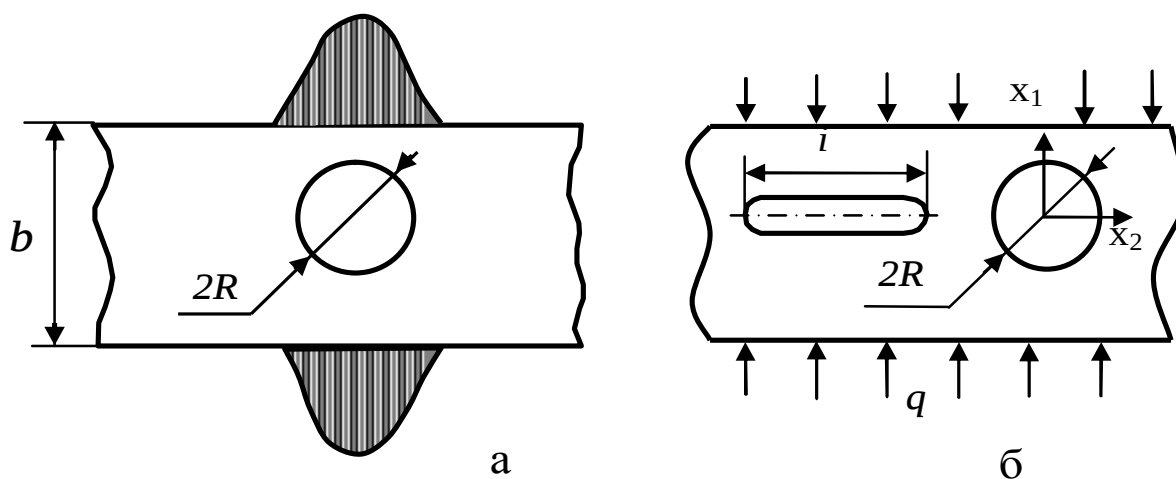


Рис. 6. Схема нагружения участков заготовки при формовке в горизонтальных роликах (а) и с межклетевой проводкой (б)

динат поместим в центр отверстия, а оси развернем так, как показано на рис. 6, б. Затем перейдем к полярной системе координат, вводя радиус r и полярный угол θ . Отверстие вносит возмущение в распределение напряжений в области, прилегающей к отверстию (при $r < 3R$), а на значительном удалении от отверстия поле напряжений можно считать однородным, независимо от наличия отверстия.

Напряженное состояние в произвольной точке заготовки описывается зависимостями [12]:

$$\left. \begin{aligned} s_{rr} &= -\frac{1}{2} s_0 (1 + \cos 2q) \\ s_{qq} &= -\frac{1}{2} s_0 (\cos 2q - 1) \\ s_{rq} &= -\frac{1}{2} s_0 \sin 2q \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где σ_{rr} , σ_{qq} , σ_{rq} – напряжения.

Очевидно, что на значительном удалении от центра отверстия, напряжения (1) могут быть представлены в виде осесимметричной и неосесимметричной части. Для осесимметричной части, представляемой модельной задачей сжатия кольца, нагруженного напряжением $s_0/2$ по наружному контуру и имеющий свободный от напряжений внутренний контур, решение в терминах функции Эри известно [13]:

$$\Phi_c(r) = \frac{s_0}{4} (2R^2 \ln r - r^2), \quad (2)$$

где $\Phi_c(r)$ – функция Эри; r – текущая радиальная координата.

Неосесимметричная функция напряжений Эри $\Phi_n(r, \theta)$ для задачи сжатия кольца с напряжениями на внешней границе:

$$s_{rr} = \frac{s_0}{2} \cos 2q, \quad s_{rq} = \frac{s_0}{2} \sin 2q, \quad (3)$$

представляется в виде:

$$\Phi_n(r, q) = f(r) \cos 2q. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение для функции $f(r)$ в зависимости (4) можно получить из общего бигармонического уравнения:

$$\nabla^2 \Phi_n(r, q) = 0, \quad (5)$$

где ∇ – дифференциальный оператор, имеющий вид:

$$\nabla = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - \frac{4}{r^2}, \quad (6)$$

Общее решение уравнения (5) относительно входящей функции $f(r)$ дается формулой [14]:

$$f(r) = a_1 r^4 + a_2 r^2 + a_3 r^{-2} + a_4,$$

где $a_1, \dots, a_4$ – постоянные интегрирования, определяемые из нулевых значений напряжений σ_{rr} , $\sigma_{r\theta}$ на внутреннем контуре пластины:

$$a_1 = 0; a_2 = \frac{S_0}{4}; a_3 = \frac{S_0}{4} R^4; a_4 = -\frac{S_0}{2} R^2, \quad (7)$$

где R – радиус отверстия.

Из формул (4), (6), (7) получаем искомое выражение для неосесимметричной функции напряжения Эри:

$$\Phi_H(r, q) = \frac{S_0}{4} \left(r^2 + \frac{R^4}{r^2} - 2R^2 \right) \cos 2q. \quad (8)$$

Производя суммирование осесимметричной (2) и неосесимметричной (8) функции напряжений Эри, получаем:

$$\Phi_H(r, q) = \frac{S_0}{4} \left[\frac{(r^2 - R^2)}{r^2} \cos 2q - r^2 - 2R^2 \ln r \right]. \quad (9)$$

Взяв соответствующие частные производные от функции (9), получаем формулы для соответствующих решений:

$$\begin{aligned} s_{rr} &= \frac{S_0}{2} \left[\left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) - \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2q \right], \\ s_{qq} &= \frac{S_0}{2} \left[- \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right) + \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \cos 2q \right], \\ s_{rq} &= \frac{S_0}{2} \left[\left(1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4} \right) \sin 2q \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Эти формулы совпадают по форме с известным решением [14], полученным с помощью комплексных функций напряжений.

Из формул (10), в частности следует, что при $r = R$ (контур отверстия):

$$s_{qq} = S_0 (2 \cos 2q - 1), \quad (11)$$

откуда видно, что для некоторых направлений осей напряжение σ_{qq} может втрое превышать значение напряжения, приложенного к торцевой поверхности заготовки.

Для отверстия продолговатой и овальной формы, картина распределения напряжений аналогична, причем вне зависимости от их ориентации в плоскости детали. Например, для относительно узкого отверстия, расположенного поперечно по отношению к оси профилирования, нагружение сосредоточенной силой кромки заготовки на уровне отверстия приводит к следующему значению коэффициента концентрации напряжений K :

$$K = \frac{T}{S_0 b} \sqrt{\frac{p l}{2}} F, \quad (12)$$

где T – сосредоточенная сила, S_0 – толщина заготовки; b – ширина полки; l – характерный параметр отверстия; F – функция, принимающая значения от 0,2 до 1,2 в зависимости от геометрических характеристик рассматриваемой области деформирования.

В общем случае форма и размеры заготовки и отверстия, а также топология последнего существенно влияют на значение коэффициента концентрации.

Рассмотрение упругой стадии деформирования заготовки важно для профилирования в том отношении, что возможно контрастное сопоставление традиционного профилирования с большим числом переходов, где подгибаемая полка может пребывать в упругом состоянии (кроме области, примыкающей к зоне сгиба), и метода интенсивного деформирования, при использовании которого подгибаемая полка находится преимущественно в пластическом состоянии. В то же время наличие концентраций напряжений вблизи контура отверстия создает предпосылки для перехода материала из упругого состояния в пластическое при незначительной "догрузке" (например, при изгибе заготовки перед входом в калибр очередной формующей пары роликов).

Характер распределения напряжений в упругой области согласно формулам (10) представлен на рис. 2.2, где видна локализация напряжений в области, примыкающей к отверстию, а также их затухание по мере удаления от границ отверстия. В пластической области, для круглого отверстия, нагрузка действует в плоскости полки, при этом напряжения обозначенные на рис. 7. индексом «3», равны нулю, если принять, что нормальные к середине поверхности перемещения незначительны.

При этих условиях уравнения равновесия $\sigma_{ij,j} = 0$ (i, j принимают значения от 1 до 3) приводятся к двум дифференциальным уравнениям в частных производных, а переход к главным напряжениям позволяет получить их значения в следующем виде [12]:

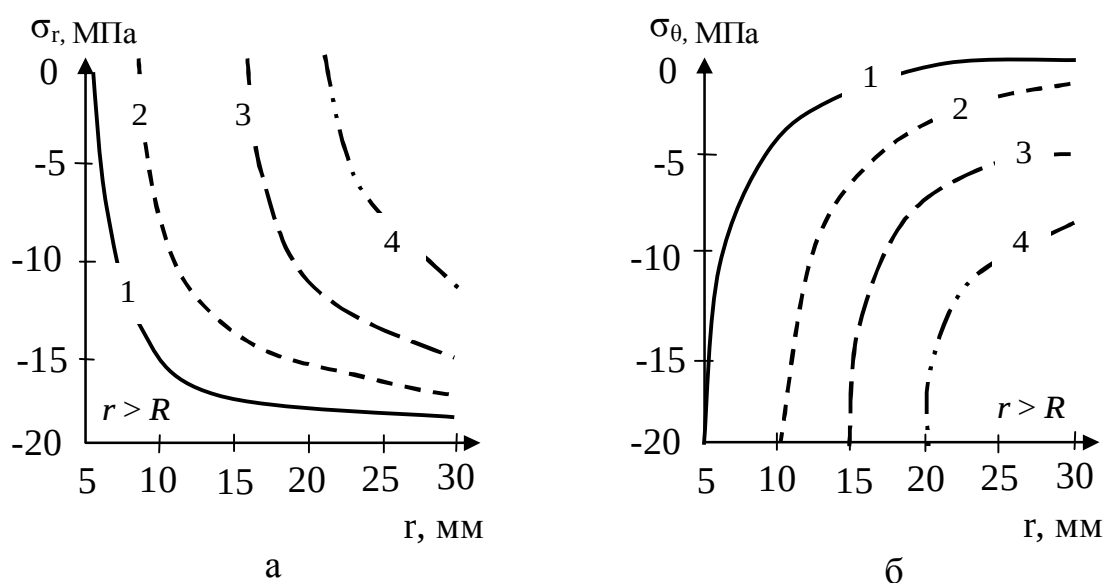


Рис. 7. Распределение радиальных (а) и тангенциальных (б) напряжений по радиусу r , под углом 45° к оси X_1 в упругой области для отверстий с различными радиусами R , мм: 5(1), 10(2), 15(3), 20(4)

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{s_{11} + s_{22}}{2} + \sqrt{\left(\frac{s_{11} - s_{22}}{2}\right)^2 + s_{12}^2}, \\ s_2 &= \frac{s_{11} + s_{22}}{2} - \sqrt{\left(\frac{s_{11} - s_{22}}{2}\right)^2 + s_{12}^2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где σ_1 и σ_2 – главные напряжения.

Вычисление главных деформаций производится по аналогичным формулам, причем выполняется условие несжимаемости материала заготовки. Очевидно, решение уравнения равновесия с условием пластичности и соответствующими граничными условиями приводит к нижней границе разрушающей нагрузки.

В случае сплошной заготовки, значение разрушающего напряжения может быть принято σ_p , однако наличие отверстия снижает это значение до величины $p_p = c \sigma_p$, где c – коэффициент ослабления ($0 \leq c \leq 1$).

Определить возможные нижнюю и верхнюю границы разрушающего напряжения p можно, анализируя поля разрывов скоростей вместо поиска точного решения задачи пластичности, если ввести коэффициент:

$$V = \frac{2R}{b}, \quad (14)$$

то верхней границей коэффициента ослабления c_B будет величина:

$$c_B = \sqrt{2 - 4V + 3V^2} - V, \quad (15)$$

а нижней границей c_b будет величина:

$$c_b = \frac{1}{2V}(1 - V)^2. \quad (16)$$

Соотношения (15) и (16) получены из анализа разрывов полей возможных скоростей для случая плоского напряженного состояния.

Из рис. 8 видно, что обе границы лежат достаточно близко, и принимая во внимание статистический характер проявления свойств материала и характер реального нагружения, обе оценки можно считать достоверными в пределах статистической погрешности.

Заметим, что при достаточно высоком уровне сжимающих напряжений и диаметре отверстия, соизмеримом с шириной полки, в зонах, примыкающих к точкам пересечения координатных осей с контуром отверстия, образуется некое подобие "пластических шарниров". В этих зонах при торцевом сжатии могут наблюдаться нарушения сплошности материала или локальное "продавливание". Последнее явление более характерно для отверстий продолговатой формы с расположением большего размера перпендикулярно или под углом в пределах 45° по отношению к кромке заготовки.

Для плоской задачи теории пластичности, в принципе возможно получение приближенных аналитических решений, рассматривая условия разрыва скоростей деформации на границах «пластических шарниров», возникающих при достаточно высоком уровне сжимающих напряжений в зонах примы-

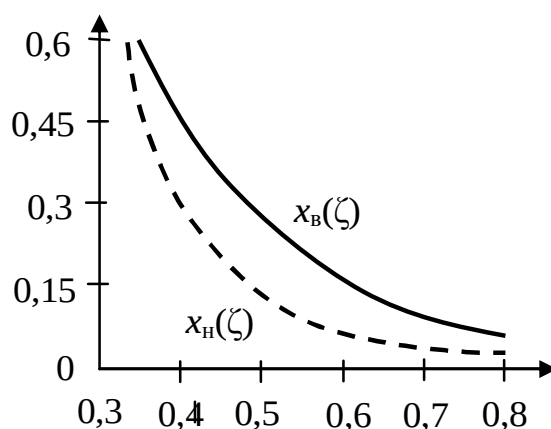


Рис. 8. Верхняя и нижняя границы «коэффициента ослабления»

кающих к точкам пересечения осей координат с контуром отверстия, и вычисления скорости диссипации энергии для оценки критических напряжений.

4.2. Модель деформационного упрочнения материала при профилировании с высвобождением угловой зоны

Метод интенсивного деформирования с высвобождением угловых зон в калибре, позволяет в 1,5...2 раза сократить число переходов в сравнении с традиционным профилированием [15]. Однако, увеличение углов подгибки или малые радиусы угловой зоны приводят к ужесточению напряженно-деформированного состояния, и при достижении критических значений – разрушением зоны сгиба. Избежать неблагоприятного сочетания действия внешних и внутренних сил позволяет высвобождение угловой зоны. Добиться высвобождения угловой зоны можно торцевой осадкой заготовки, для чего ее ширина должна иметь некоторый запас. Излишек ширины может привести к контакту наружного контура угловой зоны заготовки с нижним роликом, приближая схему интенсивного деформирования к схеме стесненного изгиба [4]. При стесненном изгибе разрушение материала происходит на внутреннем контуре зоныгиба, и предельные возможности характеризуются двумя параметрами: внутренним радиусом и утолщением зоны сгиба.

Другим фактором, влияющим на формирование угловой зоны профиля, является эффект деформационного упрочнения материала. Особую важность он приобретает при решении таких практических вопросов как прогнозировании ресурса пластичности для последующих технологических операций и вычислении величины пружинения заготовки.

Рассмотрим угловую зону профиля (рис. 9), радиус кривизны внутреннего контура которой равен r , наружный радиус – R , а их разность равняется толщине исходной заготовки.

На основе рассмотрения аналитических моделей, попытаемся сопоставить величину дрейфа нейтрального слоя напряжений (НСН) с изменением значений напряжений в зависимости от радиусагиба для моделей, относящихся к заготовкам из упрочняющегося и неупрочняющегося материала.

Для решения указанной задачи примем исходные допущения:

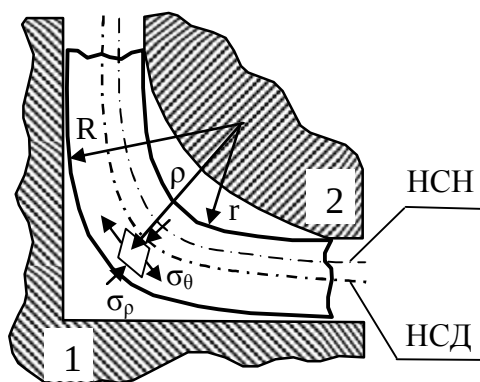


Рис. 9. Силовые факторы и тангенциальные напряжения угловой зоны: 1 – ролик нижний; 2 – ролик верхний

1. Материал считаем упрочняемым по линейному или степенному закону;
2. Материал считается несжимаемым;
3. Аксиальная вытяжка материала заготовки отсутствует (принимается схема плоской деформации);
4. Компоненты тензора напряжений в угловой зоне зависят только от одной из координат;
5. Принимается упрощенное условие пластичности;
6. Справедлива гипотеза «единой кривой»;

7. Зона сжатия и зона растяжения равны по площадям и разделяются НСД.

Общие дифференциальные уравнения равновесия $s_{ij,j} = 0$ (s_{ij} – компоненты напряжений; “ j ” означает дифференцирование по j -ой координате) для угловой зоны в силу допущений 4 и 5 вырождаются в одно уравнение:

$$r \cdot \frac{\partial s_r}{\partial r} + s_r - s_q = 0, \quad (17)$$

где s_r , s_q – радиальное и окружное напряжение соответственно; r – переменная интегрирования.

Условие пластичности материала упрочняемого по линейному закону принимается в виде:

$$s_r - s_q = \pm(s_T + l \cdot e_i), \quad (18)$$

где s_T – предел текучести материала заготовки; l – показатель упрочнения; e_i – интенсивность деформаций сдвига.

Знаки «+» и «-» в уравнении (18) относятся к зонам сжатия и растяжения соответственно.

Условие несжимаемости в соответствии с допущением 2 имеет следующий вид:

$$e_r + e_q + e_z = 0, \quad (19)$$

где e_r , e_q , e_z – радиальная, окружная и аксиальная компонента тензора деформаций соответственно.

Основываясь на допущении 3, принимаем аксиальную деформацию $e_z = 0$, тогда из уравнения (19) следует:

$$e_r = -e_q. \quad (20)$$

Интенсивность деформации сдвига, учитывая условие (20), принимает вид:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} e_r. \quad (21)$$

Учитывая определение окружной деформации и зависимость (20), интенсивность деформации сдвига представляется соотношением:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[1 - \frac{r}{r_e} \right], \quad (22)$$

где r_e – радиус кривизны нейтрального слоя деформаций (НСД). Значение r_e определяется на основе допущения 7 из геометрических соотношений угловой зоны:

$$r_e = \sqrt{\frac{r^2 + R^2}{2}}, \quad (23)$$

где r , R – радиусы кривизны внутреннего и наружного контура зоны сгиба соответственно.

Для зоны растяжения уравнение (17) имеет вид:

$$r \frac{\partial s_r}{\partial r} = s_T + l e_i,$$

а с учетом (18) и (22) его можно записать следующим образом:

$$r \frac{\partial s_r}{\partial r} = \left[s_T + \frac{2l}{\sqrt{3}} \right] - \frac{2l}{r_e \cdot \sqrt{3}} \cdot r. \quad (23)$$

Введем обозначения:

$$A = s_T + \frac{2 \cdot l}{\sqrt{3}}, \quad B = \frac{2 \cdot l}{r_e \cdot \sqrt{3}}. \quad (24)$$

Интегрируя дифференциальное уравнение (23), с учетом обозначений (24), получим:

$$s_p = A \cdot \ln r - B \cdot r + C, \quad (25)$$

где C – постоянная интегрирования.

Так как контакт инструмента с наружным контуром заготовки отсутствует, то получаем следующее граничное условие:

$$s_r^p(R) = 0.$$

Тогда постоянная интегрирования приобретает следующее значение:

$$C = B \cdot R - A \cdot \ln R. \quad (26)$$

Подставив величину C из формулы (25) в зависимость (26) вычислим распределение радиальных напряжений в зоне растяжения:

$$s_r^p = A \ln r - Br + BR - A \ln R,$$

или окончательно:

$$s_r^p = A \ln \left(\frac{r}{R} \right) + B(R - r). \quad (27)$$

Окружные напряжения определяются из условия (18):

$$s_q^p = A \left(\ln \left(\frac{r}{R} \right) + 1 \right) + B(R - 2r). \quad (28)$$

Проводя аналогичные вычисления для зоны сжатия, с учетом граничного условия $s_r^c(r) = 0$ получим значения напряжений для сжатой зоны:

$$s_r^c = A \ln \left(\frac{r}{r} \right) + B(r - r), \quad (29)$$

$$s_q^c = A \left(\ln \left(\frac{r}{r} \right) - 1 \right) + B(2r - r). \quad (30)$$

Заметим, что в случае отсутствия упрочнения, уравнения (27) – (30) сводятся к известным решениям аналогичной задачи для случая идеальной пластичности, поскольку из формул (24) следует: $A = s_T$, $B = 0$. Расположение НДС между зонами сжатия и растяжения не означает равенства радиальных напряжений (27) и (29) на этой границе. Границу «сшивания» радиальных напряжений можно найти, приравнявая напряжения (27) и (29):

$$A \cdot \ln \left[\frac{r_s^2}{r \cdot R} \right] = B(2r_s - r - R), \quad (31)$$

где r_s – радиус кривизны нейтрального слоя напряжений (НСН).

Уравнение (31) – трансцендентное и может быть решено только численными методами. В предельном случае идеальной пластичности оно приводит к хорошо известному результату: $r_s = \sqrt{r \cdot R}$.

Используя формулу (31) можно получить значения радиусов кривизны НСН для выбранных материалов и конфигураций зон сгиба, однако важнее определить величину смещения НСН и изменение значений напряжений в зависимости от радиусагиба и свойств материала.

На рис. 10 представлена зависимость смещения НСН от срединной поверхности в процентах Δ от относительного радиусагиба, построенная на основе формулы (31). Алгоритм вычислений предусматривает задание начальных условий, образование функции невязки на базе соотношения (31), вычисление корней функции невязки и относительной величины смещения НСН.

На графике, перекрывающем диапазон значений относительного радиусагиба от 1 до 9 видно, что для неупрочняющегося материала (кривая 1) смещение НСН не превышает 6%, а при относительном радиусе более 3 смещение не превышает 1%. При наличии упрочнения ($\lambda = 400$ МПа) смещение в среднем в два раза больше.

Расчеты для малых относительных радиусовгиба показывают, (рис. 11) что смещение нейтрального слоя напряжений существенно больше: для неупрочняющегося материала и имеет тенденцию к увеличению от 5 до 45% при изменении относительного радиусагиба от 1,0 до 0,1, а для упрочняющегося материала – от 10 до 55% при том же изменении относительного радиусагиба.

С целью введения обобщенной характеристики напряженного состояния вычисляли предварительно аксиальное напряжение S_z по формуле:

$$S_z = \frac{S_r + S_q}{2}, \quad (32)$$

а затем – интенсивность напряжений S_i :

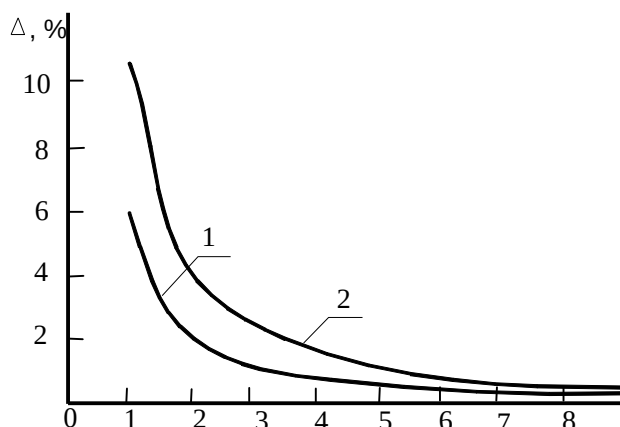


Рис. 10. Зависимость смещения НСН от радиусагиба: 1, 2 – $\lambda = 0$; 400 МПа соответственно

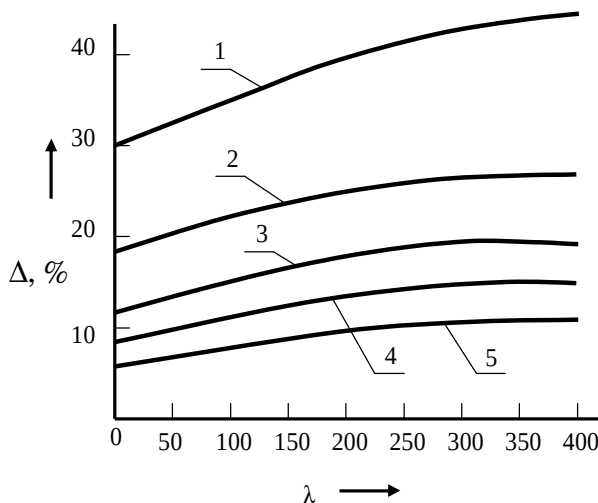


Рис. 11. Зависимость смещения нейтрального слоя от степени упрочнения материала: 1, 2, 3, 4, 5 – $r = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$

$$s_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(s_r - s_q)^2 + (s_r - s_z)^2 + (s_q - s_z)^2}. \quad (33)$$

Для наглядного представления распределения напряжений s_i , s_r , s_q проведен численный расчет и построение соответствующих зависимостей.

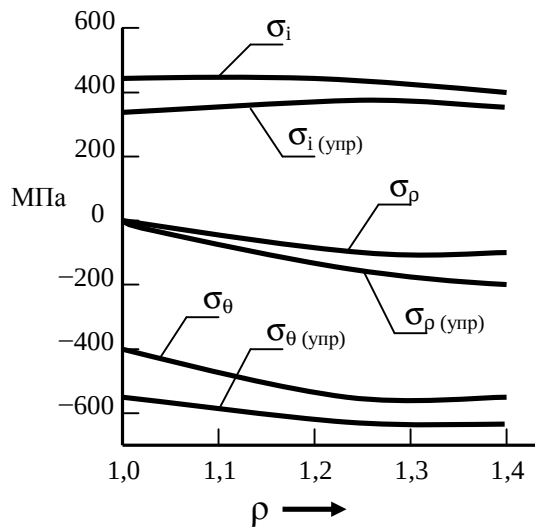


Рис. 12. Распределение напряжений в зависимости от степени упрочнения материала в зоне сжатия заготовки единичной относительной толщины: σ_i , σ_r , σ_θ — интенсивность, радиальные и окружные напряжения соответственно; (упр) — упрочняющийся материал

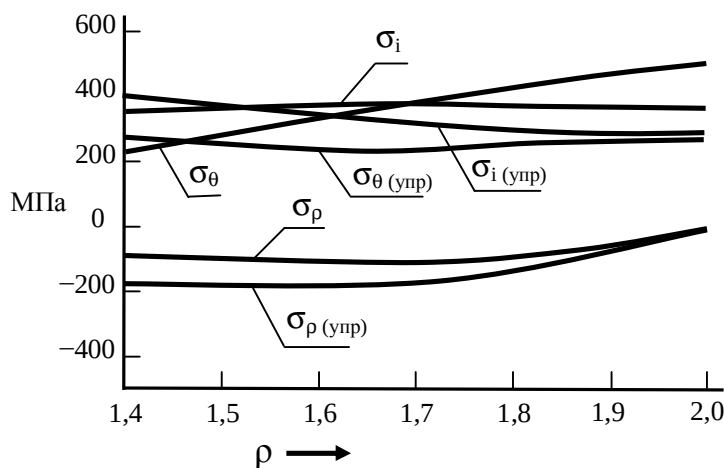


Рис. 13. Распределение напряжений в зависимости от степени упрочнения материала в зоне растяжения заготовки единичной относительной толщины: σ_i , σ_r , σ_θ — интенсивность, радиальные и окружные напряжения соответственно; (упр) — упрочняющийся материал

го материала растут, в то время как для упрочняющегося материала наблюдается спад окружных напряжений (см. кривые s_q и $s_{q(упр)}$). Следует отметить скачок окружных напряжений на уровне нейтрального слоя напряжений, как это предсказывает теория пластического изгиба. При этом интен-

Результаты расчета, показанные в форме номограмм рис. 12, для случая гибки на единичный относительный радиус, показывают, что в зоне сжатия радиальные напряжения на внутреннем контуре равны нулю, что отвечает условию высвобождения калибра по внутреннему контуру заготовки.

При движении к нейтральному слою напряжений радиальные напряжения возрастают по абсолютной величине, причем, для упрочняющегося материала их значение примерно на 20% выше, чем для неупрочняющегося (см. кривые σ_r и $\sigma_{r(упр)}$ на рис. 12). При этом рост окружных напряжений (по абсолютной величине) следует изменению радиальных напряжений для неупрочняющегося материала с небольшим замедлением для упрочняющегося материала (см. кривые s_q и $s_{q(упр)}$). Интенсивность напряжений для неупрочняющегося материала практически остается на уровне, близком к значению предела текучести, а для упрочняющегося материала — имеет тенденцию к снижению.

В зоне растяжения радиальные напряжения (рис. 13) принимают нулевые значения (кривые σ_r и $\sigma_{r(упр)}$), а окружные напряжения для неупрочняющегося

сивность напряжений для упрочняющегося материала имеет тенденцию к спаду до 230 МПа на наружном контуре зоны сгиба (см. кривую $s_{i(упр)}$). Данное рассмотрение относилось к случаю пластического изгиба на относительный радиус, равный единице. При больших значениях относительного радиуса гiba закономерности изменения напряжений сохраняются с тем отличием, что влияние упрочнения уменьшается.

Полученные результаты показывают, что при упрочнении происходит некоторая разгрузка материала вблизи наружного контура зоны сгиба и нагружение вблизи внутреннего контура. Это означает, что при использовании упрочняющегося материала следует по возможности ослаблять контакт внутреннего контура зоны сгиба с роликом за счет подсадки подгибаемой полки. С другой стороны, если считать справедливой гипотезу «единой кривой», то можно прогнозировать уровень деформаций на наружном контуре и на этой основе формулировать ограничительные условия для предельного радиуса гiba заготовки.

Для материала, подчиняющегося степенному закону упрочнения, условие пластичности записывается следующим образом:

$$s_i = l \cdot e_i^n,$$

где l и n - константы прочности и упрочнения (определяются по диаграммам растяжения).

Тогда уравнение (17) для зоны растяжения будет иметь вид:

$$r \frac{\partial s_r}{\partial r} = s_T + l e_i^n. \quad (34)$$

Подставив интенсивность деформации сдвига (22) и $D = l \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^n$ в уравнение (34) получим:

$$r \frac{\partial s_r}{\partial r} = s_T + D \left(1 - \frac{r}{r_e} \right)^n. \quad (35)$$

Однако, данное уравнение в квадратурах может быть решено не для всех n , и для его решения требуется применение численных методов.

Модели на основе степенного закона упрочнения материала находят широкое применение в программных конечно-элементных расчетных комплексах. В качестве примера можно привести модель материала № 18 POWER LAW PLASTICITY, входящую в библиотеку LS-DYNA, которая, согласно принятой в этой программной среде терминологии, имеет вид [16]:

$$s_y = k e^n,$$

где s_y – напряжение предела текучести; k – константа прочности для данного материала; n – показатель деформационного упрочнения.

Так как используемые стали при деформации заметно упрочняются, то полученные зависимости можно использовать в аналитической форме для установления предельных параметров, пружинения и жесткости угловых зон при формообразовании методом интенсивного деформирования.

4.3. Модель формовки угловых зон с высвобождением в калибре

При производстве мелкосортных профилей высотой до 50 мм и толщиной стенки 0,8...2,5 мм в некоторых случаях заказчики технологии предъявляют особые требования к конфигурации угловых зон (например, радиусгиба – не более допустимого, отсутствие утонения металла по биссектрисе угла). Профили с такими угловыми зонами (в основном Z – типа), изготовленные по схемам стесненного изгиба [17], применяются, например, в качестве стрингеров летательных аппаратов ИЛ-114, ИЛ-103, ТУ-334, БЕ-200, АН-70, АН-140 [18].

По действующей технологии набор материала в угловой зоне осуществляется за счет торцевого поджатия или осадки криволинейного участка заготовки избыточной ширины в закрытом роликовом калибре, радиусы угловых зон которого соответствуют требованиям чертежа к радиусам кривизны зон сгиба. Соответствующее технологическое оснащение не допускает вариаций характеристик угловой зоны, в то время как высвобождение угловой зоны, преимущественно со стороны внутреннего контура, могло бы расширить возможности технологии в части изменения размерных параметров угловых зон и, в особенности, применяемых материалов. Например, комплект технологического оснащения для производства профиля из алюминиевого сплава оказывается непригодным для изготовления профиля таких же габаритных размеров и толщины стенки из титанового сплава.

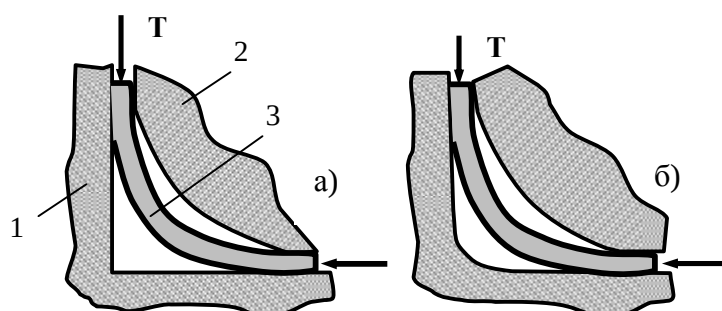


Рис. 14. Формовки угловой зоны: 1 – охватывающий ролик; 2 – охватываемый ролик; 3 – заготовка; а – с двусторонним высвобождением; б – с высвобождением по внутреннему контуру и посадкой наружного контура;

Ниже рассмотрены схемы подсадки и особенности формообразования в условиях торцевого сжатия заготовки с высвобождением угловых зон в роликах (рис. 14).

Высвобождение может быть односторонним или двусторонним, причем одностороннее высвобождение имеет место лишь при определенном условии – когда сила торцевого

сжатия T будет достаточной для посадки наружного контура заготовки на инструмент.

Однако выявление условия посадки наружного контура заготовки и сопутствующих распределений напряжений и деформаций в угловой зоне далеко от тривиального. Это связано со сложной зависимостью вида и параметров напряженно-деформированного состояния в заготовке от величины торцевого сжатия и ряда других условий [1, 19]. Например, при посадке наружного контура неопределенными остаются граничные условия на нем.

При умозрительном анализе процесса деформирования можно предположить двоякое поведение заготовки на участках, примыкающих к зоне наиболее интенсивного деформирования: 1) тонкие заготовки будут терять устойчивость в форме локального выпучивания с тенденцией к складкообразованию; 2) более толстые заготовки будут односторонне выпучиваться с набором толщины на прямолинейных участках, примыкающих к зоне сгиба, что аналогично осадке призматического тела с ограничением по одной из боковых граней.

Известно, что заготовка может терять устойчивость при осадке, если наименьший линейный размер сечения отличается от ее высоты более, чем в три раза [12]. С другой стороны, в принятой схеме формовки профиля целесообразное значение относительного радиуса кривизны заготовки в переходе, где производят осадку, должно быть не более пяти ее толщин [1]. Поэтому рассмотрим подсадку заготовки единичной толщины с изменением ее относительного радиусагиба (радиуса кривизны внутреннего контура) в осевой плоскости формирующих валков с пяти до значения, определяемого величиной подсадки (вертикального перемещения недеформированной части заготовки) (рис. 14,а) или условиями ограничения наружного контура зоны сгиба инструментом (рис. 14,б).

Для изучения объектов с определенными выше схемами использовали пакет Ansys 7.1 (модуль LS-dyna), основанный на конечно-элементном анализе процессов формообразования и приобретенный по лицензии Ульяновским государственным техническим университетом. В качестве препроцессора использовали программу Solid Works, а постпроцессорную обработку результатов производили встроенными средствами программы.

Изменение конфигурации и положения моделируемого участка профиля (см. рис. 14,б), разбитого на конечные элементы, представлено на рис. 15.

Анализ перемещений узлов сетки конечных элементов показывает, что перед посадкой наружного контура перемещения материальных точек в угловой зоне вблизи биссектрисы угла наиболее интенсивны и имеют линейные траектории, а на примыкающих участках они претерпевают изгиб. Это хорошо согласуется с результатами более ранних исследований [4], где установлено, что при торцевом сжатии характер распределения касательных напряжений имеет вид двугорбой кривой с провалом на биссектрисе угла. Наличие деформаций сдвига существенно отдаляет данную схему деформирования от схемы чистого изгиба, где справедлива гипотеза плоских сечений.

Анализ напряжений вдоль биссектрисы угла с точкой отсчета, лежащей на внутреннем контуре, показывает, что напряжения в окружном направлении на внутреннем и наружном контурах существенно отличаются по абсолютной величине (рис. 16). В классическом решении задачи чистого изгиба они должны были бы совпадать. Из рис. 16 следует также, что нейтральный слой напряжений (см. точку схождения графиков на рис. 16) мигрирует в сторону наружного контура в отличие от чистого изгиба, где нейтральный слой напряжений (НСН) смещается к внутреннему контуру на величину:

$$DS = \frac{r + R}{2} - \sqrt{r \cdot R}, \quad (36)$$

где r , R – радиус кривизны соответственно внутреннего и наружного контуров зоны сгиба.

В данном случае (43-й шаг нагружения) величина смещения НСН составляет $0,1S_0$ (S_0 – толщина исходной заготовки). Значения напряжений в окружном направлении и положение НСН свидетельствуют о разгрузке наружного контура зоны сгиба, что позволяет производить гибку заготовки на меньшие радиусы, чем те, что традиционно приводятся в многочисленных справочниках по холодной штамповке. По рис. 16 можно также установить вид напряженного состояния по значению фактора Лоде [16]:

$$n_s = \frac{2 \cdot \sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (37)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные напряжения.

Подставляя соответствующие значения напряжений с рис. 17 в формулу, аналогичную формуле (37) для деформаций, получаем, что практически во всех точках биссектрисы угла выполняется условие $v_\epsilon \approx 0$, то есть имеет место плоская деформация.

Деформационные характеристики угловой зоны соответствуют реальному процессу и результатам работы [4], где задача о пластическом изгибе с торцевым сжатием решена методом прямого интегрирования в ортогональной системе координат, связанной со срединной поверхностью заготовки. Уровень окружных деформаций на наружном контуре не превышает 10 %, а на внутреннем контуре составляет 25 % (рис. 17). Следовательно, наружный контур разгружается за счет действия торцевых сил, внутренний нагружается дополнительно (при чистом изгибе окружная деформация наружного контура составляет около 20 % при той же геометрии угловой зоны). Анализ двух остальных деформаций (радиальной и продольной) показывает, что условие плоской деформации выполняется (продольная деформация в любой точке заготовки на биссектрисе угла не превышает 0,4 %). Условие несжимаемости [12] также выполняется, то есть имеет место:

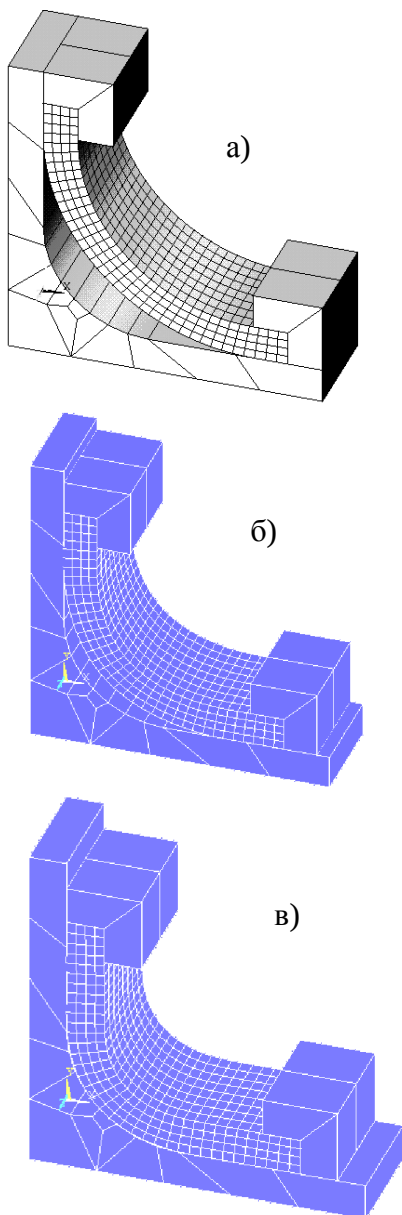


Рис. 15. Этапы деформирования заготовки: а – исходное положение; б – положение перед контактом; в – посадка наружного контура заготовки

$$\sum_{k=1}^3 \epsilon_k = 0, \quad (38)$$

где ϵ_k – главная деформация под номером k .

Аналогичные закономерности деформирования наблюдаются и на других этапах нагружения до момента контакта заготовки с дугообразным участком инструмента. При последующем нагружении, после посадки наружного контура его окружные деформации находятся в стадии стагнации. Дальнейшее деформирование сопровождается набором толщины в зоне, примыкающей к биссектрисе угла, и на свободных полках. В реальном процессе деформирования набора толщины на полках не наблюдается по двум причинам:

1) в большинстве случаев внутренний радиус зоны сгиба задается инструментом по его номинальному значению с чертежа, так что зоны высвобождения отсутствуют и движение материала при существенном избытке ширины заготовки происходит в осевом направлении (условие плоской деформации не выполняется); 2) при наличии зон высвобождения ширину заготовки выбирают такой, чтобы утолщения полки или потери устойчивости не происходило.

Уменьшение продольной деформации возможно за счет переднего поджатия, что существенно усложняет технологию и на практике применяется редко, хотя и позволяет получить существенное утолщение в угловой зоне (до 20 – 30 %). Обычно заказчик заявляет желаемое утолщение в зоне сгиба до 5 – 10 %, что достижимо за счет выбора ширины заготовки по обеим схемам рис. 14, как это показали исследования процессов в среде Ansys 7.1 по схемам полного высвобождения наружного контура (см. рис. 14,а), а также со скруглением инструмента под наружный контур на радиусы двойной и тройной толщины заготовки.

Применение средств Ansys 7.1 позволяет проводить анализ процессов формообразования без излишних затрат на проведение теоретических исследований и экспериментальных работ с существенной экономией людских,

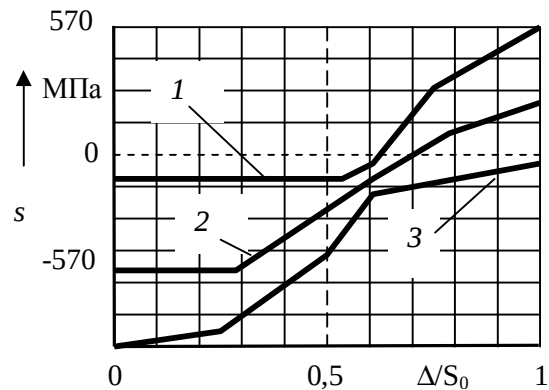


Рис. 16. Распределение главных напряжений по биссектрисе угла: 1 – радиальное; 2 – продольное; 3 – окружное

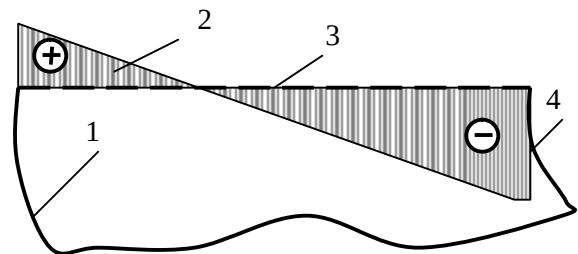


Рис. 17. Окружные деформации вдоль биссектрисы угла сгиба: 1, 4 – контуры зоны изгиба; 2 – эпюра деформаций; 3 – биссектриса угла

материальных и энергетических ресурсов и обеспечением достаточной надежности конечных результатов.

Таким образом, высвобождение угловых зон за счет конструкции формирующего инструмента позволяет расширить возможности технологии профилирования в части изменения конфигураций угловых зон изготавливаемого профиля. Торцевое сжатие дает возможность разгрузить наружный контур зоны сгиба по деформациям в 2,0 – 2,5 раза, что обеспечивает получение радиусовгиба меньше допустимых при наличии утолщения, повышающего несущую способность профиля. Использование конечно-элементного анализа для исследования процессов формообразования позволяет совершенствовать технологию профилирования в роликах с экономией ресурсов и обеспечением высокой точности расчетов.

4.4. Моделирование угловой зоны при подсадке полки

При изготовлении гнутых профилей с подсадкой полки возникает проблема установления допустимого диапазона геометрических параметров угловой зоны профиля в связи появлением при значительной подсадке дефектов типа зажимов на внутреннем контуре. Причиной возникновения таких дефектов являются касательные напряжения, влияющие на ресурс пластичности в областях деформированной зоны.

Рассмотрим данную задачу с учетом следующих допущений:

1. Деформация считается плоской.
2. Материал считается изотропным, жестко-пластичным, неупрочняемым.
3. Касательные напряжения представляются мультипликативной функцией по двум координатам.

Решение задачи проведем в цилиндрической системе координат, считая напряжения зависимыми от радиуса r , исходящего из центра кривизны контура внутренней поверхности зоны сгиба при трансверсальном сечении профиля, и угла поворота q радиуса вектора относительно биссектрисы угла (рис. 19). Третья ось, обозначаемая буквой Z , совпадает с линиейгиба и расположена перпендикулярно плоскости сечения. Координата r - безразмерная (отнесенная к толщине исходной заготовки), а текущий угол q измеряется в радианах. В этих условиях, с учетом первого допущения можно ввести обозначения напряжений [12]:

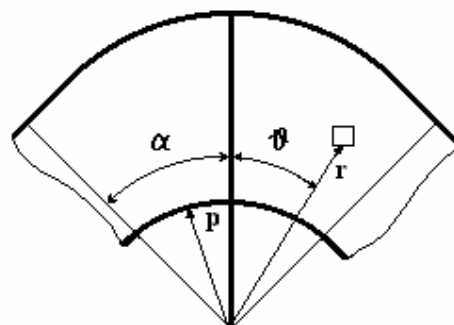


Рис. 19. Зона сгиба профиля (с геометрическими безразмерными параметрами)

$$s_{rr} = s_{rr}(r, q); \quad s_{qq} = s_{qq}(r, q); \quad s_{rq} = s_{rq}(r, q);$$

$$s_{zr} = s_{zq} = 0; \quad s_{zz} = s_{zz}(r, q).$$

(39)

Здесь обозначение напряжений традиционно: первый индекс обозначает положение элементарной площадки в пространстве (перпендикулярно соответствующей оси), а второй совпадает с направлением действующей силы.

Условие плоской деформации (деформация $\epsilon_{zz} = 0$) дает:

$$s_{zz} = (s_{rr} + s_{qq})/2. \quad (40)$$

Уравнения равновесия в цилиндрической системе координат с учетом формул (1) можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial s_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial s_{rq}}{\partial q} + \frac{s_{rr} - s_{qq}}{r} = 0; \\ \frac{\partial s_{rq}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial s_{zz}}{\partial q} + \frac{s_{rq}}{r} = 0. \end{cases} \quad (41)$$

Условие пластичности при плоской деформации имеет вид:

$$(s_{rr} - s_{qq})^2 + 4s_{rq}^2 = \frac{4q_s^2}{3} = 4k^2, \quad (42)$$

где q_s – предел текучести материала; k – максимальное касательное напряжение.

Совместное решение системы (41) и уравнения (42) с учетом соотношения (40) приводит к следующему дифференциальному уравнению в частных производных второго порядка относительно касательных напряжений σ_{rq} , которое может быть решено лишь при некоторых дополнительных условиях:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial^2 s_{rq}}{\partial q^2} + \left[\pm \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial q} \sqrt{k^2 - s_{rq}^2} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial s_{rq}}{\partial r} \right) + \\ & + \left[\pm \frac{\partial^2}{\partial r \partial q} \sqrt{k^2 - s_{rq}^2} \right] - \frac{\partial s_{rq}}{\partial r} = 0. \end{aligned} \quad (43)$$

Решение уравнения (43), в соответствии с третьим допущением:

$$s_{rq}(r, q) = k y(r) j(q), \quad (44)$$

где $y(r)$ и $j(q)$ – пока не определенные функции.

Переходя к безразмерным напряжениям путем деления σ_{rq} на k , после подстановки решения (44) в уравнение (43), при условии $\frac{\partial^2 j(q)}{\partial q^2} = \frac{p^2}{a^2}$ (условие разрешимости уравнения (43)) и осреднении члена, содержащего функции от q , с учетом начальных условий для $j(q)$ получим:

$$j(q) = \sin(\pi\theta/\alpha), \quad r^2 \frac{\partial^2 y}{\partial r^2} + 2r \frac{\partial y}{\partial r} - \gamma y = 0. \quad (45)$$

Здесь $\gamma = (\pi/\alpha)^2$.

Второе дифференциальное уравнение в зависимостях (45) имеет следующее общее решение [20]:

$$y(r) = C_1 r^a + C_2 r^b, \quad (46)$$

где $\alpha = (\mu-1)/2$; $\beta = -(\mu+1)/2$; $\mu = (1 + 4\gamma)^{1/2}$.

Удовлетворяя граничным условиям на наружном контуре, из решения (46) получим функцию $\psi(r)$:

$$y(r) = \left(\frac{p}{r}\right)^{(m+1)/2} \cdot \left[\frac{R^m - r^m}{R^m - p^m}\right] \cdot (n/p)^{1/2}, \quad (47)$$

где n – величина относительного утолщения зоны сгиба по биссектрисе угла; p – относительный внутренний радиус зоны сгиба.

Следует отметить, что граничные условия определяются исходя из физических соображений – касательные напряжения на наружном контуре должны отсутствовать, ибо вблизи наружного контура выполняются условия, приближенные к условиям обычной гибки. Радиус кривизны наружного контура зоны сгиба R можно задать приближенно:

$$R = p + 1 + n. \quad (48)$$

В окончательном виде зависимость для определения касательных напряжений на основании выражений (44), (45) и (47) может быть представлена в виде:

$$s_{rq}(r, q) = k \sin(\pi\theta/\alpha) \cdot \left(\frac{p}{r}\right)^{(m+1)/2} \cdot \left[\frac{R^m - r^m}{R^m - p^m}\right] \cdot (n/p)^{1/2}, \quad (49)$$

Анализ зависимости (49) показывает, что на биссектрисе угла и на линии сопряжения упругой и пластической зон касательные напряжения равны нулю (угол θ равен нулю и α соответственно). На наружном контуре ($R = r$)

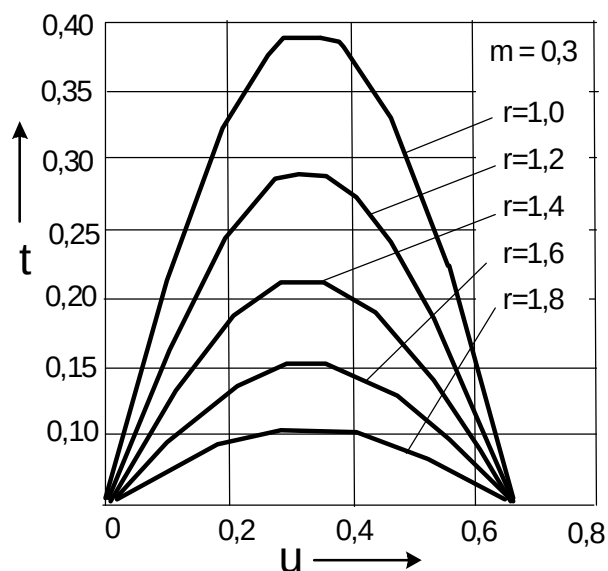


Рис. 20. Распределение напряжений в угловой зоне

касательные напряжения также обращаются в нуль, что соответствует реальному напряженному состоянию в угловой области. Вблизи внутреннего контура касательные напряжения принимают максимальные значения. Для наглядности приведем диаграмму распределения касательных напряжений в угловой зоне с учетом относительного торцевого сжатия, выполненную в среде MathCAD-2000. На рис. 20 значение относительного торцевого сжатия $m = \sigma_a/\sigma_s$ принято равным 0,3. Здесь σ_a и σ_s – напряжение торцевого поджатия и предел теку-

чести материала соответственно. Вместо $\sigma_{r\theta}$ введена безразмерная функция $t(u, r) = \sigma_{r\theta} / k$, где $u = \theta$.

При больших значениях подсадки (напряжение поджатия приближается к пределу текучести материала), согласно предлагаемой модели, относительные касательные напряжения могут превосходить единицу. Это означает практическое исчерпание ресурса пластичности, а при разрушении значение напряжений должно падать до нуля. Однако эта модель не предполагает нарушения сплошности материала, хотя и указывает на некоторую сингулярность решения задачи в области внутреннего контура при значительных напряжениях торцевого поджатия. Так, при $m = 0,7$ уже имеют место дефекты внутреннего контура при утолщении зоны сгиба до 18 %.

Отметим, что в области, близкой к биссектрисе угла и внутреннему контуру, зависимость (49) хорошо согласуется с моделью работы [21], где касательные напряжения даны формулой: $t = (n \cdot r \cdot \sin \theta) / (1 - \cos \alpha)$. Однако модель работы [21] не приводит к асимптотической корректности при $\theta \rightarrow \alpha$.

Математическая модель позволяет установить диапазон допустимых значений геометрических параметров с целью обеспечения возможности проработки на технологичность перспективных профилей, а также с целью назначения геометрических параметров калибров формирующих роликов.

4.5. Модель зоны плавного перехода при интенсивном формообразовании профиля из упрочняющегося материала

Одним из существенных ограничений технологии интенсивного формообразования является переформовка заготовки из-за больших углов подгибки элементов, при которых длина зоны плавного перехода (ЗПП) простирается за пределы предшествующего перехода. Прогноз эффекта переформовки заготовки для упрочняющегося материала позволит назначать такие предельные углы подгибки, которые не приведут к потере устойчивости. Существующие модели Гуна-Полухина [22], Бхаттачария-Коллинза [23] не учитывают прогиб донной части профиля, появляющийся при формовке широких профилей, а также изменение жесткости подгибаемой полки в случае формовки многоэлементных профилей.

Рассмотрим подгибаемую полку приведенных размеров, смежную с дном профиля (рис. 21) на одном из технологических переходов, опустив индексацию переходов. Будем считать, что в данном переходе (скажем, k -ом) угол подгибки равен θ_k , а в межклетьевом пространстве текущий угол подгибки является функцией $\theta(x_2)$. К $(k-1)$ -ому переходу суммарный угол подгибки будет составлять α_{k-1} , а к k -му переходу – $\alpha_k = \alpha_{k-1} + \theta_k$.

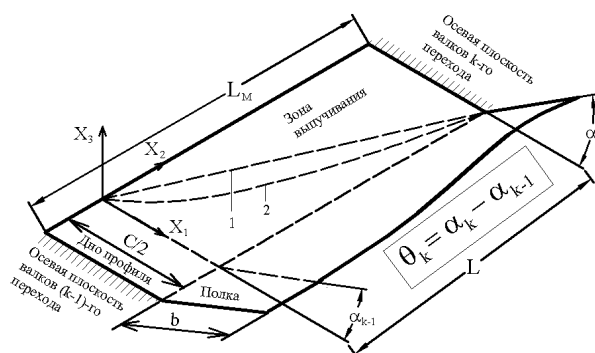


Рис. 21. Геометрия ЗПП и расположение локальной системы координат: 1 – аппроксимация реальной границы пластической области; 2 – реальная граница пластической области

При подгибке полки примем следующие допущения:

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

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

$$x_1 - \frac{C}{2} = v \cdot \cos q(u), \quad x_2 = u, \quad x_3 = v \cdot \sin q(u), \quad (50)$$

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

Вычислим предварительно деформации полки при подгибке, для чего найдем коэффициенты первой квадратичной формы ее срединной поверхности, задаваемой уравнениями (50):

$$E = \frac{\partial x_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial u} = 1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial q}{\partial u} \right)^2, \quad F = \frac{\partial x_i}{\partial u} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial v} = 0, \quad G = \frac{\partial x_i}{\partial v} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial v} = 1, \quad (51)$$

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

Длина дуги dS в криволинейной системе координат дается выражением:

$$dS = \sqrt{E \cdot (du)^2 + 2F \cdot du \cdot dv + G \cdot (dv)^2}. \quad (52)$$

Продольная логарифмическая деформация e_u для точек, равноудаленных от зоны сгиба, с учетом формул (51 – 52) определяется соотношением ($dv = 0$):

$$e_u = \ln \left(\frac{dS|_{dv=0}}{du} \right) = \ln(\sqrt{E}) = \frac{1}{2} \cdot \ln E. \quad (53)$$

Логарифмическая деформация e_v в направлении координаты v с учетом соотношений (51 – 52) вычисляется по формуле:

$$e_v = \ln \left(\frac{dS|_{du=0}}{dv} \right) = \ln(\sqrt{G}) = 0. \quad (54)$$

Учитывая допущение о несжимаемости материала, на основании формул (53) и (54) получаем формулу для определения деформации по толщине полки:

$$e_n = -e_u - e_v = -e_u. \quad (55)$$

Интенсивность деформаций e_i с учетом формулы (55) можно найти согласно работе [12]:

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \left(1 + v^2 \cdot \left(\frac{\partial q(u)}{\partial u} \right)^2 \right). \quad (56)$$

Удельную работу деформации полки $A_n^{y\partial}$ с учетом степенного упрочнения [21] можно получить интегрированием приращения удельной работы:

$$A_n^{y\partial} = \int s_i \cdot de_i = \frac{1}{m+1} \cdot A \cdot e_i^{m+1} \approx \frac{A}{m+1} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot v^2 \cdot \left(\frac{\partial q(u)}{\partial u} \right)^2 \right]^{m+1}, \quad (57)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; A , m – параметры упрочнения; e_i – интенсивность деформаций, определяемая формулой (56).

Сформулируем допущения для угловой зоны:

- 1) принимается схема плоской деформации ($e_u = 0$);
- 2) радиус кривизны срединной поверхности остается постоянным практически на всех этапах деформирования;
- 3) работа деформирования сжатой зоны равна работе деформирования растянутой зоны;
- 4) элементарные площадки при изгибе сохраняют свои площади: $a \cdot r \cdot dr = a \cdot r_c \cdot dr_c$, где dr , dr_c – приращения радиусов кривизны вблизи произвольной точки и вблизи срединного слоя соответственно.

Координаты произвольной точки угловой зоны в межклетьевом пространстве задаются следующими соотношениями (рис. 22):

$$\begin{aligned} x_1 - \frac{C}{2} &= r \cdot \sin \left(\frac{q(u)}{2} + g \right) - r_c \cdot \sin \left(\frac{q(u)}{2} \right), \quad x_2 = u, \\ x_3 &= r_c - r \cdot \cos \left(\frac{q(u)}{2} \right), \end{aligned} \quad (58)$$

где r – текущий радиус; r_c – радиус срединной поверхности угловой зоны; g – текущий угол, отсчитываемый от биссектрисы угла.

Для определения деформаций найдем предварительно коэффициенты первой квадратичной формы с учетом соотношений (58):

$$\begin{aligned} E &= \frac{\partial x_i}{\partial r} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial r} = 1, \quad F = \frac{\partial x_i}{\partial r} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial g} = r \cdot \sin(q + 2g), \\ G &= \frac{\partial x_i}{\partial g} \cdot \frac{\partial x_i}{\partial g} = r^2. \end{aligned} \quad (59)$$

Длина дуги для этого случая определяется формулой:

$$dS = \sqrt{E \cdot (dr)^2 + 2 \cdot F \cdot dr \cdot dg + G (dg)^2}. \quad (60)$$

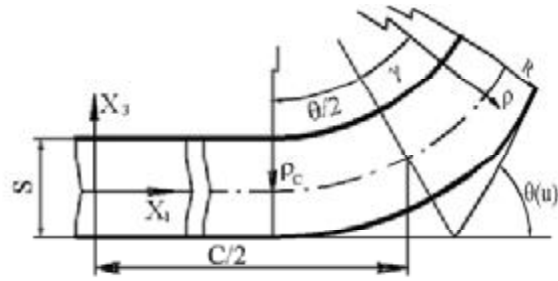


Рис. 22. Параметры угловой зоны

Окружные логарифмические деформации с использованием зависимостей (59) и (60) вычисляются так:

$$e_g = \ln \left(\frac{dS|_{dr=0}}{dg \cdot r_c} \right) = \ln \left(\frac{r}{r_c} \right), \quad (61)$$

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

$$e_r = \ln \left(\frac{dS|_{dg=0}}{dr_c} \right) = \ln \left(\frac{\sqrt{(dr)^2 \cdot r_c}}{r \cdot dr} \right) = \ln \left(\frac{r_c}{r} \right). \quad (62)$$

Из формул (61 – 62) следует, что

$$e_r = -e_g. \quad (63)$$

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

$$A_{yz}^{y\partial} = \frac{A}{m+1} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \left(\frac{r}{r_c} \right) \right)^{m+1}. \quad (64)$$

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

$$A_o^{y\partial} = \frac{A}{m+1} \cdot e_{np}^{m+1}, \quad (65)$$

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

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

Полная работа формообразования полки определяется на основе формулы (56), полученной с учетом разложения в ряд Тейлора логарифмической функции (57) с удержанием члена первого порядка малости.

$$A_n^{полн} = \int_0^L \int_0^b \int_0^S A_n^{y\partial} dS \cdot dv \cdot du = W \int_0^L \left(\frac{\partial q(u)}{\partial u} \right)^{2m+2} du, \quad (66)$$

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

В формуле (66) величина W дается следующей формулой:

$$W = \frac{A \cdot S \cdot b^{2m+3}}{(m+1)(2m+3)} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1}. \quad (67)$$

Полная работа пластического деформирования угловой зоны вычисляется с использованием формулы (66):

$$A_{yz}^{полн} = 2 \int_0^b \int_{r_c}^R A_{yz}^{y\partial} \cdot r \cdot dr \cdot du = \frac{2A}{m+1} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1} \cdot \int_{r_c}^R \left[\ln \left(\frac{r}{r_c} \right) \right]^{m+1} \cdot r \cdot dr \cdot \int_0^L q(u) du, \quad (68)$$

где R – радиус кривизны наружного контура зоны сгиба.

В формуле (68) подынтегральное выражение, содержащее логарифм, может быть разложено в ряд Тейлора с удержанием первого члена ряда:

$$\ln \sum_{i=1}^n \left[\frac{\left(\frac{r}{r_c}\right)^i}{i \cdot \left(\frac{r}{r_c}\right)^i} \right] \approx \frac{r - r_c}{r}. \quad (69)$$

Анализ соотношения (69) при $r = R$ показывает, что второй и несколько последующих членов не превышают в сумме 10% от величины первого члена. Учитывая также, что m существенно меньше единицы, интеграл, содержащий логарифмическую функцию, после проведения интегрирования принимает следующее значение ($R \gg r_c + S/2$):

$$\int_{r_c}^R \left[\ln \left(\frac{r}{r_c} \right) \right]^{m+1} \cdot r \cdot dr \approx \frac{1}{m+1} \cdot \left(\frac{S}{2} \right)^{2+m}. \quad (70)$$

Принимая во внимание формулу (70), полная работа пластического деформирования угловой зоны обретает вид:

$$A_{y2}^{полн} = Y \cdot \int_0^L q(u) \cdot du, \quad (71)$$

где

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

Полная работа пластического деформирования донной части профиля с учетом формулы (67) и допущения об аппроксимации границы пластической области принимает следующий вид:

$$A_o^{полн} = \int_0^L Z \cdot q(u) \cdot du, \quad (72)$$

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

Полная функция работ для правой половины профиля определяется на основе формул (66), (71) и (72):

$$A^{полн} = \int_0^L \left[W \cdot \left(\frac{\partial q(u)}{\partial u} \right)^{2m+2} + (Y + Z) \cdot q(u) \right] \cdot du. \quad (73)$$

Теперь надлежит решить вариационную задачу с подвижной границей:

$$dA^{полн} = d \int_0^L \xi(q, q, u) \cdot du, \quad (74)$$

где ξ равно подынтегральной функции в формуле (73).

Решение задачи (74) сводится к интегрированию уравнения Эйлера [24]:

$$\frac{\partial x}{\partial q} - \frac{d}{du} \left[\frac{\partial x}{\partial \dot{q}} \right] = 0, \quad (75)$$

которое принимает следующий вид:

$$\frac{d \left(\dot{q} \right)^{2m+1}}{du} = z, \quad (76)$$

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

Решение дифференциального уравнения (76) в окончательном виде представляется функцией:

$$q(u) = D \cdot (z \cdot u + C_1)^B + C_2, \quad (77)$$

где C_1, C_2 – константы, подлежащие определению.

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

Граничные условия для определения констант в решении (77) формулируются таким образом:

$$q(u)|_{u=0} = 0; \quad \frac{dq}{du} \Big|_{u=0} = 0. \quad (78)$$

После удовлетворения указанным граничным условиям решение (77) приобретает вид:

$$q(u) = D(z \cdot u)^B. \quad (79)$$

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

$$L = \left(\frac{q_k}{D} \right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{1}{z}. \quad (80)$$

Рассмотрим предельные случаи для модели (80). Если положить $C = 0$ ($Z = 0$), то получаем модель Гунна-Полухина для формовки уголка из упрочняющейся полосы [25]. Полагая $m = 0$ (неупрочняющийся материал заготовки), легко показать, что предлагаемая модель в точности совпадает с моделью Бхаттачария-Коллинза [23] и с моделью ЗПП при стесненном изгибе для случая формовки изотропной полосы с постоянным радиусомгиба и одинаковым средним диаметром формующих роликов смежных переходов.

Полагая $m = 0$ (неупрочняющийся материал заготовки), легко показать, что предлагаемая модель совпадает с моделью Бхаттачария-Коллинза:

$$L_k = \sqrt{\frac{8\Theta_k b^3}{3s}},$$

где b – ширина полки, Θ_k – угол подгибки в k -ом переходе, s – толщина заготовки.

Заниженное межклетьеовое расстояние L_M профилировочного станка может ограничивать технологические возможности последнего. Как указывалось выше, при разработке технологии надлежит следить за тем, чтобы применяемые углы подгибки не выводили длину ЗПП за пределы межклетьеового расстояния, то есть должно выполняться условие: $L \leq L_M$. Тогда предельный угол подгибки полки $q_k^{пред}$ за один технологический переход можно найти из трансцендентного уравнения:

$$\left(\frac{q_k}{D} \right)^{\frac{1}{B}} \cdot \frac{1}{z} - L_M = 0. \quad (81)$$

Таким образом, при разработке технологии должно учитываться условие:

$$q_k \leq q_k^{пред}, \quad (82)$$

где q_k – угол подгибки, назначаемый в k – ом переходе.

Однако условие (82) должно строго соблюдаться только при формовке уголков и профилей с узкой донной частью.

Таким образом, математическая модель зоны плавного перехода (ЗПП), учитывающая упрочнение металла и прогиб донной части профиля при формообразовании, позволяет устранить переформовку заготовки, а также сократить число переходов. Модель ЗПП может быть использована и при разработке технологии изготовления профилей типовой номенклатуры и многоэлементных профилей с использованием метода локальных жесткостей.

4.6. Моделирование реализации аксиального сжатия

Существующие технологии производства гнутых профилей с различной толщиной стенок по сечению сводятся в основном к прокатке фасонных профилей и к прессованию или экструзии [1]. Ни одна из этих технологий не позволяет производить профили из плакированных материалов с существенно утолщенной зоной сгиба по сравнению с толщиной исходного трехслойного листа. Метод стесненного изгиба [4] позволяет получать небольшие утолщения угловой зоны за счет избытка материала заготовки при ее осадке в роликовых калибрах, что сопровождается истечением материала в продольном направлении (до 7 – 10 %) и отсутствием заполнения угловых зон, не ограниченных инструментом. Создание аксиального сжатия в процессе формообразования профиля дает возможность перехода от плоского деформированного к объемному деформированному состоянию участка заготовки в очаге деформации и позволяет производить заполнение угловых зон более равномерно с получением сечения профиля, приближающегося к сечению прессованного или же фасонного профиля, чем обеспечивается его достаточно высокая жесткость.

Схема с аксиальным сжатием может быть реализована за счет различных окружных скоростей роликов в соседних переходах, в частности, на

предпоследнем и последнем переходах, в которых конфигурации угловых зон практически совпадают с зонами, заданными чертежом профиля (рис. 23). Величина аксиального сжатия определяется не только разностью линейных скоростей рабочих поверхностей инструмента в соседних переходах, но и величиной обжима заготовки в роликах.

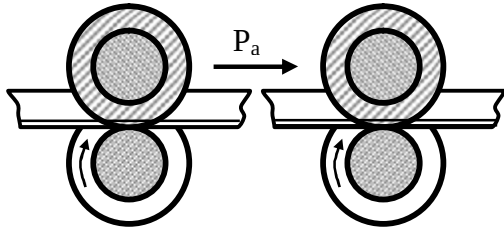


Рис. 23. Схема создания аксиального подпора в роликах профилировочного станка

Основными задачами при разработке технологии профилирования полосы являются: обеспечение стабильности величины аксиального сжатия, что гарантирует тождественность условий формообразования профиля по его длине; определение условий реализации аксиального сжатия за счет обжима и изменения ширины заготовки; выявление предельных возможностей процесса.

Стабильность процесса формообразования профиля можно обеспечить путем согласования требуемой величины аксиального сжатия с величиной зазора в паре роликов предпоследнего перехода с тем, чтобы при достижении заданной величины аксиального сжатия происходило проскальзывание роликов по поверхности заготовки, а не потеря устойчивости последней.

Линеаризованное дифференциальное уравнение равновесия для элемента профиля, подвергнутого обжиму, имеет вид [12]:

$$\frac{dP(1 - \frac{S_0 - S_k}{4R})}{s_s + P(\frac{S_0 - S_k}{4R}) + Pf \sqrt{\frac{2R}{S_0 - S_k}}} = \frac{dx}{\sqrt{\frac{2S_0^2 R}{S_0 - S_k}}}, \quad (83)$$

где P — нормальное давление со стороны роликов; S_0 — толщина исходной заготовки; S_k — величина зазора в роликах; σ_s — предел текучести материала; f — коэффициент трения скольжения; R — приведенный радиус ролика; x — текущая координата.

Интегрирование уравнения (83) дает общее решение:

$$\left[s_s + Pf \sqrt{\frac{2R}{S_0 - S_k}} \right]^{f \cdot \sqrt{\frac{2R}{S_0 - S_k}}} = C \left(x + \sqrt{\frac{2RS_0^2}{S_0 - S_k}} \right), \quad (84)$$

где C — постоянная интегрирования.

Удовлетворяя граничным условиям на входе и выходе калибра, получаем значения нормальных давлений во входной и выходной зонах соответственно: $P_1(x)$ и $P_2(x)$. Суммарная сила P_n , действующая на заготовку со стороны ролика, определяется соотношением:

$$P_n = B \int_0^{X_H} P_2(x) dx + B \int_{X_H}^{X_B} P_1(x) dx, \quad (85)$$

где B – ширина заготовки; X_B – протяженность зоны контакта заготовки и роликов, равная $R \cdot \sqrt{2} / l$; $l = \sqrt{2 \cdot R(S_0 - S_k)}$; X_H – координата нейтрального сечения, которая определяется из условия согласования значений $P_1(x)$ и $P_2(x)$ для входной и выходной зон.

Аксиальная сила P_a' , создаваемая за счет обжима заготовки, определяется формулой:

$$P_a' = 2 f P_N. \quad (86)$$

Вводя усредненное значение продольного (аксиального) напряжения σ_a' , можно прийти к интегральному условию проскальзывания профиля, позволяющему определить величину аксиального сжатия на основе зависимости:

$$\frac{s_s R \sqrt{2}}{l} + \frac{s_a' S_0 l}{f l + 1} \left[\left(\frac{R \sqrt{2}}{l^2 S_0} - 1 \right)^{f l + 1} - 1 \right] = \frac{s_a' S_0 l}{2}. \quad (87)$$

Расчетные зависимости (83) – (87) описывают режим создания аксиального сжатия, а зависимость (87) устанавливает связь между величиной аксиального сжатия и зазором в роликовом калибре ($S_0 - S_k$).

Заметим, что при $S_0 > S_k$ связь величины зазора в роликах с величиной аксиального сжатия не зависит от ширины заготовки и конфигурации сечения перехода. Однако эти два фактора играют существенную роль в двух случаях: во-первых, когда зазор в роликах предварительного перехода превосходит толщину заготовки, и во-вторых, когда рассматривается разложение сил в сечении с координатой, близкой к X_B . В том и другом случае надлежит рассмотреть задачу о радиальных нагрузках, действующих на заготовку со стороны роликов (рис. 24).

Представив заготовку в виде сопряженных оболочек и следуя работе [26], из уравнений, описывающих поведение осесимметричных оболочек, получим выражение для нормального давления на заготовку со стороны роликов (рис. 24) в следующем виде:

$$\tilde{P}_i = - \left\{ \frac{1}{g_i} - \left[\frac{1+g_i}{g_i} \right] \left(\frac{r_i}{r_i + S_0} \right)^{g_i} \right\} \frac{S_0 \cos b_i}{r_i} \frac{2}{\sqrt{3}} s_s, \quad (88)$$

где $\tilde{P}_i$ – нормальное давление на i -ом участке заготовки (i принимает значения 1 и 2); β_i – угол наклона элементарного участка обжатой зоны по отношению к продольной оси; ρ_i – радиус кривизны заготовки в трансверсальном сечении на i -ом участке заготовки.

$$\text{В зависимости (88) } g_i = \frac{f}{\tan b_i} = f \sqrt{\frac{2 r_i}{S_0}}.$$

Произведя интегрирование соотношений (6) по соответствующим дугам, представленным на рис. 24, и вводя осредненное значение аксиального напряжения σ_a'' , получим условие проскальзывания в случае, когда $S_0 < S_k$:

$$r_1^{3/2} \ln \frac{r_1 + S_0}{r_1} + 2 r_2^{3/2} \ln \frac{r_2 + S_0}{r_2} - (1 + g_i) S_0^2 \left(\frac{1}{\sqrt{r_1}} + \frac{2}{\sqrt{r_2}} \right) = \frac{B}{fp} \sqrt{\frac{3 S_0}{8} \frac{s_a''}{s_s}} \quad (89)$$

Таким образом, из уравнения (89) видно, что условия проскальзывания зависят как от схемы формообразования, так и от ширины исходной заготовки. Заметим, что в данном случае величина зазора между роликами несущественна, поскольку усилие обжима определяется кривизной поверхности заготовки.

Итак, уравнения (87) и (89) полностью определяют условия проскальзывания. При зазоре в роликах, превосходящем толщину заготовки, следует использовать зависимость (89), а при зазоре, меньшем толщины заготовки, надлежит применять зависимость (87). Кроме того, зависимость (89) дает нижнюю границу аксиального напряжения σ_a' , определяемого выражением (87), из которого, в частности, следует, что для зазора, равного толщине заготовки ($S_0 = S_k$), проскальзывание наступает при $s_a' = 0$, хотя в действительности проскальзывание имеет место лишь при достижении значения аксиального напряжения s_a'' , определяемого из соотношения (89).

С целью экспериментального подтверждения разработанных моделей исследовали условия проскальзывания профильных заготовок из материалов 1163 и 1420 (под зетобразный (25x25x1,8 мм) и швеллерный (14x23x1,2 мм) профили соответственно) длиной 700 мм, сформованные до конфигурации предпоследнего перехода. Один из концов изучаемого образца плющили и помещали в зажим, соединенный тросом с динамометром растяжения, закрепленным на неподвижной опоре. При подаче образца в ролики профилировочного станка ГПС-200М1 регистрировали показание динамометра в стационарном режиме скольжения. На каждый профиль брали по 18 заготовок (по две заготовки на один опыт) с номинальным избытком заготовки $0,4 S_{0n}$. Здесь n – число зон сгиба.

Сравнение данных нижеприведенной табл. 2 при обжиге заготовки 0,05 и 0,10 мм с результатами, полученными на основании зависимости (87), показывает, что их различие в целом не превышает 14 %. Однако действующие в отсутствие поперечного обжима заготовки (при нулевом зазоре) силы отличаются от теоретических данных более, чем на 30 % в сторону уменьшения. Это объясняется тем, что в этом эксперименте использованы заготовки номинальной ширины, а не максимально допустимой, принятой для условий закритического нагружения условных цилиндрических панелей со-

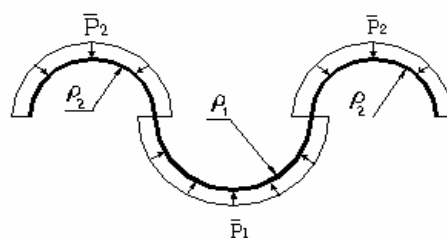


Рис. 24. Обжим заготовки на предварительном переходе

гласно рис. 24. Следует отметить, что механические свойства материала практически не влияют на условия проскальзывания (по параметру σ_s / σ_a

Таблица 2
Данные по проскальзыванию профилей
в роликах предварительного перехода

Профиль	Материал	($S_0 = S_k$), мм	P_a , Н	σ_s / σ_a
	1163	0	330	52
		0,05	960	18,1
		0,10	1340	13,0
	1420	0	370	47,1
		0,05	980	17,7
		0,10	1410	12,3
	1163	0	580	51,6
		0,05	2100	19,2
		0,10	3210	12,6
	1420	0	890	45,4
		0,05	2360	17,1
		0,10	3150	12,8
	1163	0	440	51,5
		0,05	1100	20,3
		0,10	1560	14,3
	1420	0	510	43,8
		0,05	1220	18,4
		0,10	1640	13,7

разования с созданием сил сжатия порядка 7,0 – 7,5 кН при номинальной ширине заготовки происходило разрушение профиля в очаге деформации. В проводимых экспериментах относительные радиусы наружного контура инструмента в угловой зоне для швеллерного и зетобразного профиля составляли 1,6 и 2,5 соответственно.

Сравнение рис. 26 и 27 показывает, что рост утолщения ($\eta_f = S_f/S_0$, где S_f –

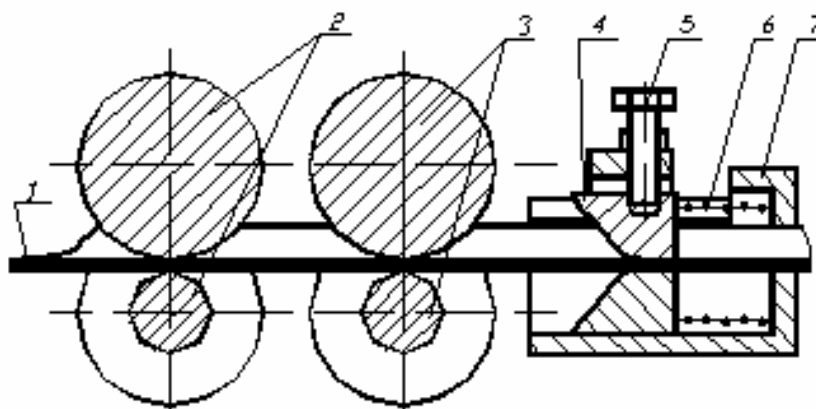


Рис. 25. Схема реализации переднего подпора: 1 – заготовка; 2,3 – формирующие ролики двух последних переходов; 4 – фильера; 5 – нажимной винт; 6 – тарированная пружина; 7 – корпус устройства

расхождение для материалов, отличающихся по σ_s более, чем на 20 %, составляет всего 6 – 8 %).

Для создания переднего подпора использовали схему, изображенную на рис. 25. В качестве элемента, создающего аксиальное сжатие, применяли специальное правильное устройство станка ГПС–200М1 с удлиненной фильерой (200 мм) и дополнительным устройством замыкания, позволяющим осуществлять регулировку величины действующей силы при номинальном избытке ширины заготовки ($\Delta B = k \cdot n$).

Постановочные эксперименты проводили при отключенных роликах предварительных переходов (раздвигали валы). Выявлено, что при увеличенном зазоре в роликах последнего перехода швеллерный профиль из материала 1420 останавливался при значении аксиальной силы от 2,6 до 4,3 кН. При включенных клетях предварительного формооб-

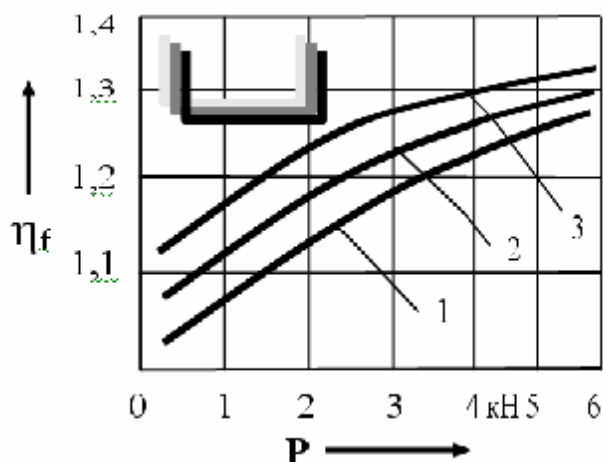


Рис. 26. Зависимость утолщения от переднего подпора: 1, 2, 3 – относительный избыток ширины заготовки: 0,4; 1,2; 2,0 соответственно

толщина угловой зоны по биссектрисе угла) с увеличением силы переднего подпора на рис. 26 несколько больше, чем на рис. 27, что объясняется различием кривизны наружных контуров зон сгиба и увеличением сопротивления пластической деформации при меньшей кривизне наружного контура. С ростом утолщения внутренний относительный радиус также несколько увеличивается: значение его может быть вычислено по формуле [4]:

$$\bar{r} = \bar{R} - 1 - h_f \cos \alpha / 1 - \cos \alpha$$

где α – уголгиба, а радиусы внутренней и наружной поверхности зоны сгиба (r и R соответственно) даны в соотношении с толщиной заготовки.

Отсюда, а также из рис. 26 и 27 следует, что приложение аксиальной силы существенно интенсифицирует процесс формообразования профиля: если в отсутствие аксиального поджатия достижимые утолщения угловой зоны не превышают 5 – 10 %, то в данном случае они достигают 33 %.

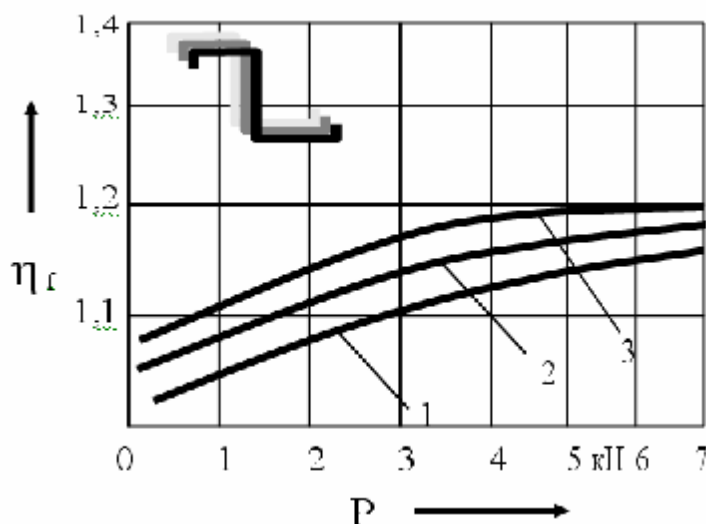


Рис. 27. Зависимость утолщения от переднего подпора: 1, 2, 3 – относительный избыток ширины заготовки: 0,8; 2,0; 3,2 соответственно

При наличии аксиального поджатия также обеспечивается прямолинейность профиля и снижается уровень остаточных напряжений на 40 – 80 %.

Однако приложение силы переднего подпора имеет и ряд недостатков: а) неравномерность утолщений по углам у концевых частей профиля, изготавливаемого из листа; б) в некоторых случаях разрушение профиля при плохом попадании в фильеру; в) большие усилия выдергивания профиля из фильеры; г)

при больших величинах усилий подпора у профилей из плакированных материалов на поверхности остается блестящий след; д) нагрев и преждевременный износ фильер. Поэтому применение данного варианта технологии наиболее целесообразно в случае особых требований к утолщению в зоне сгиба и применения рулонного материала без покрытия.

Таким образом, обеспечение осевого сжатия и его стабилизация реализуются путем надлежащего выбора избытка ширины заготовки и зазора в роликовых калибрах на основе разработанных моделей. Приложение аксиальной силы интенсифицирует процесс профилирования, в котором возможно получение утолщений угловой зоны до 33 % в отличие от обычных процессов стесненного изгиба, где достижимые утолщения при номинальном избытке заготовки не превышают 10 %. При этом снижается уровень остаточных напряжений. Применение переднего подпора целесообразно при изготовлении профилей из рулонного материала без покрытия и в случаях предъявления специальных требований к конфигурации зон сгиба профиля.

4.7. Моделирование формовки гофра в донной части профиля

Формовка гофра в донной части широких профилей (рис. 28) во многом аналогична формовке гофрированных панелей в роликах с тем отличием, что предварительную форму получают на предварительных переходах, а окончательную формовку производят методом стесненного изгиба, т.е. непосредственной осадкой волнообразной заготовки в окончательную конфигурацию гофра. Особенность состоит в том, что одновременное формообразование заготовки по переходам вызывает утонение заготовки на каждом из переходов вследствие перетяжки, что является ограничением данного процесса.

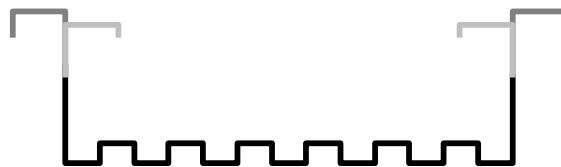


Рис. 28. Сечение профиля с широким гофрированным дном

Пусть конфигурация требуемого гофра будет представлена сечением, изображенным на рис. 29. Исходя из условия плоского деформированного состояния и несжимаемости материала заготовки, можно найти ширину заготовки, приведенную к одному гофру:

$$\begin{aligned}
 B_3 = & l_1 + l_2 + \frac{2(H - S_0)}{\cos \alpha} + \\
 & + (r_1 + r_2 + S_0) \left[\frac{p}{2} - a - 4 \operatorname{tg} \left(\frac{p}{2} - \frac{a}{2} \right) \right] - \\
 & - 2S_0 \operatorname{tg} \left(\frac{p}{4} - \frac{a}{2} \right) + \Delta_0
 \end{aligned} \tag{90}$$

где l_1, l_2 – ширина верхней и нижней стенок соответственно; H – высота гофра; S_0 – толщина стенок гофра; α – угол между боковой стенкой и вертикалью; r_1, r_2 – внутренние радиусы сопряжения верхней и боковой стенки, нижней и боковой стенки соответственно; $D_{\text{лб}}$ – дополнительная величина к ширине к теоретической заготовки, учитывающая заполнение уголков зон и аксиальную вытяжку.

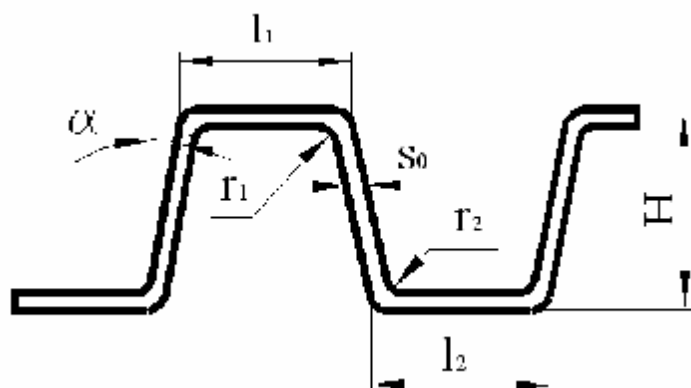


Рис. 29. Конфигурация окончательного гофра

предварительных переходах, то ограничимся лишь указанием диапазона ее значений. При стесненном изгибе величина Δ_ϕ находится в следующем диапазоне значений:

$$\Delta_\phi = (0, 1 \dots 0,8) S_0 n, \quad (91)$$

где n – число зон сгиба гофра.

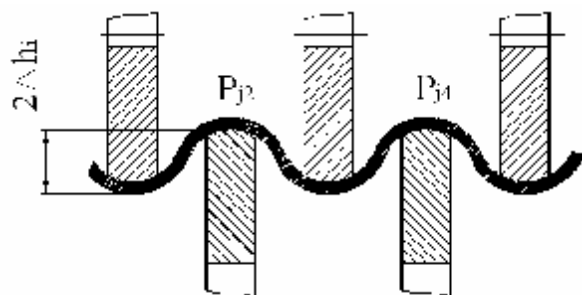


Рис. 30. Вдавливание роликов на предварительном переходе

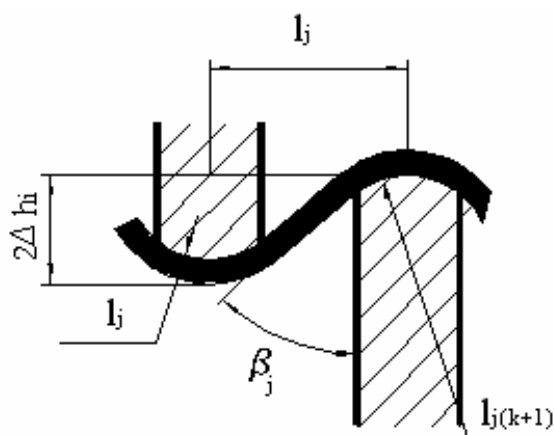


Рис. 31. Схема предварительного вдавливания роликов

ность приращений внутреннего и наружного радиусов, а следовательно, утонение заготовки по сечению.

Обозначим силу, действующую на j -й ролик на i -ом переходе через P_{ji} , а геометрические характеристики – согласно рис. 31. В качестве образующей

Величина $D_{\text{лв}}$ в формуле (90) может определяться аналитически или экспериментально и зависит от требований к утолщению в угловой части, от используемого материала и схемы предварительного формообразования. Так как величина Δ_ϕ не оказывает влияния на течение процесса формообразования на предвари-

Задавая число гофров N и принимая во внимание формулу (90) с выбранным значением Δ_ϕ из диапазона значений, даваемых выражением (91), получим требуемую величину ширины заготовки $N \cdot B_3$.

На предварительных переходах происходит вдавливание роликов в заготовку на глубину Δh_j на j -ом переходе (рис. 30). Для выявления закономерностей, связанных с распределением утонения по поперечному сечению гофрированного профиля, во-первых, установим систему уравнений для сил, действующих на элементы гофрированного профиля. Во-вторых, определим геометрические соотношения и площадь контакта ролика и заготовки на каждом из переходов; в-третьих, определим действующие напряжения и компоненты скорости деформирования, а затем найдем раз-

рабочей части инструмента следует взять дугу окружности радиусом r_{ik} для k -го ролика j -го перехода. При этом имеет место соотношение:

$$\mathbf{r}_{jk} = \mathbf{r}_{j(k+2)}. \quad (92)$$

Из геометрических соотношений определим угол b_i между прямолинейным участком заготовки горизонталью на i -ом переходе:

$$b_j = \arcsin \frac{r_{jik} + r_{ij(k+1)}}{\sqrt{l_j^2 + (r_{j(K+1)} - Dhj)^2}} - \arccos \frac{l_j}{\sqrt{l_j^2 + (r_{j(k+2)} - Dhj)^2}}, \quad (93)$$

Условия (92) и (93) относятся к периодическому гофру. В общем случае угол b_i находят из трансцендентного уравнения:

$$2(r_{j-1} \cdot b_{j-1} - r_j \cdot b_j) = \frac{l_{j-1}}{\cos b_{i-1}} - \frac{l_j}{\cos b_i} + 2\left(\frac{r_j \cdot \text{tgb}_j}{\cos b_i} - \frac{r_{j-1} \cdot \text{tgb}_{j-1}}{\cos b_{i-1}}\right).$$

Найдем силу переформовки при вдавливании ролика на глубину Δh_j через работу пластического формоизменения на единицу длину заготовки:

$$W = \frac{1}{4} \cdot s_T S_0^2 b_{ji} ,$$

где s_s – предел текучести материала.

Тогда средняя сила формообразования определяется таким образом:

$$P_{j0} = \frac{s_s \cdot s_0^2 \cdot b_j \cdot z_j}{2 \cdot Dh_j}, \quad (94)$$

где z_i – протяженность контактной зоны, определяемой по формуле:

$$z_j \approx 2\sqrt{2R_j Dh_j - Dh_j^2} ; \quad (95)$$

R_i – радиус формирующего ролика j -го перехода;

$$Dh_i = h_i - h_{i-1} = 2r_i(1 - \cos b_i) - 2r_{i-1}(1 - \cos b_{i-1} + \operatorname{tg} b_i(l_i - 2r_i \sin b_i) - \operatorname{tg} b_{i-1}(l_{i-1} - 2r_{i-1} \sin b_{i-1})). \quad (96)$$

По формулам (94) – (96), с учетом сил трения и ступенчатого характера приращения сил от ролика к ролику на данном переходе, проецируя силы на оси координат, получим систему рекуррентных соотношений:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{i1} = P_{i0} + \mathbf{hs}_s S_0^2 \sin b_i, \\ P_{i2} = P_{i1} + \mathbf{hs}_s S_0^2 \sin b_i, \\ \\ P_{ij} = P_{i(j-1)} + j\mathbf{hs}_s S_0^2 \sin b_i, \\ \end{array} \right. \quad (97)$$

где h – коэффициент трения между заготовкой и роликом, j – номер ролика.

Система уравнений (97) совместно с выражением (94) дает замкнутую совокупность уравнений для нахождения сил вдавливания роликов.

Определим теперь площадь вдавливания i -го ролика в заготовку на j -переходе. Величина площади контакта ΔS_{ji} определяется соотношением:

$$DS_{ji} = 2b_j r_{ji} R_j g_{ji}, \quad (98)$$

где $g_{ji} = \arctg(1 - \frac{Dh_j}{R_j})$, а соотношение (98) и среднее контактное давление примут вид:

$$DS_{ji} = 2b_j r_{ji} R_j \arctg(1 - \frac{Dh_j}{R_j}). \quad q_{ji} = P_{ji} / DS_{ji}.$$

Уравнение равновесия для контактной зоны можно записать в виде:

$$\frac{ds_{ji}^r}{dr} + \frac{s_{ji}^r - s_{ji}^q}{r} = 0, \quad (99)$$

где s_{ji}^r, s_{ji}^q – радиальные и тангенциальные напряжения соответственно, r – текущий радиус кривизны.

Условие пластичности представим в упрощенном виде:

$$s_{ji}^r - s_{ji}^q = c s_s, \quad (100)$$

где $c = \text{sign}(r - r_{ji}^n)$; где r_{ji}^n – радиус нейтрального слоя.

Решая уравнения (99) и (100), получим:

$$s_{ji}^r = c s_s \ln r + c, \quad (101)$$

где c – константа, подлежащая определению.

Граничные условия для решения (13) записываются в виде :

$$s_{ji}^r = \begin{cases} -q_{ji} & , r = r_{ji} \\ 0 & , r = \tilde{R}_{ji} \end{cases} \quad (102)$$

где $\tilde{R}_{ji}$ – радиус кривизны наружного контура зоны сгиба.

Учитывая значение функции c , из решения (101) и граничных условий (102), найдем напряжения и радиус нейтрального слоя r_{ji}^n из условия сшивания решений на границе зон растяжения и сжатия:

$$r_{ji}' = [r_{ji} \tilde{R}_{ji} \exp(-q_{ji} / s_s)]^{1/2}. \quad (103)$$

Компоненты скорости, совместимые со значениями девиатора тензора напряжений, определим по формулам [27]:

$$J_{ji}^r = -\frac{1}{2j} \left(r + \frac{r_{ji}^{h^2}}{r} \right), \quad J_{ji}^q = r \frac{q}{j}, \quad (104)$$

где J_{ji}^r, J_{ji}^q - скорости в радиальном и тангенциальном направлениях соответственно; j - величина угла гибки; q - текущий угол.

С учетом соотношений (104) найдем приращения радиусов:

$$\frac{dr_{ji}}{dj} = -\frac{1}{2j} \left[r_{ji} + \tilde{R}_{ji} \exp(-q_{ji} / s_s) \right], \quad \frac{d\tilde{R}_{ji}}{dj} = -\frac{1}{2j} \left[\tilde{R}_{ji} + r_{ji} \exp(-q_{ji} / s_s) \right].$$

Из последних двух выражений с учетом формулы (103) получим величину изменения толщины заготовки:

$$\frac{dS_{ji}}{dj} = -\frac{S_{ji}}{2j} \left[\exp(-q_{ji} / s_s) - 1 \right], \quad (105)$$

откуда следует, что утонение не происходит на периферийной части заготовки ($dj = 0$), а также в отсутствие контактных давлений ($q_{ji} = 0$).

В формуле (105) приращение угла и сам угол можно рассматривать как текущее и конечное значение параметра. Эта формула определяет допустимое число гофров, изготавливаемое по данной схеме, при ограничении:

$$\left\{ \sum_{j=1}^k dS_{ji} / S \right\} \leq d, \quad (106)$$

где d – предельно допустимое утонение, отнесенное к толщине заготовки для данного вида материала; k – число предварительных переходов.

Левая часть неравенства (106) представляет собой суммарное относительное утонение, которое должно быть меньше допустимой величины утонения d . Наибольшее утонение будет в центральной части заготовки, т. е. при $i = N + 1$. Поэтому условие (106) можно представить так:

$$\sum_{j=1}^k dS_{j(N+1)} / S_0 \leq d. \quad (107)$$

Значение N в формуле (107) неизвестно, однако оно может быть определено на ЭВМ при сравнении фактического и допустимого утонения в итерационном цикле. Номер цикла итераций, при котором удовлетворяется условие равенства (в пределах заданной точности) объявляется искомым и отождествляется с допустимым числом гофров.

На рис. 32 приведен график распределения утонения по трансверсальному сечению заготовки перед окончательным переходом для случая конкретной конфигурации и числа гофров, взятых равным шести. Для проверки адекватности разработанной модели реальному процессу применительно к той же конфигурации производилось предварительное формообразование заготовки под прямоугольные гофры высотой 20 мм с шириной стенки 24,4 мм и шагом 50 мм. Материал заготовки: сплав Д16 толщиной 1,2 мм. Предварительная конфигурация получалась последовательным формованием за три перехода.

Расчетные зависимости утонения отличаются от экспериментальных не более, чем на 15...20 % (измерения проводили в вершинных точках волн).

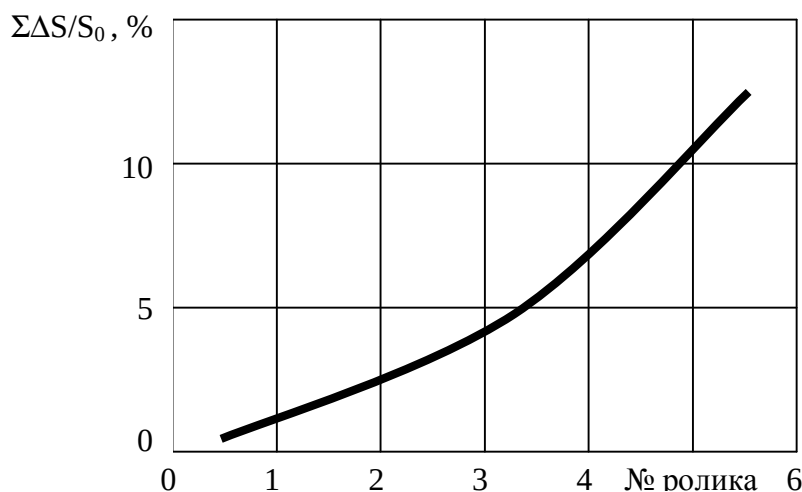


Рис. 32. Зависимость утонения от номера ролика (номера гофра при отсчете от среднего)

Таким образом, построенная модель позволяет определять число гофров, которое можно формовать, а также прогнозировать распределение утонения в процессе формообразования.

Рассмотренный с теоретической точки зрения вопрос имеет важное прикладное значение. На основе приведенной модели формовки гофр нами разработан способ производства профилей (патент № 2220802 от 2004 г.), в котором схема формообразования (рис. 33) предусматривает одновременную формовку гофр (рифтов) на предварительных переходах с их осадкой в предпоследнем переходе и калибровкой профиля в последнем переходе. При этом к полкам прикладывают скользящую силу в межклетьевом пространстве. Способ апробирован и внедрен на ряде предприятий РФ.

График, приведенный на рис. 32, также можно использовать для определения допустимого числа гофров, получаемых в рамках данной схемы при известном ограничении на величину допустимого утонения.

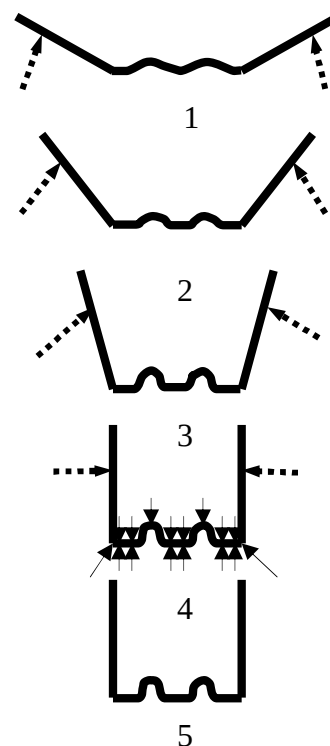


Рис. 33. Схема формообразования профиля с гофрами в донной части

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные модели формообразования гнутых профилей находят применение при разработке технологии изготовления гнутых профилей различных типоразмеров в ОАО «Ульяновский НИАТ» и НПО «ИДМ» (г. Ульяновск). Каждое из этих предприятий осваивает ежегодно до 200 типоразмеров профилей из различных материалов, а также сдает заказчикам от 15 до 20 автоматических линий производства гнутых профилей «под ключ» [5, 7, 28].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филимонов С.В. Интенсивное формообразование гнутых профилей / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 444 с.
2. Илюшкин М. В. Интенсивная технология производства гнутых профилей из материалов с покрытием / Илюшкин М. В., Филимонов В. И. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 200 с.
3. Филимонов С. В. Метод, расчеты и технология интенсивного деформирования в роликах гнутых профилей типовой номенклатуры / С. В. Филимонов, В. И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 246 с.
4. Марковцев В. А. Формообразование стесненным изгибом в роликах и правка гнутых тонкостенных профилей: монография / В. А. Марковцев, В. И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 244 с.
5. Филимонов С.В., Филимонов В.И., Филимонов А.В. Автоматизированные линии производства гнутых профилей / С.В. Филимонов, В.И. Филимонов, А.В. Филимонов // Производство заготовок в машиностроении, 2008, № 4. – С. 39 – 44
6. Патент РФ на полезную модель № 50886, МПК⁷ B21d 5/06 Профилегибочный стан / Литвинов В.А.,Зарубин Д.П.Филимонов С.В.,Лапшин В.И., Филимонов А.В. – Опубл. 27.01.2006. Бюл. № 03.
7. С.В. Филимонов, В.И. Лапшин, А.В. Филимонов, В.И. Филимонов Современные технологии производства гнутых профилей в роликах / С.В. Филимонов, В.И. Лапшин, А.В. Филимонов, В.И. Филимонов // Производство проката, 2008, № 12. – С. 16 – 24.
8. Филимонов А.В. Совершенствование технологии производства полузакрытых профилей в роликах методом интенсивного деформирования: дисс. канд. техн. наук: 05.03.05/ А.В. Филимонов; Ульяновский государственный технический университет. – Нижний Новгород, 2009. – 206 с.
9. Левщанов В. В., Филимонов В. И. Моделирование процесса профилирования в среде ANSYS 8.0 // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сборник научных трудов. Вып. 5. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. – С. 159 – 163.
10. Филимонов, В.И. Особенности изготовления в роликах перфорированных уголкового профилей / В.И. Филимонов, И.Н. Гудков, В.А. Марковцев, С.В. Филимонов // Производство проката. – 2004. – № 12 . – С. 29 – 34.
11. Гудков И. Н., Левщанов В. В., Филимонов В. И. Моделирование интенсивного деформирования перфорированных заготовок при профилировании // Производство проката. 2006. № 4. С. 30–34.
12. Филимонов В. И. Теория обработки металлов давлением. Курс лекций / В. И. Филимонов. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ «Венец», 2004. – 208 с.

13. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 352 с.
14. Ходж Г.Ф. Расчет конструкций с учетом пластических деформаций. – М.: ГНТИМЛ, 1963. – 380 с.
15. Филимонов В.И. Формовка угловых зон с высвобождением при профилировании / В.И. Филимонов, В.В. Левщанов // Вестник УлГТУ, 2005. – № 2. – С. 39 – 42
16. Левщанов В. В., Филимонов В. И. Моделирование процесса профилирования в среде ANSYS 8.0 // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем: Сборник научных трудов. Вып. 5. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2006. – С. 159 – 163.
17. Нуждов А. В. Опыт промышленного изготовления листовых профилей и деталей из них / А.В. Нуждов, Г. В. Проскуряков, В.И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 1990. – № 1. – С. 3 – 4.
18. Колганов, И.М. Изготовление методом интенсивного деформирования профилей из листа и их внедрение в авиастроении / И. М. Колганов, В. А. Марковцев, В. И. Филимонов и др. // Авиационная промышленность. – 2001. – № 4. – С. 21 – 23.
19. Филимонов, В.И. Касательные напряжения при стесненном изгибе / В.И. Филимонов, В.А. Марковцев, С.В. Филимонов // Вестник УлГТУ. – 2000. – № 4. – С. 30 – 35.
20. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
21. Арышенский Ю.М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
22. Гун Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
23. Bhattacharyya D. The prediction of deformation length in cold roll-forming / D. Bhattacharyya, P. D. Smith, L. F. Collins // Journal of Mechanical Working Technology, 1984. – V. 9. – № 2. – P. 181 – 191.
24. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
25. Гун Г. Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
26. Филимонов В.И. Моделирование реализации аксиального сжатия при профилировании полосы / В.И. Филимонов, В.В. Левщанов // Вестник УлГТУ, 2005. – № 3. – С. 34 – 37
27. Соколовский В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
28. Филимонова В.И. Классификация и тенденции развития профилировочного оборудования / В.И. Филимонов // Производство проката, № 4, 2008. – С. 37 – 43.