

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

С. Ф. ГЛУСТЕНКО

ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве электронного учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки бакалавров 150700 Машиностроение

САМАРА
Издательство СГАУ
2014

УДК 621.8(075)
ББК 34.44я7
Т495

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Г.И. Леонович,
д-р техн. наук, проф. Г.В. Смирнов

Тлустенко С.Ф.

Т495 **Теория и технология формообразования профилированных деталей из листового материала** [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / *С.Ф. Тлустенко*. – Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (2,07 Кбайт). – Самара, 2014. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-5-7883-1002-2

Изложены основные понятия теории холодной листовой штамповки по основным видам технологических процессов формообразования профилей. Представлена методика выбора материала заготовок по необходимым физико-механическим свойствам исходных заготовок из различных сплавов и условиям термической обработки для соответствующих процессов обработки металлов давлением. Проведен анализ возможностей получения деталей различными видами холодной листовой штамповки применительно к формообразованию профилей различной конфигурации и назначения. Приведены необходимые теоретические обоснования расчётных схем деформаций, показана методика выбора рекомендаций по устранению возможных дефектов изделий, корректировки технологических процессов и повышения качества изделий.

Учебное пособие рекомендуется студентам высших учебных заведений, а также может быть полезным для инженерно-технических работников и рабочих заготовительно-штамповочных производств предприятий. Подготовлено на кафедре «Обработка металлов давлением».

УДК 621.8(075)
ББК 34.44я7

ISBN 978-5-7883-1002-2

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Введение..... | 4 |
| Глава 1. Проектирование технологических процессов формообразования заготовок при изготовлении сложных профилей холодной листовой штамповкой..... | 5 |
| 1.1. Выбор и анализ материала заготовок..... | 5 |
| 1.2. Выводы по результатам сравнения сталей 08кп, 08пс и 10кп..... | 7 |
| Глава 2. Методы выбора технологии и оборудования для производства деталей профилированного типа..... | 9 |
| 2.1. Анализ и оценка возможностей технологических процессов холодной листовой штамповки для изготовления профилей..... | 9 |
| 2.2. Теория и технология процессов вытяжки. Схема напряженно- деформированного состояния..... | 20 |
| 2.3. Определение напряжений и деформаций при вытяжке..... | 23 |
| 2.4. Процессы формовки листовых заготовок при формообразовании гео- метрии профилей с учётом рассмотренных теоретических положений про- цессов вытяжки..... | 35 |
| 2.5. Исследование особенностей современных технологических процессов профилирования заготовок в виде ленты или полосы..... | 39 |
| 2.6. Выбор оборудования для изготовления профнастила..... | 44 |
| Глава 3. Исследование и оптимизация технологических процессов формоизменения тонкостенных профилей..... | 54 |
| 3.1. Способы профилирования листового материала..... | 54 |
| 3.2. Профилирование с применением метода стеснённого изгиба..... | 57 |
| 3.2.1. Методы калибровки профилей..... | 58 |
| 3.3. Разработка технологии изготовления профнастила..... | 63 |
| 3.3.1. Конструктивно-технологический анализ изделия..... | 63 |
| 3.3.2. Разработка технологии формообразования заготовок..... | 65 |
| 3.3.3. Выбор заготовки и расчет переходов профилирования..... | 65 |
| 3.4. Моделирование и расчет параметров процессов формообразования профнастила на базе программного комплекса DEFORM-2D в условиях автоматизации технологической подготовки производства..... | 69 |
| 3.4.1. Первый переход формообразования профилей..... | 69 |
| 3.4.2. Второй переход формообразования профилей..... | 71 |
| 3.4.3. Третий переход формообразования профилей..... | 73 |
| 3.4.4. Четвертый переход формообразования профилей..... | 74 |
| 3.5. Оценка возможностей программного комплекса DEFORM-2D применительно к целям исследования параметров технологического про- цесса формообразования профилей..... | 76 |
| 3.6. Штамповка вытяжкой-отбортовкой сталей группы 08..... | 77 |
| Библиографический список..... | 78 |

ВВЕДЕНИЕ

В общем комплексе технологии изготовления профилей различной формы сечения и длины из листового материала всевозрастающее значение приобретают процессы формообразования листовых заготовок из конструкционных сталей за ряд последовательных переходов на специализированном оборудовании и оснастке. Это позволяет наиболее эффективно автоматизировать такие процессы на базе прокатных станков с числовым программным управлением. Однако остаются однозначно до конца не решенными вопросы выбора материала заготовок, вида термообработки, распределения степеней деформации по переходам, вида и способа применения смазывающе-охлаждающих жидкостей и др. Также существует ряд альтернативных способов деформации заготовок по переходам, например, в роликах прокатных станков по клетям и при помощи штампов по переходам, когда металл пластически деформируется в холодном состоянии.

Исходным материалом для листовой штамповки профилей служит металлопрокат в виде листов, рулонов, лент, полосы, что обеспечивает возможность механизации и автоматизации штамповки путем создания комплексов оборудования, обеспечивающего выполнение всех операций производственного процесса в автоматическом режиме, с возможностью получения взаимозаменяемых деталей с высокой точностью размеров. Получаемые профили обладают достаточной прочностью и жесткостью, легкие по массе конструкции деталей при небольшом расходе материала и имеют различное и широкое применение.

Глава 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СЛОЖНЫХ ПРОФИЛЕЙ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКОЙ

1.1. Выбор и анализ материала заготовок

Для изготовления деталей из листовых заготовок сложных профилей при формообразовании за ряд последовательных переходов наиболее высокие технологические свойства при высоких эксплуатационных показателях имеют низкоуглеродистые конструкционные стали 08кп, 08пс, 10кп. В табл. 1 представлены данные по указанным конструкционным сталям.

Таблица 1. Свойства и условия применения деталей из условно взаимозаменяемых материалов – сталей 08кп, 08пс, 10кп

| | |
|------|--|
| 08кп | Для прокладок, шайб, вилок, труб, а также деталей, подвергаемых химико-термической обработке – втулок, проушин, тяг |
| 08пс | Для прокладок, шайб, вилок, труб, а также деталей, подвергаемых химико-термической обработке – втулок, проушин, тяг |
| 10кп | Детали, работающие при температуре до 450 ⁰ С, к которым предъявляются требования высокой пластичности, а также втулки, ушки, шайбы, винты и другие детали после ХТО, к которым предъявляются требования высокой поверхностной твердости и износостойкости при невысокой прочности сердцевины |

Таблица 2. Химический состав сталей марок 08кп, 08пс, 10кп

| С | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Cu | As | Сталь |
|-------------|-------------|-------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------------|
| 0,05 – 0,11 | 0,05 – 0,17 | 0,35 – 0,65 | До 0,3 | До 0,04 | До 0,035 | До 0,1 | До 0,3 | До 0,08 | 08кпс 08пс |
| 0,07-0,14 | До 0,07 | 0,25-0,5 | До 0,25 | До 0,04 | До 0,035 | До 0,15 | До 0,25 | До 0,08 | 10кп |

Примечание: Также химический состав указан в ГОСТ 4041 – 71, 9045 – 93.

Таблица 3. Температура критических точек

| | |
|------|---|
| 08кп | $A_{c1} = 732$, $A_{c3}(A_{c_m})=874$, $A_{r3}(A_{r_m})=854$, $A_{r1}=680$ |
| 08пс | $A_{c1} = 732$, $A_{c3}(A_{c_m})=874$, $A_{r3}(A_{r_m})=854$, $A_{r1}=680$ |
| 10кп | $A_{c1} = 732$, $A_{c3}(A_{c_m})=870$, $A_{r3}(A_{r_m})=854$, $A_{r1}=680$ |

Таблица 4. Механические свойства при $T = 20^{\circ}\text{C}$

| | Сортамент | Размеры | Взаимо- заменя- емость | σ_b | σ_T | δ | ψ | КСУ | Тер- мооб- работ- ка |
|-------|---|---------|------------------------------|------------|------------|----------|--------|------------------------|-------------------------------|
| | - | мм | - | МПа | МПа | % | % | кДж/ м ² | - |
| 08 кп | Сталь калиб- рованная | 0,5-5 | - | 314-412 | 270 | 21 | 60 | | Отжиг |
| 08 кп | Прокат калиб- рованный и нагартован- ный | 0,5-4 | - | 370 | 310 | 18 | 40 | | |
| 08 кп | Трубы, тол- щина стенки | 2,5-5 | - | 390 | 350 | 10 | 34 | | |
| 08 кп | Лист, термо- обработка | 4-8 | - | 270-370 | | 22 | 63 | | |
| 08 кп | Полоса | 3-6 | - | 290 | 175 | 25 | 60 | | Нор- мали- зация |
| 08 кп | Трубы калиб- рованные | | - | 294 | 174 | 27 | | | |
| 08 пс | Сталь калиб- рованная | | - | 314-412 | | 21 | 56 | | Отжиг |
| 08 пс | Прокат калиб- рован. нагар- тован. | | - | 370 | | 17 | 48 | | |
| 08 пс | Лист термо- обработ. | 4-8 | - | 270-410 | | 23 | 68 | | |
| 08 пс | Полоса | 3-6 | - | 290 | 175 | 17 | 53 | | Нор- мали- зация |
| 08 пс | Трубы | 2,5-6 | - | 314 | 196 | 16 | 45 | | |

Примечание:

σ_b – предел кратковременной прочности, [МПа];

σ_T – предел пропорциональности (предел текучести для остаточной де-
формации), [МПа];

δ – относительное удлинение при разрыве, [%];

ψ – относительное сужение, [%];

КСУ – ударная вязкость, [кДж/м²].

Таблица 5. Твердость по Бринеллю (НВ, [МПа])

| | | |
|------|--------------|--------------------------|
| 08кп | Пруток | НВ 10 ⁻¹ =115 |
| 08кп | Прокат | НВ 10 ⁻¹ =131 |
| 08кп | Лист | НВ 10 ⁻¹ =100 |
| 08пс | Пруток | НВ 10 ⁻¹ =115 |
| 08пс | Прокат | НВ 10 ⁻¹ =143 |
| 08пс | Лист | НВ 10 ⁻¹ =109 |
| 08пс | Лист толстый | НВ 10 ⁻¹ =131 |

Таблица 6. Технологические свойства

| Свойства | Свариваемость | Флокеночувствительность | Склонность к отпускной хрупкости |
|----------|-----------------|-------------------------|----------------------------------|
| 08кп | Без ограничений | Не чувствительна | Не склонна |
| 08кп | Без ограничений | Не чувствительна | Не склонна |
| 08пс | Без ограничений | Не чувствительна | Не склонна |

Таблица 7. Заменители стали 08пс

| | |
|------|----------------|
| 08кп | 08пс |
| 10кп | 08кп, 15кп, 10 |

Таблица 8. Минимальные относительные радиусы гибки r/S , где r – радиус гибки, S – толщина листа

| Материал | В отожженном или нормализованном состоянии | | В наклепанном состоянии | |
|------------|--|-----------------------|-------------------------|-----------------------|
| | Расположение линии сгиба | | | |
| | поперек волокон проката | вдоль волокон проката | поперек волокон проката | вдоль волокон проката |
| Сталь 08кп | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,6 |

1.2. Выводы по результатам сравнения сталей 08кп, 08пс и 10кп

Из вышеперечисленного сравнения качественных углеродистых сталей видно, что сталь 08кп подходит в большей степени для изготовления из нее деталей сложной формы с большой степенью вытяжки, например, номенклатуры профнастила. Это связано с тем, что при изготовлении профнастила используют такие операции как вытяжка, калибровка, растяжка и д.р., т.е. материал должен иметь хорошую пла-

стичность. И эту пластичность сталь 08кп имеет в наибольшей степени по сравнению со сталями 08пс и 10кп, т.к. между этими сталями имеется такое различие в химическом составе, как процентное содержание углерода, марганца, кремния, которые, в свою очередь, увеличивают прочность (С), прокаливаемость (Mn), предел текучести (Si), а также уменьшают штампуемость и способность к пластической деформации материала при вытяжке (Si). Однако фактическое различие в химическом составе между этими сталями достаточно мало, поэтому они также пригодны для формообразования сложных профилей и профнастила.

Глава 2. МЕТОДЫ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ПРОФИЛИРОВАННОГО ТИПА

2.1 Анализ и оценка возможностей технологических процессов холодной листовой штамповки для изготовления профилей

На первом этапе необходимо определить вид технологического процесса холодной листовой штамповки, который в наибольшей степени соответствует условиям формообразования, затем количество переходов и схемы деформаций по переходам. На следующем этапе устанавливается последовательность операций изготовления профиля, для чего следует выбрать марку материала при заданных конструктивных размерах деталей. В данном случае для изготовления профнастила выбираем марку стали 08кп ГОСТ 1050-88. Рассмотрим и оценим отдельно возможности различных видов процессов холодной листовой штамповки для формообразования заданного профиля детали методами изготовления плоских и объемных тонкостенных изделий из листового материала, ленты или полосы с помощью штампов на прессах или без применения штампов, методом последовательного формообразования за определенное число переходов на прокатных станах в калибрах и др. Так как листовая штамповка подразделяется на горячую и холодную, где горячая штамповка применяется главным образом в производстве объемных полых деталей (днища баков, деталей резервуаров, корпусных деталей в судостроении) из стального листа толщиной 3 ... 4 мм, то операции горячей листовой штамповки аналогичны операциям холодной штамповки, но деформация металла происходит с нагревом заготовок, что требует при разработке чертежей заготовок расчёта величин утяжки металла на окончательных этапах технологических процессов, а также степени коробления при охлаждении деталей вследствие температурных деформаций. При этом необходимо увеличивать допуски на размеры заготовок в сравнении с холодной штамповкой. Кроме того, повышается трудоемкость процессов за счёт нагрева заготовок в пламенных, электрических печах или специальных электронагревательных устройствах.

Так как толщина заготовки для профилированного листа 0,4-2,0 мм, то выбираем процессы холодной листовой штамповки. Это наиболее прогрессивный метод обработки давлением, так как он позволяет получить детали, не требующие окончательной правки и доводки. Холодной листовой штамповкой изготавливают как крупные, так и мелкие детали (рамы и кузова автомобилей, шасси самолетов, элементы обшивки судов, детали часовых механизмов и др.). Листовая штамповка дает большую экономию в использовании металла, обеспечивая в то же время высокую производительность. Но наибольший эффект она дает при массовом и крупносерийном производстве.

При холодной листовой штамповке и профилировании листовых заготовок применяются углеродистая и легированная стали, алюминий и его сплавы, медь и ее сплавы, а также неметаллические материалы: картон, эбонит, кожа, резина, фибра, пластмасса, поставляемые в виде листов, лент и полос.

На первом этапе технологию и операции листовой штамповки можно разделить на два основных вида: разделительные и формоизменяющие. К основным разделительным операциям относятся: резка, вырубка и пробивка.

В разделительных операциях (рис. 1) происходит последовательное отделение части заготовки от исходной целой по прямой или кривой линии, по разомкнутому или замкнутому контуру для получения как готовых деталей, так и раскроя листа на полосы нужной ширины. При раскрое листа необходимо правильно составить схему раскроя материала, чтобы выход деталей из исходной целой заготовки (листа) был максимальным, а отходы были минимальными. Рациональность раскроя определяется на основании подсчета коэффициента использования материала. Под коэффициентом понимается отношение площади вырубленных деталей к площади листа. Операция резки производится с помощью вибрационных, дисковых, гильотинных и других ножниц.

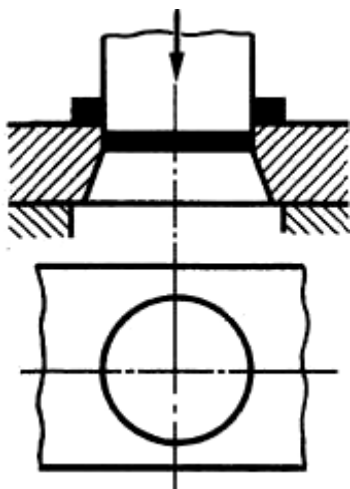


Рис. 1

В разделительных операциях выделяют вырубку – операцию по получению заготовки с отверстиями замкнутого контура (рис. 2). На рис. 2 приведены чертеж (I) и схема (II) типовой детали, изготавливаемой из полосы вырубкой.

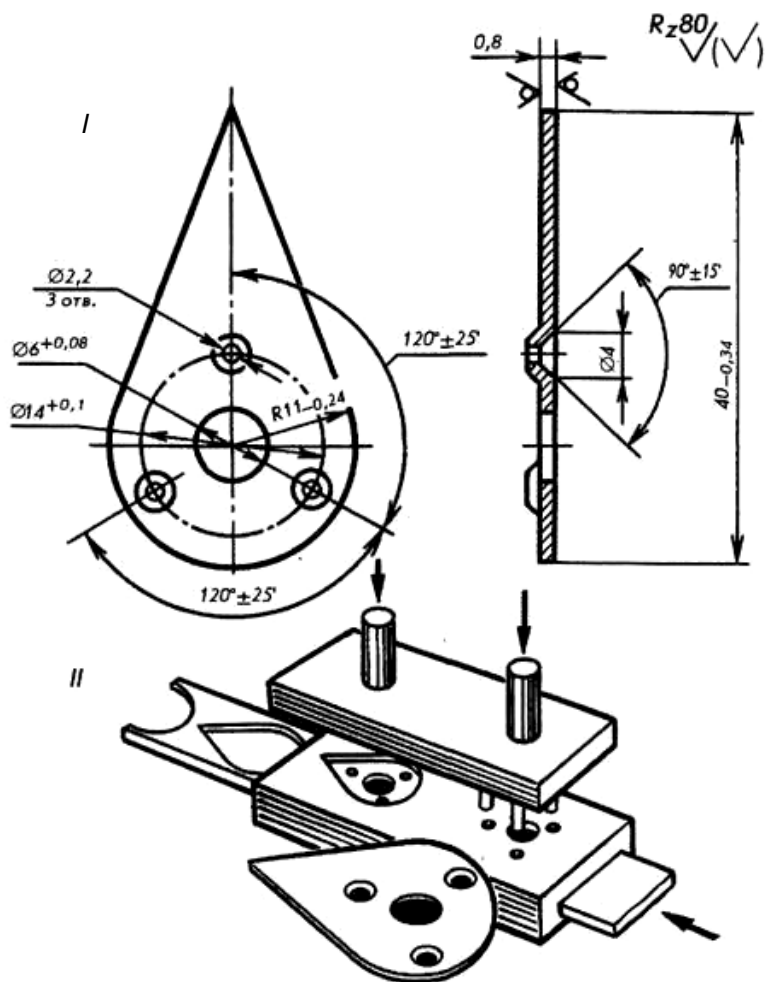


Рис. 2

Пробивка – получение отверстий в заготовке или детали нужной формы (рис. 3).

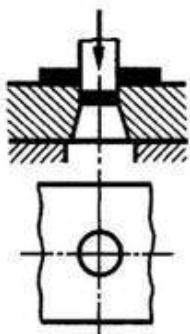


Рис. 3

Оценим возможность применения основных формоизменяющих операций - гибки, вытяжки, отбортовки, обжима и формовки для профилирования листовых заготовок.

Гибка – операция, при которой плоской заготовке придают изогнутую форму (рис. 4). Форма может быть V -образная, U-образная и др. (рис. 5).

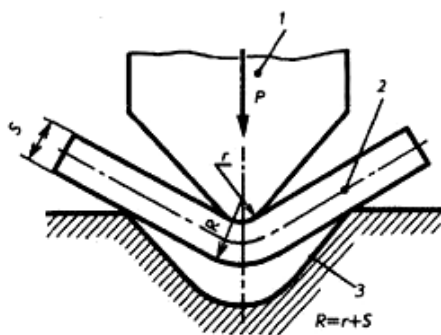


Рис. 4. Схема гибки в инструменте:

1 – пуансон; 2 – нейтральный слой; 3 – матрица H ;
 R и r – внешний и внутренние радиусы гибки, S – толщина материала

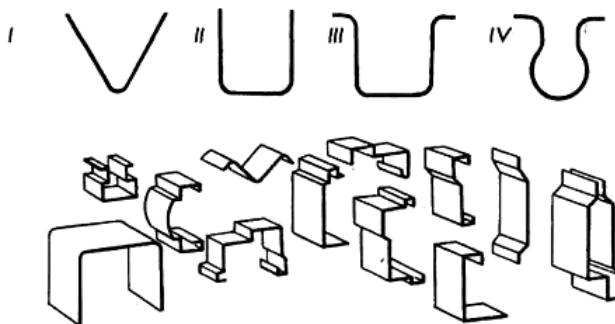


Рис. 5. Многообразие форм: V -образная, U-образная и др.

На рис. 6 представлен чертеж детали, отверстия в которой получены пробивкой. После этого деталь изогнута на штампе.

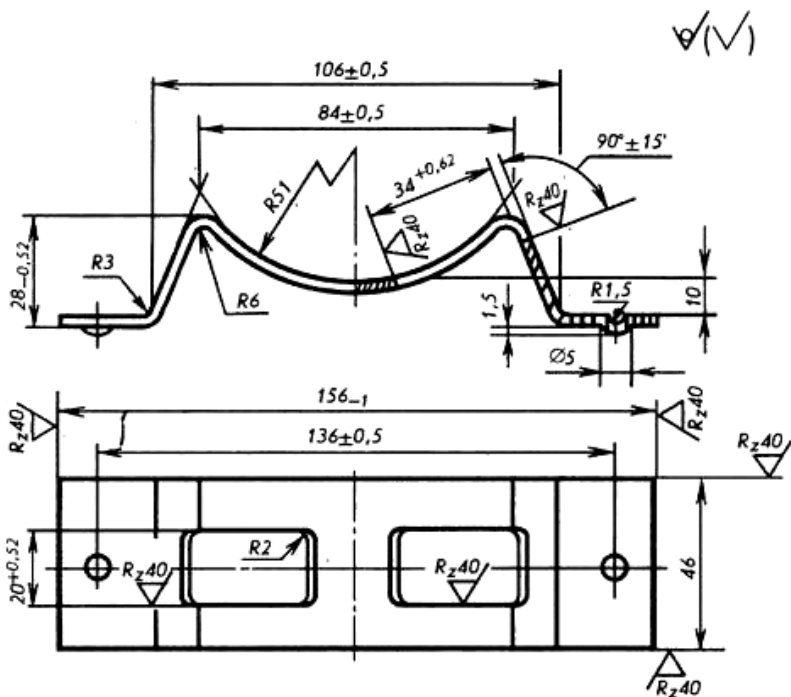


Рис. 6. Сочетание разделительных и формообразующих операций

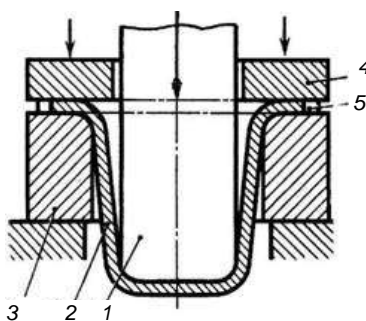


Рис. 7. Схема вытяжки

Вытяжка – операция, превращающая плоскую заготовку в полую пространственную деталь или полуфабрикат 2 (рис. 7). Вытяжкой можно изготовлять не только цилиндрические детали, но и сложные по форме коробчатые, конические и полусферические. При вытяжке плоская заготовка 5 втягивается пуансоном 1 в отверстие матрицы 3. Для предотвращения в заготовке при сжимающем напряжении образования складок применяют прижимы 4.

Вытяжка может быть без утонения и с утонением. В первом случае она происходит без заметного изменения толщины, во втором – изменяется не только форма заготовки, но и толщина ее стенок. В случае глубокой вытяжки она выполняется в несколько переходов. На рис. 8 показан чертеж типовой детали из листовой заготовки 1, изготовленной вытяжкой 2 и пробивкой 3.

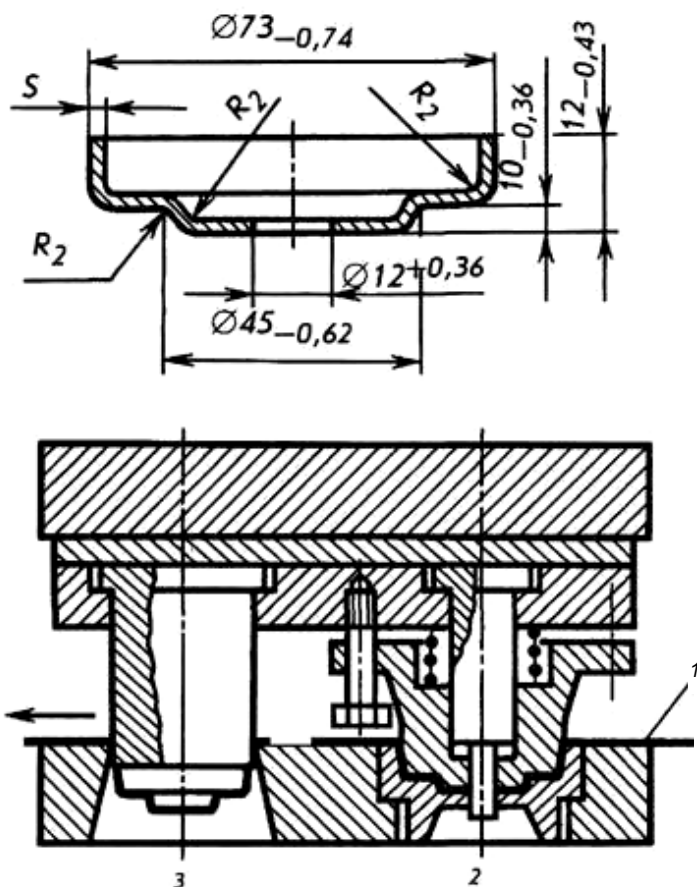


Рис. 8. Изготовление детали вытяжкой и пробивкой

Рассмотрим возможности отбортовки – операции образования бортов по наружному контуру листовой заготовки или вокруг заранее пробитых отверстий в исходной заготовке (рис. 9). Она применяется глав-

ным образом для образования горловин у плоских деталей 2, необходимых как для нарезания резьбы, так и сварки или сборки. Обычно она выполняется последовательно за один или несколько переходов в штампах с рабочими деталями соответствующей формы-пуансона 1 и матрицы 3. Операцию отбортовки очень часто выполняют на концах труб при подсоединении к ним фланцев, с помощью которых трубы будут в дальнейшем соединяться.

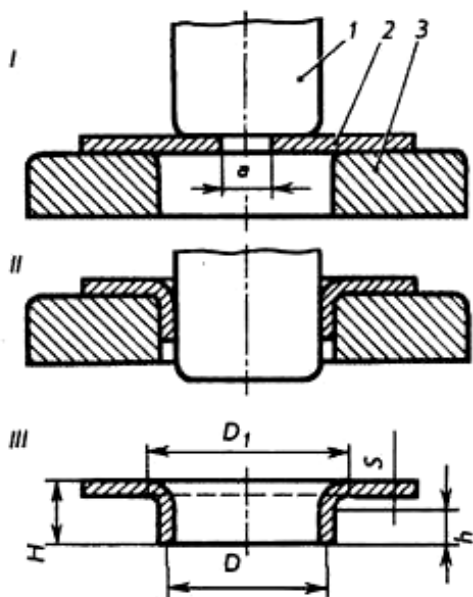


Рис. 9. Возможности и условия получения отбортовки

Обжим – операция сужения (уменьшения) концевой части полых или объемных деталей. Осуществляется она путем обжатия материала штампом снаружи в конической матрице. При этом конфигурация обжимаемой части целиком зависит от формы штампа.

Формовка – операция, связанная с местным изменением формы с сохранением конфигурации наружного контура детали. Примером формовки может служить изготовление ребер жесткости 1, 2, 3, 4, 5 на машиностроительных деталях (рис.10), а также увеличение размеров по диаметру средней части полых детали.

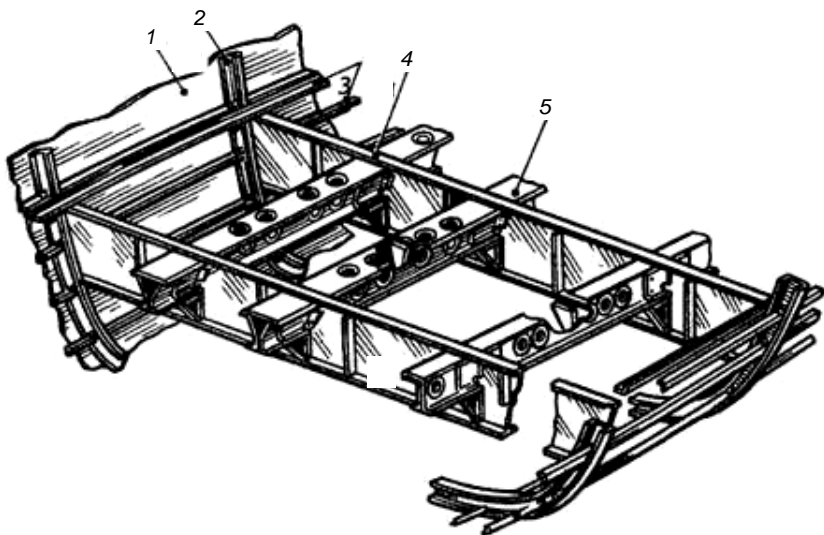


Рис.10. Сборочный узел летательного аппарата из деталей, полученных в разделительных и формообразующих операциях холодной листовой штамповки

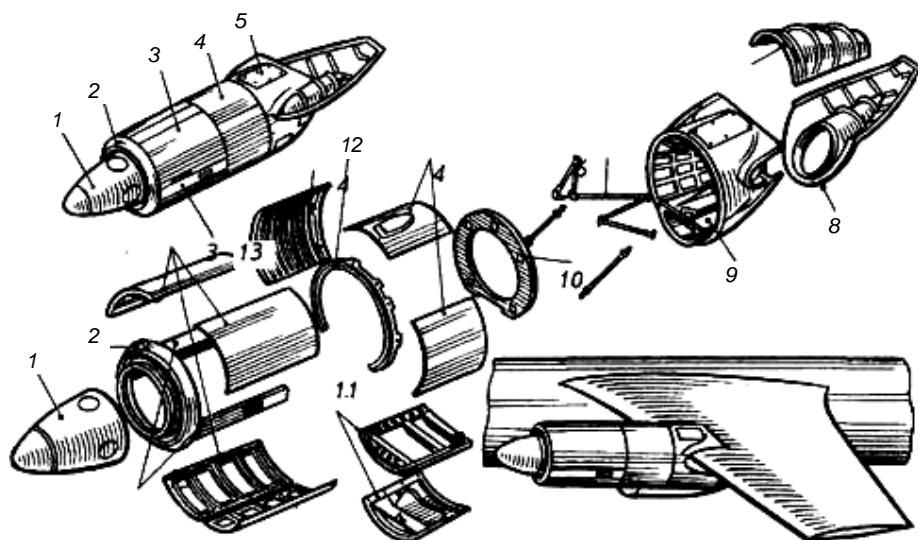


Рис.11. Агрегат летательного аппарата из деталей, полученных в формообразующих операциях холодной листовой штамповки

Можно выделить новые прогрессивные способы холодной листовой штамповки, которые по простоте и экономичности находят широкое применение в условиях мелкосерийного и единичного производства. К ним можно отнести штамповку резиной, жидкостью, взрывом, электрогидравлическую и др. Кратко охарактеризуем их с точки зрения целесообразности применения для профилирования листового материала заготовок для изготовления деталей агрегатов (рис. 11, поз. 1-13).

С помощью штамповки эластичной средой (полиуретаном, резиной) осуществляются разделительные и формоизменяющие операции. При этом пуансоном или матрицей является резина или более качественный материал полиуретан. Штамповку чаще всего применяют для изделий из тонколистового металла толщиной до 2 мм (алюминия, медных сплавов, малоуглеродистой стали).

При штамповке жидкостью металл деформируется под давлением жидкости, принимая форму матрицы. Данный способ применяют для вытяжки полых деталей разной формы.

При штамповке взрывом для пластического формоизменения заготовки применяют взрывчатые вещества (взрывчатые газовые смеси из метана, пропана, и др.), создающие высокое давление, под действием которого заготовка принимает форму рабочих поверхностей оснастки.

Штамповку взрывом применяют для изготовления крупных деталей и деталей сложной формы, когда изготовление их другими способами невозможно (труднодеформируемые сплавы) или неэкономично. Такая штамповка не требует сложного и дорогостоящего оборудования.

Метод электрогидравлической штамповки характерен тем, что энергоносителем является высоковольтный электрический заряд в жидкости. Разряд вызывает появление ударной волны, которая и деформирует заготовку, придавая ей необходимую форму. Такой вид штамповки дает возможность выполнять все операции холодной листовой штамповки с большой точностью при сравнительно малых затратах.

При формировании изделий методом магнитно-импульсной формовки деформация происходит при создании импульсного магнитного поля вокруг заготовки и взаимодействия этого поля с импульсными токами, протекающими в заготовке. В результате такого взаимодействия в заготовке возбуждаются вихревые токи, что приводит к образованию вокруг нее также электромагнитного поля. Это создает предпосылки для динамического воздействия на заготовку и ее деформирование.

Этим методом осуществляют обжатие трубных заготовок, рельефную формовку, вырубку и др., но она непригодна для получения профилированных деталей большой длины. Существуют также и другие прогрессивные методы листовой штамповки, но мы их рассматривать не будем. Считаем формоизменяющими операциями такие, при помощи которых из плоской заготовки получают детали пространственной формы.

Рассмотрим теоретические основы вытяжки (рис. 12).

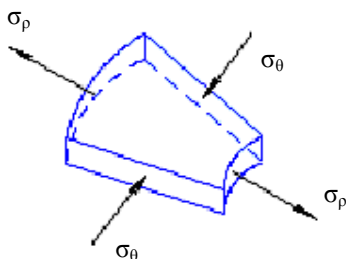


Рис. 12. Схема напряжений

Вытяжка – это процесс, характерной схемой которого является пространственное изменение формы листовой заготовки, а процессы вытяжки характеризуются различными способами. Их можно разделить на несколько групп:

- Инструментальные способы вытяжки.
- Способы вытяжки с эластичной или жидкостной средой.
- Специальные способы вытяжки.

1. Инструментальные способы вытяжки (рис. 13, 14, 15).

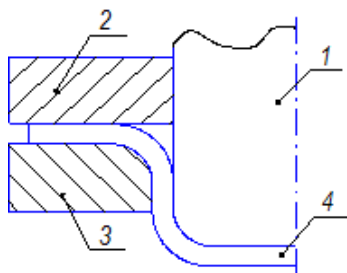


Рис. 13. Вытяжка в плоской матрице с плоским прижимом:
1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица; 4 – деталь

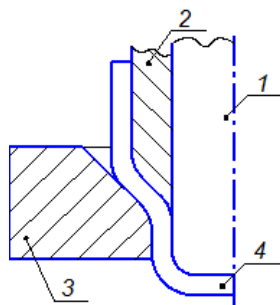


Рис. 14. Последовательная вытяжка:
1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица; 4 – деталь

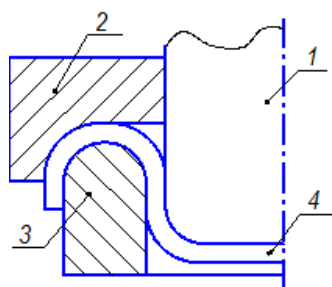


Рис. 15. Вытяжка с выворачиванием (с крюком):
1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица; 4 – деталь.

2. Способы вытяжки с эластичной или жидкостной средой (рис. 16).

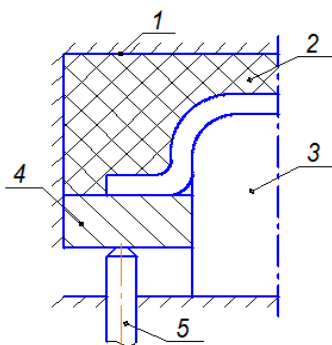


Рис. 16. Вытяжка с эластичной средой:
1 – контейнер; 2 – эластичная среда; 3 – пуансон; 4 – прижим; 5 – шпилька

3. Специальные способы вытяжки (рис. 17, 18).

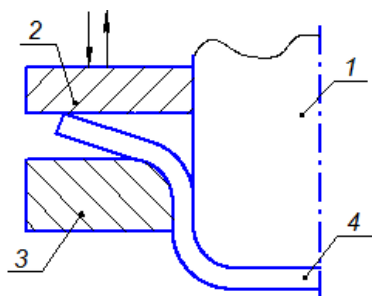


Рис. 17. Пульсирующая вытяжка:
1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица; 4 – деталь

Сущность состоит в том, что при вытяжке фланец за счет возвратно-поступательного движения прижима то выпрямляется, то гофрит. Коэффициент вытяжки получается очень большой для материала, который слабо упрочняется.

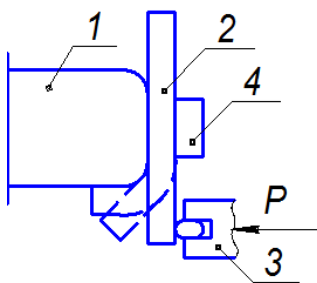


Рис. 18. Ротационная (давильная) вытяжка:
1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – давильный ролик; 4 – прижим

Ротационная (давильная) вытяжка широко распространена и особенно эффективна на станках с ЧПУ. Данный способ применим для тонких и пластичных материалов (алюминиевые сплавы). Давильная вытяжка применяется в основном для мелкосерийного производства.

Способ имеет следующие недостатки: сложна наладка оборудования, часто приходится доводить инструмент вручную, сложное обслуживание, так как требуется большое количество обслуживающего персонала, в связи с чем изделия, получаемые этим способом, трудоемкие.

2.2. Теория и технология процессов вытяжки. Схема напряженно-деформированного состояния (НДС)

Рассмотрим наиболее полную схему вытяжки с прижимом круглой плоской заготовки (рис. 19, 20).

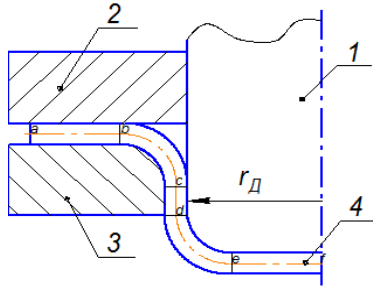


Рис 19. Схема вытяжки:
1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица; 4 – заготовка

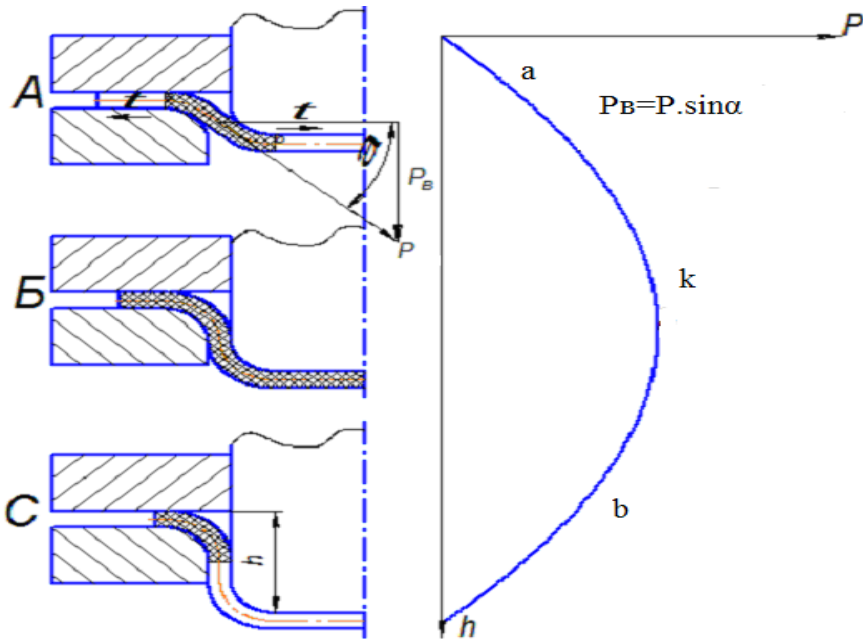


Рис. 20. Этапы вытяжки

Сам процесс вытяжки условно можно разбить на 3 стадии.

Первая стадия характерна ростом усилия и тем, что пластическая деформация охватывает только часть заготовки, а именно свободную часть – участок ab (рис. 20). Центральная и периферийная части деформируются упруго. Переход их в пластическое состояние сдерживает сила трения. По мере опускания пуансона происходит утонение и упрочнение свободной части заготовки. Усилие деформации перераспределяется на соседние элементы и переводит их в состояние пластической деформации. Кроме того, на этой стадии происходит рост усилия за счет изменения направления вектора силы с ростом его вертикальной проекции на свободном участке. Рост усилия происходит не только за счет упрочнения, но и за счет изменения угла приложения силы деформации.

Наконец наступает момент, когда вся заготовка охвачена зоной пластической деформации. На участке kb происходит рост усилия только за счет упрочнения фланца заготовки, несмотря на то, что размеры фланца уменьшаются. Однако наступает момент, когда фланец упрочняется, а его размеры малы и сопротивление его уменьшается. В этот момент усилие достигает максимума. Как правило, при глубокой вытяжке происходит полный обхват заготовкой пуансона и матрицы в радиусной части. Последняя стадия характеризуется тем, что очаг пластической деформации имеет место на фланце и радиусе закругления. При этом деформирующая сила уменьшается, так как снижается напряжение (сопротивление фланца деформации) в зоне фланца. Эта часть фланца переходит в область упругой деформации. Для небольших коэффициентов вытяжки возможно наличие упругих зон пластических деформаций в зоне дна.

Рассмотрим случай глубокой вытяжки на второй стадии, когда именно на этой стадии наблюдаются большие усилия и деформации (рис. 21).

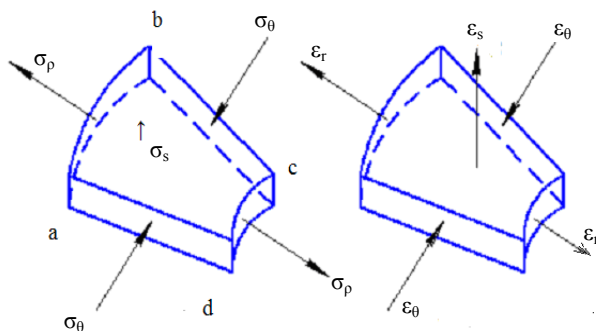


Рис. 21. Вытяжка на второй стадии

Участок ab – характеризуется растягивающими усилиями.

Участок bc – участок радиусного закругления матрицы, на котором происходит утонение заготовки, участок cd – цилиндрический участок.

2.3. Определение напряжений и деформаций при вытяжке

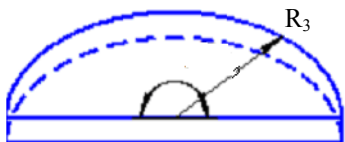
Наиболее просто определяются деформации и напряжения на кромке фланца. На кромке фланца меридиональные напряжения приблизительно равны контактным $\sigma_p \approx \sigma_H \approx 0$.

То есть имеем схему линейного напряженного состояния

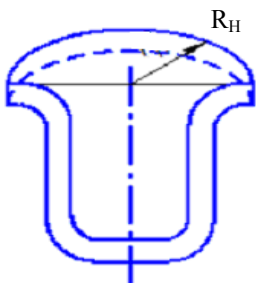
$e_\theta \neq 0, e_\theta + e_p + e_s = 0, e_p = e_s$ (изотропное тело).

Геометрически это представлено на рис. 22.

$$L_3 = 2\pi R_3$$



$$L_H = 2\pi R_H$$



Зная длины до и после деформации как длину окружности заготовки L_3 и фланца детали L_H , можно найти тангенциальные деформации кромки:

$$\varepsilon = \frac{l_K - l_0}{l_K} \approx \ln \left| \frac{l_K}{l_0} \right|,$$

то есть при небольших деформациях данное равенство выполняется с погрешностью 2-3%.

Таким образом, тангенциальная деформация кромки равна:

$$e_\theta = \ln \left| \frac{L_H}{L_3} \right| = \ln \left| \frac{R_H}{R_3} \right|.$$

Для изотропного тела

$$e_p = e_s = -\frac{1}{2} \cdot e_\theta, \quad \text{следовательно}$$

$$e_s = \ln \left| \frac{S_H}{S_3} \right| = -\frac{1}{2} \cdot \ln \left| \frac{R_H}{R_3} \right|,$$

$$\ln \left| \frac{S_H}{S_3} \right| = \ln \sqrt{\frac{R_H}{R_3}}. \quad \text{Толщина кромки } S_H = S_3 \cdot \sqrt{\frac{R_3}{R_H}}.$$

Таким образом, чем меньше наружный радиус R_H , тем больше толщина заготовки по кромке.

Максимальная толщина кромки детали определяется как

$$S_{H\max} = S_3 \cdot \sqrt{\frac{R_3}{r_D}},$$

где r_D – радиус детали.

Для оценки возможности применения теории вытяжки к технологическим процессам формообразования профилей необходимо разработать методику вычисления основных параметров вытяжки:

1. Усилие процесса.
2. Геометрические параметры оснастки.
3. Величины утонений и утолщений заготовки при вытяжке.

Чтобы определить максимальную величину утонения (рис. 23), следует предположить, что наибольшее напряжение и наибольшее утонение находятся в зоне границы перехода радиусной и цилиндрической частей. Это объясняется тем, что в этой зоне действуют наибольшие растягивающие напряжения вследствие повышенного сопротивления участка фланца заготовки и радиусного участка. На радиусной части заготовки напряжения уменьшаются за счет активных сил трения на пуансоне и напряжений от изгиба. Области максимальных утонений заготовки при вытяжке изображены на рис. 23.

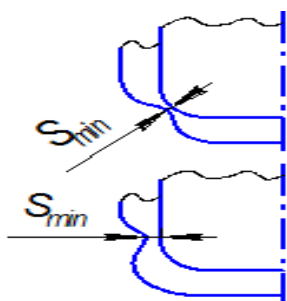


Рис. 23

В случае, если поверхность радиусной части заготовки предварительно отполирована или на этой поверхности применяется смазка, максимальные значения напряжений наблюдаются не в цилиндрической части заготовки, а в зоне радиусного перехода, где по мере вытяжки как в опасном сечении получают наибольшие величины утонений ещё на стадиях, где величины усилия вытяжки не достигли максимальных значений, затем утонение переходит на цилиндрическую поверхность. В

результате роста величин максимального усилия вытяжки, если не предусмотреть в технологических процессах мер для приведения их значе-

ний в норму, в дальнейшем происходит обрыв дна при меньших значениях величин усилия вытяжки, чем, например, в случае применения смазки, если коэффициент трения в зоне контакта пуансон – заготовка – матрица больше критического. Смазка в радиусной части заготовки снижает величину сил трения аналогично предварительной полировке поверхности инструмента и заготовки. Считают, что схема напряженно-деформированного состояния заготовки линейная.

Для расчёта интенсивности напряжений и деформаций используем уравнение кривой упрочнения степенного вида:

$$\sigma_i = A \cdot e_i^n,$$

где σ_i , e_i^n – интенсивности напряжений и деформаций;

A , n – константы механических свойств.

$$A = \frac{\sigma_B}{(1 - \psi_p) \cdot \psi_p^n}, \quad n = \delta_p, \quad \delta_p = \frac{\psi_p}{1 - \psi_p}.$$

Для линейной схемы напряженного состояния интенсивность напряжений равна σ_p :

$$\sigma_i = \sigma_p \text{ и } e_i = e_s \Rightarrow e_{s \min}$$

$$\sigma_{\rho \text{MAX}} = A \cdot e_s^n,$$

$$e_s = - \left(\frac{\sigma_{\rho \text{MAX}}}{A} \right)^{\frac{1}{n}},$$

$$S_{\min} = S_3 \cdot \exp \left[- \left(\frac{\sigma_{\rho \text{MAX}}}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \right],$$

$$S_{CP} = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \approx S_3.$$

Из условия постоянства объёмов заготовки и детали $V_3 = V_D$, не учитывая величину упругой деформации $F_3 \cdot S_3 = F_D \cdot \bar{S}_D$, где \bar{S}_D – толщина детали по средней поверхности ($\bar{S}_D = S_3$), получаем условие равенства площадей при вытяжке: $F_D = F_3$.

Условие равенства площадей детали и заготовки положено в основу определения деформаций при вытяжке любого элемента. Для схемы осесимметричной вытяжки такой элемент является кольцевым.

Так как нас интересует усилие процесса вытяжки и предельный коэффициент вытяжки, то следует определить величины деформаций для фланцевой части (рис. 24).

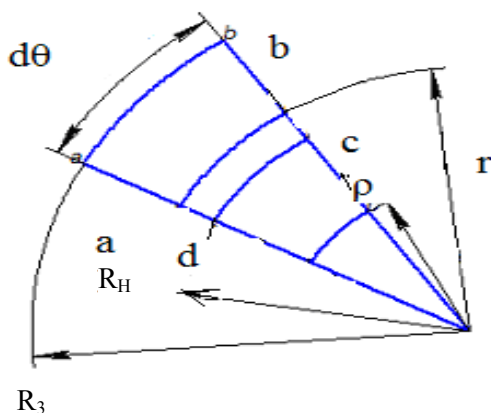


Рис. 24. Схема к определению деформаций во фланце при осесимметричной вытяжке

Выделим на фланце бесконечно малый элемент двумя плоскостями, проходящими через ось детали, перпендикулярными к площади фланца и образующими между собой угол $d\theta$.

Если хотя бы один из размеров элемента имеет бесконечно малый размер, то элемент является бесконечно малым.

С другой стороны, этот элемент образован двумя концентрическими окружностями, имеющими центр на оси симметрии и радиусы R_3 и r . Получили элемент $abcd$. Рассмотрим стадию вытяжки, когда этот элемент находится в положении, ограниченном радиусами R_H и ρ .

Деформация любых тангенциальных точек определяется, если мы знаем длину до и после деформации.

$$e_{\theta R_H} = \ln \left| \frac{l_{a'b'}}{l_{ab}} \right| = \ln \left| \frac{2 \cdot \pi \cdot R_H}{2 \cdot \pi \cdot R_3} \right| = \ln \left| \frac{R_H}{R_3} \right|,$$

$$e_{\theta \rho} = \ln \left| \frac{l_{d'e'}}{l_{dc}} \right| = \ln \left| \frac{\rho}{r} \right|.$$

Длина $l_{\rho d'e'}$ задается $l_{\rho d'e'} = \rho \cdot d\theta$.

Длина исходного состояния этого элемента $l_{dc} = r \cdot d\theta$.

Находим величину тангенциальной деформации любого элемента с координатой ρ , если известна длина этого элемента до деформации или известны его координаты.

Если известна зависимость $r = f(\rho)$, то мы получаем величину деформации e_{θ} от независимой координаты ρ .

Связь между r и ρ находится из условия равенства площадей рассматриваемых элементов до и после деформации.

$$F_{a'b'c'd''} = F_{abcd},$$

$$F_{a'b'c'd''} = (R_H^2 - \rho^2) \cdot d\theta,$$

$$F_{abcd} = (R_3^2 - r^2) \cdot d\theta,$$

$$F_{abcd} = (R_3^2 - r^2) \cdot d\theta,$$

$$r = \sqrt{R_3^2 - R_H^2 + \rho^2}.$$

Теперь можем найти e_{θ} .

Для того, чтобы определить две другие деформации e_{ρ} и e_{θ} , используем уравнение связи напряжений и деформаций:

$$e_s = -\frac{\sigma_{\rho} + \sigma_{\theta}}{2 \cdot \sigma_{\theta} - \sigma_{\rho}} \cdot e_{\theta},$$

$$e_{\theta} = -\frac{e_i}{\sigma_i} \left(\sigma_{\theta} - \frac{1}{2} \cdot \sigma_{\rho} \right), \quad e_s = -\frac{e_i}{\sigma_i} \cdot \frac{\sigma_{\rho} + \sigma_{\theta}}{2}.$$

Согласно используемой методики будем считать, что соотношение напряжений в процессе формообразования есть величина постоянная:

$$\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}} = \text{const}$$

и не зависит от упрочнения материала и изменения его толщины.

Таким образом, рост напряжений за счет упрочнения в обоих случаях происходит пропорционально одному и тому же коэффициенту:

$$\frac{\sigma_{\rho} \cdot K_{упр}}{\sigma_{\theta} \cdot K_{упр}} = \text{const.}$$

Если меняется толщина заготовки, то меняются и величины напряжений:

$$\frac{\sigma_{\rho} \cdot K_S}{\sigma_{\theta} \cdot K_S} = \text{const.}$$

Это условие позволяет определить деформации по отношению $\sigma_{\rho} / \sigma_{\theta}$. Используя уравнения связей (найденных без упрочнения и изменения толщины) по известной одной из деформаций найти другую деформацию.

$$e_S = - \frac{\frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}} + 1}{2 - \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_{\theta}}} \cdot e_{\theta}.$$

Найдем напряжения, действующие на фланце без учета упрочнения и изменения толщины.

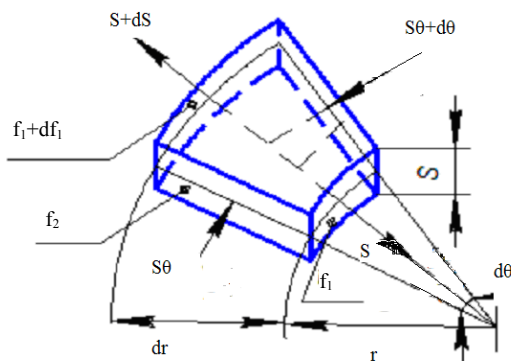


Рис. 25. Расчетная схема

Составим уравнение равновесия на бесконечно малый элемент фланца заготовки.

Составим уравнение равновесия сил, действующих на координату $P_{\theta\rho} = 0$ (рис. 25). По двум другим координатам уравнение равновесия сил составлять не будем в связи с тем, что они обращаются в тождества для заданных условий вытяжки:

$$\sum P_{\theta} = \sum P_{\theta} \sum P_s = \sum P_s,$$

$$(\sigma_{\rho} + d\sigma_{\rho}) \cdot (f_1 + df_1) + 2 \cdot \sigma_{\theta} \cdot f_2 \cdot \sin \frac{d\theta}{2} - \sigma_{\rho} \cdot f_1 = 0. \quad (1)$$

Раскрыв скобки, уберем величины, которые на порядок меньше остальных, а также учтем, что $\sin \frac{d\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2}$, тогда получим

$$\sigma_{\rho} \cdot f_1 + d\sigma_{\rho} \cdot f_1 + \sigma_{\rho} \cdot df_1 + d\sigma_{\rho} \cdot df_1 + \sigma_{\theta} \cdot f_2 \cdot d\theta - \sigma_{\rho} \cdot f_1 = 0, \quad (2)$$

$$d\sigma_{\rho} \cdot f_1 + \sigma_{\rho} \cdot df_1 - \sigma_{\theta} \cdot f_2 \cdot d\theta = 0. \quad (3)$$

Найдем значения площадей:

$$f_1 = \rho \cdot d\theta \cdot S, \quad (4)$$

$$f_2 = S \cdot d\rho.$$

Подставив (3) и (4) в (1), получим:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \sigma_{\rho} + \sigma_{\theta} = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) содержит 2 неизвестных: σ_{ρ} и σ_{θ} .

Условие пластичности по максимальным касательным напряжениям:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \beta \cdot \sigma_S. \quad (6)$$

$\beta = 1 \div 1,15$ определяет схему напряженного состояния, в нашем случае $\beta \approx 1$.

$$\sigma_{\rho} > 0, \quad \sigma_{\theta} < 0, \quad \sigma_K = 0,$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\rho},$$

$$\sigma_{\min} = -\sigma_{\theta}.$$

Условие пластичности (без учета упрочнения) запишется следующим образом:

$$\sigma_{\rho} - (-\sigma_{\theta}) = \sigma_{02}, \quad (7)$$

Подставив в (7) уравнение (5), получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$d\sigma_\rho = -\sigma_{02} \cdot \frac{d\rho}{\rho}. \quad (8)$$

Проинтегрировав уравнение (8), получим:

$$\sigma_\rho = -\sigma_{02} \cdot \ln \rho + C.$$

Граничные условия: $\sigma_\rho = 0$, $\rho = R_H$, тогда постоянная интегрирования

$$C = \sigma_{02} \cdot \ln R_H.$$

В результате получим:

$$\sigma_\rho = \sigma_{02} \cdot \ln \left| \frac{R_H}{\rho} \right|.$$

При $\rho = r_D$ σ_ρ будет максимальным.

$$e_\theta = \ln \left| \frac{\rho}{r} \right|, \quad r = \sqrt{R_3^2 - R_H^2 + \rho^2}, \quad e_\rho + e_\theta + e_S = 0.$$

Эпюры изменения напряжений и деформаций на фланце при вытяжке

$$|l_{ab}| + |l_{cd}| = \sigma_{02},$$

$$|l_{a'b'}| + |l_{c'd'}| = \sigma_{02},$$

$$\sigma_{\rho \max} - (\sigma_{\theta \min}) = \sigma_{02}.$$

Определение технологических параметров при вытяжке:

- Форма и размеры заготовки.
- Геометрические параметры штамповой оснастки (радиус закругления, зазоры).
- Энергетические параметры (усилие процесса, усилие прижима, работа).
- Предельные параметры.

1. *Определение формы и размеров заготовки.*

В принципе форма заготовки может быть любой. Её выбирают исходя из 2 принципов:

1) достичь наивысшего коэффициента металла;

2) получить наибольший коэффициент вытяжки $K_B = \frac{D_3}{d_D}$.

Наивысший коэффициент использования металла возможно получить, если стремиться к условию подобия формы исходного материала к форме заготовки.

Коэффициент вытяжки

$$K_B = \frac{D_3}{d_D}$$

наибольший в том случае, если форма заготовки и форма детали совпадают.

Размеры заготовки определяются из условия постоянства площадей заготовки и детали по срединной поверхности.

Условие постоянства объемов:

$$V_D = V_3,$$

$$V_3 = F_3 \cdot S_3 = F_D \cdot \bar{S}_D,$$

где \bar{S}_D – средняя толщина детали.

На кромке, когда

$$\sigma_\rho = 0, \quad \sigma_\theta = -\sigma_{02}, \quad \sigma_S = -\frac{1}{2} \cdot \sigma_\theta = -\frac{1}{2} \cdot \ln \left| \frac{R_H}{R_3} \right|,$$

$$e_S = \ln \left| \frac{S_{KP}}{S_0} \right|,$$

$$\text{где } S_{KP} = S_0 \cdot \sqrt{\frac{R_3}{R_H}}.$$

Уравнение связи:

$$e_S = -\frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2 \cdot \sigma_\theta - \sigma_\rho} \cdot e_\theta,$$

это условие выполняется, когда $\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} = -1$ ($e_S = 0$).

Координата элемента, определяющая то место, где он по толщине не меняется, находится из условия:

$$\frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta} = -1.$$

$$\sigma_\rho = \sigma_{02} \cdot \ln \left| \frac{R_H}{\rho} \right|,$$

$$\sigma_\theta = \sigma_{02} - \sigma_\rho = \sigma_{02} \cdot \left(1 + \ln \frac{R_H}{\rho} \right),$$

$$\rho_{ГР} = \frac{R_H}{1,67}.$$

Получили условие, при котором $\bar{S}_Д \approx S_3$. Исходя из этого условия, условие постоянства объема превращается в условие постоянства площадей:

$$V_Д = V_3,$$

$$F_3 = F_Д = \sum_{i=1}^n F_{Дi},$$

где $F_{Дi}$ – площадь элементарных фигур.

При вытяжке коробчатых изделий расчет размеров заготовки имеет особенность.

Форму заготовки, как правило, представляют в виде прямоугольника или квадрата с радиусами закругления.

Угловые радиусы закруглений R_y определяются из условия равенства площадей цилиндрической детали и заготовки в виде круга. Цилиндрическая деталь представляет собой цилиндр, радиус закругления которого равен радиусу углового закругления.

Эта цилиндрическая деталь может быть составлена из 4 угловых закругления без прямолинейных стенок.

$$\pi \cdot R_y^2 = F_{ЦИЛ.ЗАГ}.$$

Стороны заготовки A и B находят из условия равенства длин образующих:

$$A = \sum_{i=1}^n l_i, \quad B = \sum_{j=1}^n l_j.$$

Радиус R_y проводится из центра.

2. *Определение геометрических параметров штамповой оснастки.*

Зазор между матрицей и пуансоном выбирается при условии, чтобы максимальная толщина вытягиваемой заготовки на претерпевала принудительного утонения, то есть зазор должен быть равен максимальной толщине детали.

Если зазор будет больше, то деталь будет иметь искривленную форму. Если зазор меньше, то происходит полупротяжка детали, то есть частичная вытяжка с утонением. Это дает как положительный, так и отрицательный эффект.

Преимущества вытяжки с принудительным утонением:

- 1) увеличение высоты заготовки;
- 2) получается более ровный торец, сглаживаются дефекты анизотропии.

Утонение сглаживает неровности торца за счет разной величины принудительного утонения.

Недостатки:

1) трудность съема заготовки с пуансона: после вытяжки за счет действия упругой разгрузки заготовка плотно охватывает пуансон;

2) нагрев заготовки: происходит переход пластической деформации в тепловую энергию, нагревается инструмент, детали оснастки быстро выходят из строя.

В связи с этим следует применять систему охлаждения, предусматривать съемники, при этом оснастка и оборудование усложняются. Поэтому следует выдерживать требуемый зазор между матрицей и пуансоном и радиус закругления матрицы и пуансона.

Опыт показывает, что чем меньше радиус закругления, тем требуются меньшие дополнительные напряжения и усилия для достижения заданных параметров деталей.

Необходимо также учитывать величину возникающего изгибающего момента:

$$M_{II} = \frac{\sigma_{02} \cdot S^2}{4}.$$

Изгибающий момент возникает там, где имеет место неравномерное распределение напряжений. Момент возникает и в том случае, когда напряжение имеет один и тот же знак.

Необходимое дополнительное напряжение определяем из условия равенства работ от внешних и внутренних сил:

$$A_{BH} = A_B.$$

Работа внешних сил:

$$A_{BH} = \Delta\sigma_{\rho II} \cdot S \cdot b \cdot (r_M + 0,5S) \cdot dj,$$

где $b = 1$ – единичная ширина,

$$S \cdot b = F, \quad (r_M + 0,5S) \text{ – плечо.}$$

Работа внутренних сил:

$$A_B = M_{II} \cdot dj.$$

Так как $A_{BH} = A_B$, то

$$\Delta\sigma_{\rho II} = \frac{M_{II}}{S \cdot b \cdot (r_M + 0,5S)} = \sigma_{02} \frac{S^2}{4 \cdot S \cdot (r_M + 0,5S)} = \frac{\sigma_{02}}{2 \frac{r_M}{S} + 1}.$$

Таким образом, с уменьшением $\frac{r}{S} \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta\sigma_{\rho M} \rightarrow \sigma_{02}$.

Из справочной литературы рекомендуемое значение $\frac{r_M}{S} = (5 \div 8)$.

Предельный коэффициент вытяжки $K_B^{ПРЕД}$ определяется из условия $\sigma_{\rho \max} = \sigma_B$.

$$X = \frac{R_3 - R_H}{R_3} = \psi_{III} \cdot \ln|K_B|.$$

В этот момент определяют σ_B .

$$\sigma_{\rho \max} = A \cdot X^n;$$

$$\sigma_{\rho \max} = \left[A \cdot (\psi_{III} \cdot \ln K_B)^n \cdot \ln \left| \frac{R_H}{r_D} \right| + \frac{\sigma_S}{2 \cdot \frac{r_M}{S} + 1} + \frac{Q \cdot f}{2 \cdot \pi \cdot R_H \cdot S} \right] \cdot e^{f_{трj}} = \sigma_B.$$

Отсюда находим предельный коэффициент K_B .

Другими словами, если процесс вытяжки происходит в нестандартном режиме (прижим, радиус закругления матрицы и др.), то находят $K_B^{ПРЕД}$, то есть $K_B^{ПРЕД} < K_B$.

Число переходов при вытяжке определяют следующим образом:

$$K_B = \frac{R_3}{r_D},$$

$$K_B = \frac{R_3}{r_D} \cdot \frac{R_1}{R_1} \cdot \frac{R_2}{R_2} \cdot \dots \cdot \frac{R_{n-1}}{R_{n-1}}.$$

Перепишем выражение в следующем виде:

$$K_B = \frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{R_1}{R_1} \cdot \dots \cdot \frac{R_{n-2}}{R_{n-1}} \cdot \frac{R_{n-1}}{r_D},$$

в результате получим

$$K_B = K_{B1} \cdot K_{B2} \cdot K_{B3} \cdot \dots \cdot K_{Bn},$$

то есть процесс можно разбить на n операций вытяжки.

Число операций вытяжки n легко бы нашлось, если бы задались, что $K_{B1} = K_{B2} = \dots$

Однако практика показывает, что коэффициенты вытяжки K_B на разных операциях разные. Причем на первых операциях K_B наибольший, на последующих он значительно меньше, примерно в $1,5 \div 1,7$ раза.

Но напряжения в первом и последующих переходах в опасном сечении должны быть одинаковы, они не должны превышать предел прочности, аналогично как и при вытяжке на последующих переходах опасными сечениями не должны являться участки прежде недеформируемые.

Возможность последующих операций вытяжки в первую очередь объясняется снижением коэффициента вытяжки или уменьшением зоны сопротивления очага деформации.

Поэтому последнее равенство запишем следующим образом: на последующих операциях приняты одинаковые коэффициенты, их число $n - 1$, а на первом переходе – отличные от вышеуказанных. Тогда:

$$K_B = K_B \cdot K_{B2}^{n-1}.$$

Прологарифмируем данное выражение, в результате получим:

$$\ln K_B = \ln |K_{B1}| + (n - 1) \ln |K_{B2}|.$$

Найдем число переходов:

$$n = \frac{\ln |K_B| - \ln |K_{B1}|}{\ln |K_{B2}|} + 1.$$

Опыты показывают, что $K_{B1} = 1,8 \div 2,2$, $K_{B2} = 1,3 \div 1,5$.

Полученное количество переходов n округляем до целого числа n .

2.4. Процессы формовки листовых заготовок при формообразовании геометрии профилей с учётом рассмотренных теоретических положений процессов вытяжки

При формовке усилие процесса и схема НДС теоретически должны быть одинаковы для всех участков (рис. 26).

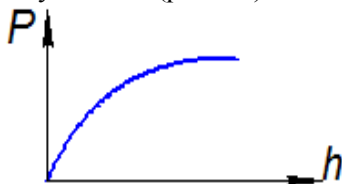


Рис. 26. Зависимость усилия деформации заготовки от высоты формируемого рельефа изделия

Условие пластичности имеет вид: $\sigma_p \approx \sigma_\theta \approx \sigma_s$.

При формовке не всегда может иметь место цилиндрический участок. Наиболее просто усилие процесса определяется через давление q и проекцию деформируемой площади заготовки по нормали к вектору силы деформации:

$$F = 2 \cdot \pi \cdot r_D, \quad P = q \cdot F.$$

Площадь заготовки не оказывает существенного влияния на параметры процесса, кроме силовых, может быть любой, форма детали определяется формой деформирующего инструмента.

Количество переходов определяется из условия

$$S_D = S_3 \cdot \exp \delta_\rho,$$

где δ_ρ – относительное утонение заготовки в опасном сечении.

Величина утонения может быть увеличена за счёт многократных промежуточных отжигов:

$$K_{YT} = K_{YT1} \cdot K_{YT2} \cdot \dots \cdot K_{YTn} = K_{YT1}^n \Rightarrow n = \frac{\ln |K_{YT}|}{\ln |K_{YT1}|}.$$

Наличие трения приводит к неравномерности деформаций (утонение). Форму детали выбирают из условия равномерного утонения.

$$V_3 = V_D,$$

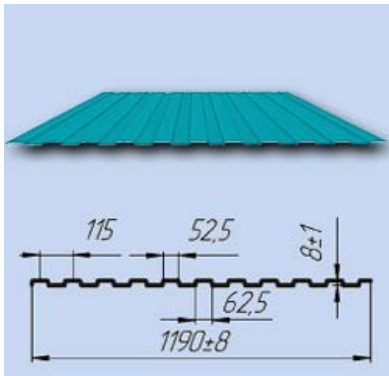
$$F_3 \cdot S_3 = F_D \cdot S_D \cdot K,$$

где коэффициент K учитывает неравномерность $K = 0,5 - 0,7$.

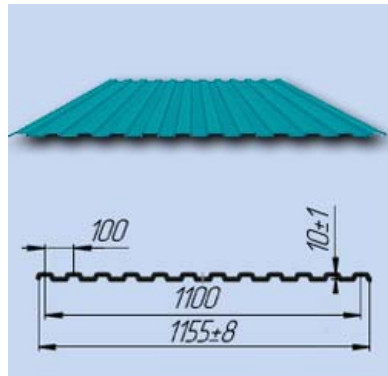
Характер распределения толщин по площади заготовки зависит от материала, механических свойств заготовки и схемы деформации.

Рассмотрим приведенные выше теоретические положения применительно к проектированию технологических процессов формообразования листового материала для изготовления одного из типовых видов изделий – профилированного листа. По форме рельефа и геометрическим размерам параметры готовых изделий должны соответствовать установленным стандартам (рис.27).

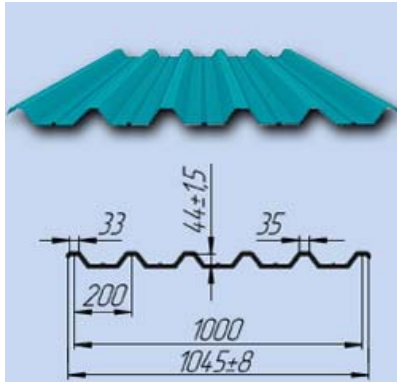
Геометрически профнастил представляет собой профилированный металлический лист с волнообразными ребрами, получаемый за определенное число переходов с различными степенями вытяжки за каждый переход.



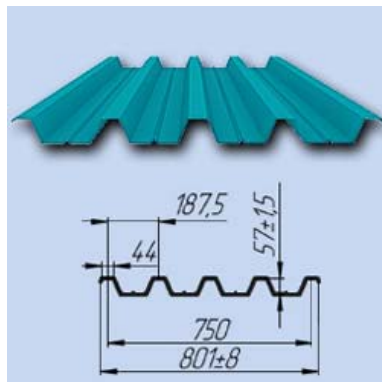
C10-1100



H15-1000



H57-750



H60-845

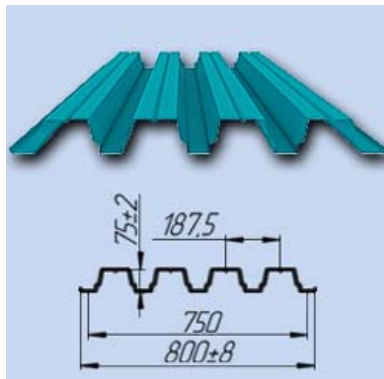


Рис. 27. Типовые виды профнастила

Соответственно такие профилированные листы классифицируют по следующим признакам:

- назначению;
- материалу исходной заготовки;
- наличию гальванического и защитно-декоративного лакокрасочного покрытия.

По назначению профилированные листы подразделяют на типы:

- Н – для настила покрытий;
- НС – для настила и стеновых ограждений;
- С – для стеновых ограждений;
- СН- сэндвичей.

По материалу исходной заготовки профилированные листы подразделяются:

- на листы из тонколистового оцинкованного проката по ГОСТ 14918 -91 (без обозначения) [6];
- на листы из тонколистового проката с алюмоцинковым покрытием по ТУ 14-11-247 [7] (обозначение АЦ);
- на листы из тонколистового алюминированного проката и проката с алюмокремниевым покрытием по ТУ 14-11-236 [8] (обозначение А и АК);
- на листы из тонколистового проката с электролитическим цинковым покрытием по ТУ 14-1-4695 [9] (обозначение ЭОЦП).

По наличию защитно-декоративного лакокрасочного покрытия профилированные листы подразделяют:

- на листы без лакокрасочного покрытия (без обозначения);
- на листы с лакокрасочным покрытием по ГОСТ 30246 [10] (указывается обозначение лакокрасочных материалов).

Профилированные листы по длине должны изготавливаться:

- кратной (250 мм) мерной длины от 3 до 12 м – для настила (типов Н и НС);
- кратной (300 мм) мерной длины от 2,4 до 12 м – для стеновых ограждений и сэндвичей (типов НС, С, СН).

По согласованию изготовителя и потребителя допускается изготавливать профилированные листы любой мерной длины, а также длиной менее 2,4 м и более 12 м для настила и других целей [11].

Также по назначению и условиям применения профнастил имеет различную модификацию по материалу, форме и видам защитного покрытия как наиболее дешевый и прочный материал с долговечным сроком службы.

2.5. Исследование особенностей современных технологических процессов профилирования заготовок в виде ленты или полосы

Анализ современных технологических процессов изготовления деталей со сложным профилем поперечного сечения типа профнастил показал, что главной формообразующей операцией является вытяжка за ряд последовательных переходов, выполняемая деформирующим инструментом в виде валков-калибров на автоматизированных прокатных станах. Проведенный выше анализ и оценка свойств применяемых материалов показали, что в этом случае для технологических процессов формообразования лучше всего подходит листовая сталь, в том числе оцинкованная с полимерным цветным покрытием. В результате процесса прокатки такой лист приобретает сложную форму профиля гофрированной структуры, обладающую как изделие, по сравнению с исходным материалом, большой жесткостью формы. Геометрия профилированного листа напрямую зависит от того, какой формообразующий инструмент для производства профнастила используется. Таким образом, от того или иного вида деформирующего инструмента и технологического оборудования зависит форма и качество изготавливаемого профиля: трапециевидного, прямоугольного, волнообразного др.

Исследование особенностей современных технологических процессов профилирования листа или полосы показало, что при наиболее высоких технико-экономических показателях изготовление профнастила производится на специальных многороликовых профилировочных машинах или прокатных станах, выполняющих разнообразные профили открытой, закрытой и полужакрытой конфигурации.

Существуют различные варианты процессов формообразования изделий, однако не все особенности технологии имеют достаточное теоретическое обоснование расчетных схем постепенного превращения плоской заготовки в форму требуемого профиля, особенно по расчётам оптимальных величин вытяжки за переход, величин действительных напряжений и деформаций. Это приводит в ряде случаев к недопустимому утонению материала заготовки, проблемам с выбором оснастки, её конструкции и оборудования, необходимых для изготовления того

или иного профиля, качество которого зависит от степени сложности его конфигурации.

Так как большинство видов оборудования имеет основные и вспомогательные ролики или валки-калибры, то требуется разработка методики совершенствования их конструкции и схем компоновки, которые могут быть расположены горизонтально или с наклоном при выполнении основной деформации сечения профиля. Вспомогательные (промежуточные) ролики или валки расположены вертикально и служат для направления профиля между основными роликами, а также для дополнительных подгибов.

При построении схемы технологических переходов требуемая ширина заготовки может быть определена путем развертки сечения профиля так же, как в случае гибки, с учетом смещения нейтрального слоя. При изготовлении профилей сложной замкнутой конфигурации с малыми радиусами закруглений необходимо учесть растяжение материала и увеличение ширины заготовки от 3 до 8% в зависимости от степени сложности профиля. Расчетная ширина заготовки в настоящее время должна проверяться и корректироваться экспериментальным путем, так как нет достаточно надёжного аппарата теоретического обоснования расчётов, а наиболее сложной задачей является построение профилей деформирующего инструмента для различных последовательностей изготовления профилей различного типа (рис. 28).

Анализ показал, что основные принципы построения переходов и методы профилирования инструмента можно сформулировать следующим образом:

1. Профиль инструмента должен производить равномерную и наиболее рациональную деформацию материала при наименьшем количестве переходов.

2. Построение и подсчет вертикальных и горизонтальных размеров и рельефа профиля инструмента следует производить от выбранной базовой оси профиля, неизменной для всех переходов. Для симметричного профиля такой осью является ось симметрии.

3. Сечение профиля разбивается на отдельные участки и подсчитывается длина каждого. Суммарная длина участков, находящихся справа и слева от выбранной оси, должна оставаться постоянной для всех переходов.

4. Угол подгиба стенок профиля в каждой паре калибров не должен превышать определенной величины в зависимости от толщины материала: 30–45° – при толщине до 1 мм; 25–35° – при толщине свыше 2,5

мм. Большие значения из указанных применяют для первых пар калибров, а меньшие – для последних, учитывая наклеп металла, полученный в предыдущих проходах. Точные методы расчета допустимых деформаций приведены в специальной литературе.

5. Угол поворота концевых закруглений профиля в одной паре калибров не должен превышать 45° , а если превышает, то необходимо добавить еще один переход.

6. Загиб вертикальных стенок должен выполняться отдельно от изгиба концевых закруглений.

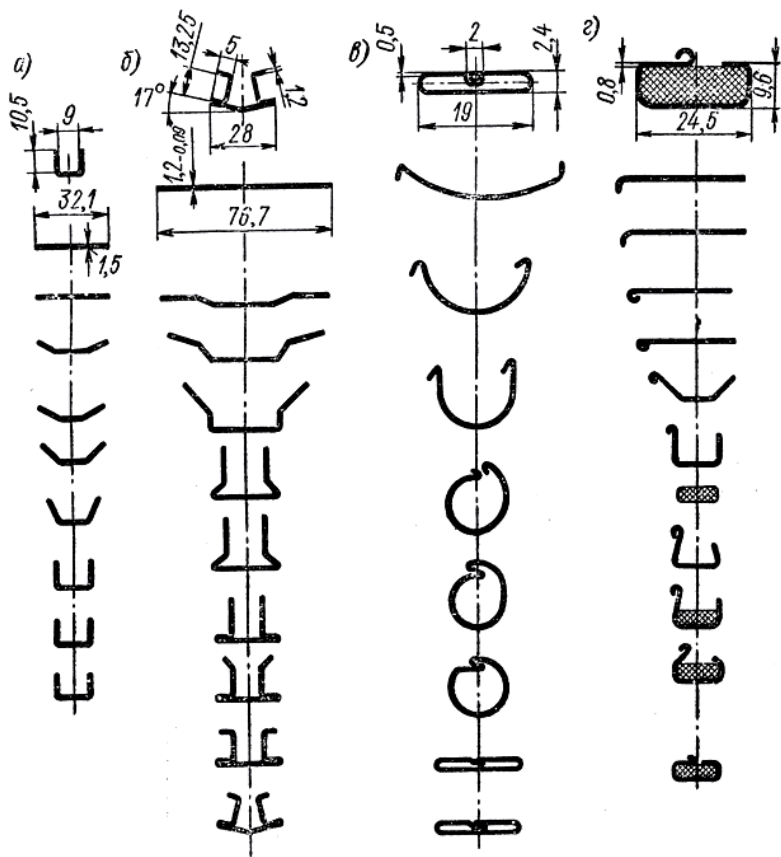


Рис. 28. Последовательность изготовления профилей различного типа: а – открытый; б – полузакрытый; в – закрытый; г – с наполнителем

7. Углы наклона профиля верхнего калибра рекомендуется делать на $1,5-2^\circ$ больше нижнего.

8. Для облегчения перегиба материала при малом внутреннем радиусе изгиба, а также для наметки положения линии изгиба допускается предварительное выдавливание канавок на заготовке с внутренней стороны профиля. Для этого на соответствующем калибре делаются выступы высотой $(0,3 \div 0,4)$ от толщины S . Профиль последней пары калибров должен учитывать упругую деформацию в виде углов пружинения.

10. Для предотвращения осевого смещения профиль калибров рекомендуется делать с бортами, охватывающими борта или выступы сопряженного калибра.

11. Для предотвращения от скручивания или искривления изготовляемого профиля после выхода из калибров должны быть установлены выходные направляющие планки, выпрямляющие профиль при повышенных степенях деформации.

Последовательность изготовления различных профилей приведена на рис. 28. Применение профилировочных роликовых машин в зависимости от толщины заготовок указано в табл. 9.

Таблица 9. Применение профилировочных роликовых машин

| Машины | Материал | Размеры заготовок, мм | | Машины | Материал | Размеры заготовок, мм | |
|---------------|----------|-----------------------|--------|----------------------|----------|-----------------------|---------|
| | | толщина | ширина | | | толщина | ширина |
| Легкого типа | Лента | 0,3 – 0,8 | До 50 | Тяжелого типа | Полосы | До 4,0 | До 350 |
| Среднего типа | Лента | До 2,5 | До 150 | Весьма тяжелого типа | Полосы | До 10,0 | До 1000 |

Особенно актуальной проблемой является исследование напряженно-деформированного состояния для профилирования, главным образом для холоднокатаных лент и листов из мягкой стали, нержавеющей стали и цветных металлов и сплавов, так как производительность профилировочных машин различного типа колеблется в зависимости от размеров и степени сложности профиля и может быть от 15 до 75 м профиля в минуту.

Исследование параметров технологических процессов прокатки может повысить эффективность освоения производства тонкостенных многоребристых панелей из холоднокатаных стальных полос толщиной 1,2–1,8 мм.

На рис. 29 показана последовательность профилирования некоторых типов многоребристых панелей. Цифрами указаны ориентировочные номера клеток профилировочного стана.

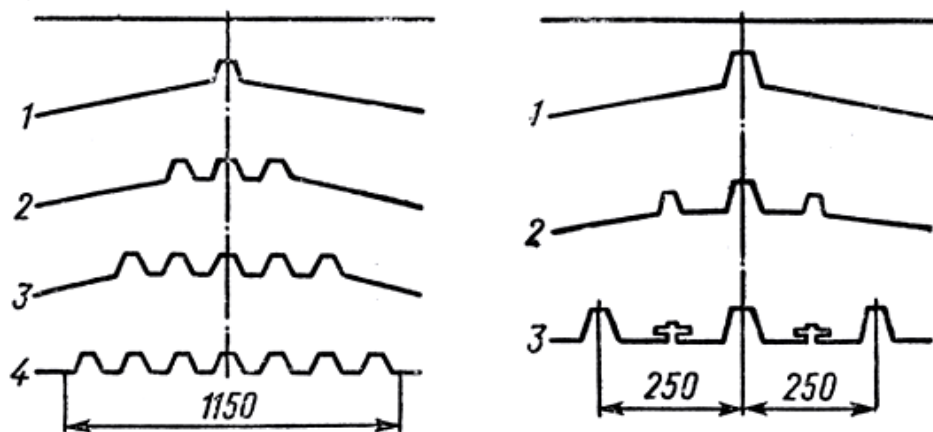


Рис. 29. Последовательность профилирования многоребристых панелей из широкорулонной ленты

Профилирование, как показал анализ прогрессивных технологических процессов, наиболее эффективно производится на специальных многороликовых машинах, когда оно начинается со средних рифтов, а затем постепенно увеличивается количество задействованных роликов на последующих ступенях деформирования. Ширина профилированных панелей составляет от 550 до 1200 мм. Длина панелей по требованию (обычно от 8 до 18 м).

Анализ прогрессивных процессов профилирования показал, что наряду с оптимизацией параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки производительность процессов и повышение качества достигаются также при определенных условиях, например, покрытия рабочей поверхности одного из калибров полиуретаном. При

этом значительно увеличивается общая степень деформации и сокращается количество переходов.

2.6. Выбор оборудования для изготовления профнастила

Выбор конструкции прокатного стана.

В настоящее время значительно расширяется сортамент профнастила и особо актуальным становится вопрос модернизации оборудования для производства профнастила. Данные изделия изготавливаются по технологии холодного проката – это значит, что основным оборудованием является прокатный стан с клетями, в которых и происходит профилирование заготовки. Приводом является электродвигатель, а прокатный стан может работать по двум принципам: последовательно и одновременному. С помощью оборудования второго вида деформация листовой стали начинается с первой клетки. Такой прокатный стан для профнастила производит равномерное профилирование, исключая риск брака по краям изделия.

Основными характеристиками прокатного стана являются потребляемая мощность, вес, габарит и количество рабочих клеток, а также то, что для некоторых видов профнастила существуют специфические модели оборудования, предназначенные только для отдельных конкретных типов профиля.

Прокатный стан (рис. 30) представляет собой сборную конструкцию в виде рамы с установленными на ней рабочими клетями и рабочим инструментом, с помощью которого на гладком металлическом листе формируются гофры до получения требуемой геометрии.

От выбранной схемы профилирования, числа рабочих клеток, конструктивных особенностей прокатного стана и качества его изготовления зависят геометрическая точность и качество произведенной продукции.

Рассмотрим одновременную схему профилирования. Это означает следующее: начиная с первой клетки прокатного стана происходит формирование всех гофр одновременно. В этом случае утяжка металла по всей ширине листа обеспечивается равномерная и одинаковая. Это исключает появление таких дефектов проката как «елочки» по краям профнастила и перекаты (в отличие от последовательной схемыгиба «клином», где прокатывается сначала середина листа, а затем края). Преимуществом одновременной схемы профилирования является и то,

что требуется меньшее число переходов вытяжки и соответственно меньшее число рабочих клеток (в отличие от последовательной схемы), и, как следствие, меньшие габариты стана.



Рис. 30. Прокатный стан

В процессе выбора конструкции прокатного стана необходимо рассматривать и учитывать особенности спроектированного технологического процесса, тщательно проанализировать условия его работы, изучить особенности его конструкции применительно к параметрам процессов. В первую очередь следует оценить основные показатели эффективности его применения в зависимости от технических характеристик (табл. 10)

Конструкция клетки, особенно способ установки и крепления рабочего инструмента (роликов) на валу, в значительной степени определяют качество продукции. Надежным и отработанным способом является установка и фиксация роликов на валу с помощью шпонки с окончательным креплением набора сборки вала с обеих сторон гайками (в отличие от крепления гуженом, когда ролики крепятся к валу винтом).

Таблица 10. Технические характеристики станов холодного профилирования

| Вид профиля | Кол-во клеток | Масса, кг | Габаритные размеры, мм | | | Потребляемая мощность, кВт |
|-----------------|---------------|-----------|------------------------|--------|--------|----------------------------|
| | | | длина | ширина | высота | |
| С-8 | 10 | 5 650 | 7 000 | 1660 | 1200 | 7,5 |
| С-10 | 10 | 5 600 | 7 000 | 1660 | 1200 | 7,5 |
| С-10 | 13 | 6 800 | 8 600 | 1660 | 1290 | 7,5 |
| Н-15 | 18 | 9 700 | 9 870 | 1660 | 1290 | 2 x 4,0 |
| С-18 | 13 | 6 800 | 8 600 | 1660 | 1290 | 7,5 |
| С-18 (волна) | 16 | 9 400 | 9 600 | 1660 | 1290 | 2 x 4,0 |
| МП-20 | 13 | 6 800 | 8 600 | 1660 | 1290 | 7,5 |
| С-21 | 13 | 6 800 | 8 600 | 1660 | 1290 | 7,5 |
| НС-35 | 16 | 12 500 | 10 500 | 1660 | 1290 | 7,5 |
| С-44 | 16 | 12 700 | 10 500 | 1660 | 1290 | 7,5 |
| Н-57 | 20 | 16 000 | 15 500 | 1660 | 2240 | 2 x 7,5 |
| Н-60 | 23 | 17 700 | 16 000 | 1800 | 2240 | 2 x 7,5 |
| Н-75 | 27 | 20 500 | 17 820 | 1800 | 2240 | 2 x 7,5 |
| Н-114 | 36 | 60 000 | 35 000 | 1 660 | 2500 | 4 x 7,5 |
| Н-153 | 44 | 80 000 | 46 000 | 1 660 | 2500 | 8 x 7,5 |

Диаметр вала в оборудовании для изготовления профнастила должен быть не менее 100мм. При таком диаметре гарантируется, что при прокатке валы не будут прогибаться в середине (достаточно прогиба

валков величиной 0,1 мм, чтобы середина профилированного листа визуально казалась недокатанной).

Электропривод прокатного стана – обычный асинхронный электродвигатель или сервопривод. Отличия в производительности: сервопривод позволяет быстрее разгонять стан, что на коротких листах дает выгоду, и быстрее и точнее останавливать (более точное позиционирование перед резом).

Еще одним важным элементом технологического процесса при производстве профнастила является оборудование для резки металла, которое относится к различным видам гильотинных ножниц. От модели такого оборудования также зависит длина конечного вида изделия, которое будет выпускаться. Гильотинные ножницы (рис. 31) находятся в конце прокатного стана и выполняют функцию резки листа по необходимым размерам. Однако при толщинах металла более 2 мм мощности гильотинных ножниц недостаточно, чтобы обрезать несущий профнастил большой толщины, и вместо данного оборудования устанавливают специальные просечные ножницы.

В линии для производства профнастила гильотинные ножницы (табл. 11) находятся в конце прокатного стана, так как сразу после рубки готовый профлист складировать в пачки. Ножевые балки с ножами выполнены в форме прокатываемого профиля и рубят профнастил без заусенцев. Для профлиста от Н57 устанавливают просечные ножницы.



Рис. 31. Ножницы гильотины

Таблица 11. Технические характеристики ножниц

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| Установленная мощность, кВт | от 3,0 |
| Длина отрезаемых изделий | по требованию заказчика |
| Габариты, мм | от 440 x 1550 x 1150 |
| Масса, кг | от 750 |

Кроме стана и гильотины в оборудование для производства профнастила должен входить разматыватель рулонов, приемный агрегат и автоматическая система управления. Разматыватель рулонов (рис. 32) должен быть установлен согласно планировке цеха в самом начале производственного цикла, так как заготовка – листовая сталь обычно поставляется в виде рулонов и технологический процесс формообразования начинается с размотки рулонов, устанавливаемых на приводных разматывающих устройствах для подачи на прокатный стан. Из современных устройств размотки (табл. 12) можно выделить те, которые для повышения качества технологического процесса должны быть оборудованы блоком синхронизации работы с прокатным станом. Конструкция разматывающих устройств может быть для удобства эксплуатации и консольного типа.

Важное значение имеет синхронизация скорости работы разматывающих устройств со скоростью прокатки при помощи собственной автоматики и механизма контроля величины компенсационной петли листа.

Система автоматического управления (САУ) прокатным станом (рис. 33) управляет и регулирует все компоненты производственной линии, является счетчиком готовых изделий, устраняет скачки электрического напряжения, повышает точность мерной резки готового проката и др., что обеспечивает качество и скорость изготовления профнастила.

САУ предназначена для автоматизации процесса прокатки с возможностью управления скоростью прокатки, количеством – длиной профилей, контролем пауз технологического цикла, отслеживания аварийных ситуаций (рис. 34). Автоматика обеспечивает плавный пуск-стоп линии, т.е. запуск линии без пробуксовки и отсутствия резких натяжений цепей. Кроме того, автоматическое управление избавляет от влияния человеческого фактора на производственный процесс, что увеличивает производительность и повышает точность и качество продукции.



Рис. 32. Разматывающие устройства для рулонов

Таблица 12. Технические характеристики размотчика рулона

| | |
|---|--------------------|
| Установленная мощность | 5,5 кВт |
| Габариты размотывателя (LxВxН), мм | 2480 x 1730 x 1830 |
| Грузоподъемность, кг | до 10 000 |
| Мах. ширина рулона, мм | 1 270 |
| Внутренний диаметр рулона (min/max), мм | 500/600 |
| Наружный диаметр рулона, мм | 1 500 |
| Толщина металла в рулоне, мм | 0,3...2.0 |



Рис. 33. Система автоматического управления прокатным станом

Также прокатный стан (табл. 13) комплектуется приемным устройством (рис. 35), назначение которого - прием готовых листов профнастила и складирование их в пачки для последующей упаковки. Существует два вида приемных устройств – устройство с откатной тележкой и автоматический штабеллер.

Автоматический укладчик управляется САУ и после мерной резки готового профлиста изделия складываются в пачку. Когда пачка окончательно сформирована, по команде оператора с пульта управления она выкатывается в сторону для упаковки и отгрузки.

Так как формообразование производится на автоматической линии, то длина листа в рулоне для проектируемой схемы прокатки достигает порядка 1100 м и может изменяться согласно схеме поставки.



Рис. 34. Оборудование для производства профнастила



Рис. 35. Приемное устройство

Компоновка оборудования в линию показана на рис. 36.

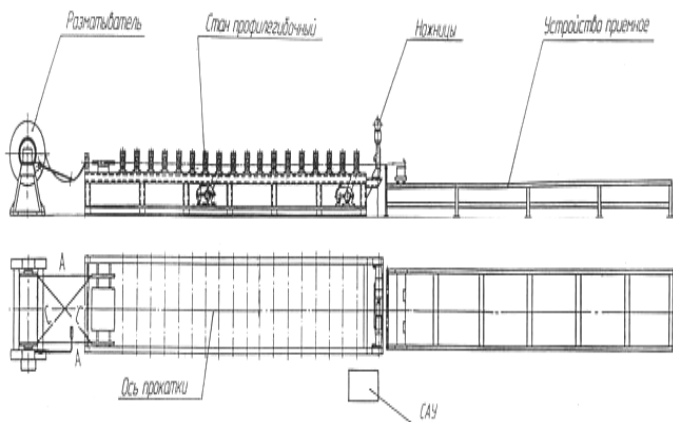


Рис. 36. Компоненка оборудования в линию прокатного стана

Таблица 13. **Общие технические характеристики прокатного стана**

| | |
|--|---|
| Скорость прокатки, м/мин | до 30 |
| Производительность линии с учетом реза, м/мин | до 20 |
| Длина изготавливаемых листов профнастила, мм | 14 000 |
| Обрабатываемый материал: - рулонная оцинкованная сталь ХП по ГОСТ 14918-80; - рулонная оцинкованная сталь с защитно-декоративным покрытием по ГОСТ 30246-94. | |
| Ширина ленты, мм | 1 250 |
| Толщина металла, мм | 0,45...1,20 (в зависимости от вида профиля) |

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

3.1. Способы профилирования листового материала

Профилирование листового материала технологически в зависимости от формы получаемых изделий можно отнести к операциям вытяжки и гибки. Оно не принадлежит к чисто штамповочным операциям, а является обособленным способом производства. Этим способом изготавливают тонкостенные, легкие по массе, но жесткие профили весьма сложной конфигурации и большей длины.

Профили небольших размеров из тонкого металла в настоящее время изготавливают путем профилирования ленты или полосы. Изготовление несложных профилей можно также производить в штампах, длина которых меньше длины профиля. Широкие профили из тонкого листового или полосового металла целесообразно изготавливать на универсально-гибочных машинах, а крупные профили из толстого полосового или листового металла – на специальных листогибочных прессах.

Сущность процесса профилирования в валках (роликах) на профилирующих станах заключается в последовательном изменении формы поперечного сечения заготовки (металлическая лента, штрипс) при прохождении ее через ряд последовательно установленных, с различным профилем рабочей поверхности, вращающихся навстречу друг другу соответствующих по переходам пар калибров, валков (роликов).

Схема реализации процесса профилирования представлена на рис. 37.

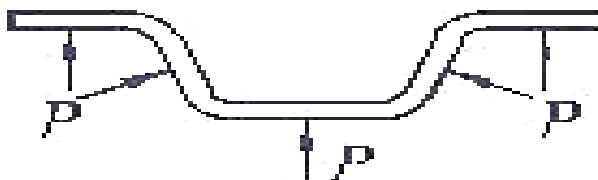


Рис. 37. Схема реализации процесса профилирования

Традиционное профилирование предусматривает малые углы подгибки за переход, что способствует наилучшему сохранению покрытия.

При профилировании получение профиля со сложной формой сечения обеспечивается в результате постепенной подгибки заготовки в каждой паре валков. Процесс подгибки протекает не сразу в каждой паре валков, а постепенно, на некотором участке плавного перехода – очаге деформации, находящемся перед валками (рис. 38).

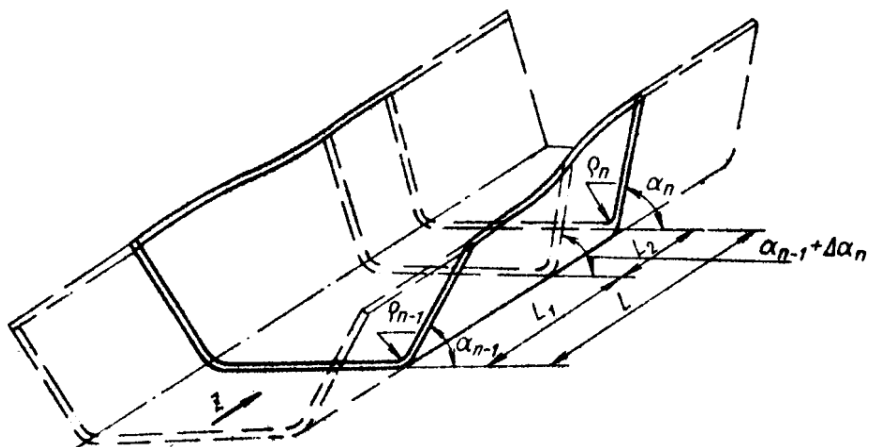


Рис. 38. Расчётная схема для текущего перехода формообразования при профилировании заготовки в промежуточной клетки стана

При входе полосы в калибр кромка ее переднего концевой участка соприкасается с нижним валком и несколько поднимается. В полосе возникают незначительные по величине упругие напряжения. После встречи переднего конца стенки формуемого швеллера с верхним валком начинается подгибка полок, т.е. процесс формоизменения и образования очага деформации перед осевой плоскостью валков. Полки, плоские до начала формоизменения, продольно искривляются, оставаясь прямыми в поперечных сечениях, и принимают, таким образом, форму сложной линейчатой поверхности.

Форма поперечного сечения полосы изменяется, приближаясь к конфигурации, определяемой калибром валков. Одновременно с формоизменением полок происходит образование мест изгиба (вытяжки), в которых металл последовательно подвергается упругой и упруго - пластической деформации. С увеличением суммарного угла подгибки полок уменьшается радиус закругления и возрастают нормальные тангенциальные напряжения в зонах деформации. По мере продвижения

полосы между валками длина образовавшегося перед осевой плоскостью валков очага деформации увеличивается.

При дальнейшем продвижении полосы формируется поверхность полок под воздействием усилий деформации, передаваемых на заготовку от рабочих поверхностей калибров по мере соприкосновения их с заготовкой. Длина очага деформации перед осевой плоскостью валков в дальнейшем остается неизменной. Однако момент внутренних сил, возникающих на участке деформации в местах плавного перехода элементов формируемого рельефа, не уравнивает момент внешних сил, приложенных к полосе со стороны валков. Поэтому за осевой плоскостью валков деформация полок продолжается, угол подгибки увеличивается до тех пор, пока момент нормальных тангенциальных напряжений в месте изгиба не уравнивает момент внешних сил. На этом процесс образования первой зоны участка плавного перехода, в которой наблюдается рост угла подгибки, заканчивается. При дальнейшем движении полосы длина очага деформации за осевой плоскостью валков увеличивается, а угол подгибки уменьшается. При этом образуется вторая зона участка плавного перехода. Здесь происходит упругая разгрузка мест изгиба. Формоизменение конца полосы также носит упруго-пластический характер.

Угол подгибки вдоль участка плавного перехода и форма полосы на этом участке определяются местоположением рассматриваемых сечений, что теоретически представлено на рис. 39.

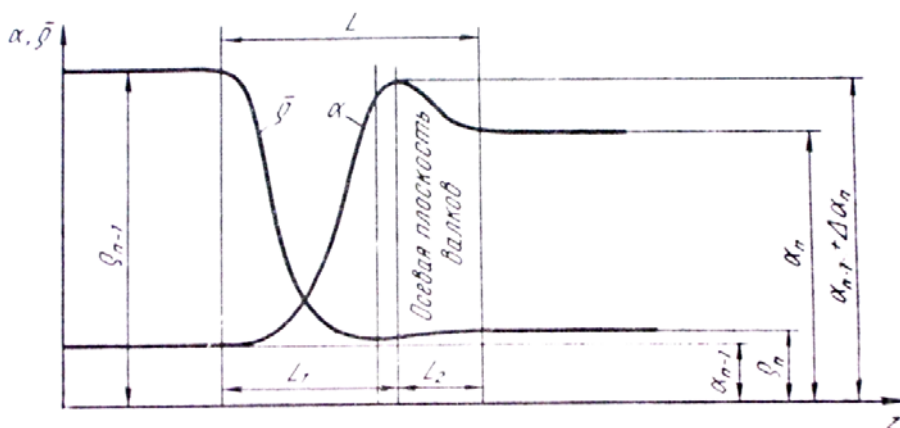


Рис. 39. Графики изменения угла подгибки α и относительного радиуса изгиба ρ [1]

3.2. Профилирование с применением метода стеснённого изгиба

Метод стеснённого изгиба заключается в осадке волнообразной заготовки с утолщением металла в зоне сгиба. Схема реализации процесса получения профилей методом стеснённого изгиба представлена на рис. 40.

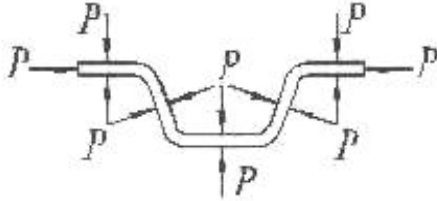


Рис. 40. Схема реализации процесса получения профилей методом стеснённого изгиба

Метод разработан для материалов, применяемых в авиационных конструкциях, и содержит 2-4 перехода для профилей типа швеллер и Z-образный. Стесненный изгиб характеризуется тем, что в процессе гибки к листовой заготовке прикладываются дополнительные силы сжатия в тангенциальном, радиальном и аксиальном направлениях. В отличие от обычной гибки (традиционного профилирования), при котором нейтральный слой смещается в сторону внутреннего контура, под действием дополнительных сил сжатия в зоне сгиба происходит смещение нейтрального слоя от средней линии в сторону наружного контура. Уменьшение деформаций растяжения снижает растягивающие напряжения и деформации наружного контура, устраняет опасность его разрушения при гибке с малыми относительными радиусами. Схема напряженно-деформированного состояния заготовки при получении профиля методом стеснённого изгиба представлена на рис. 41.

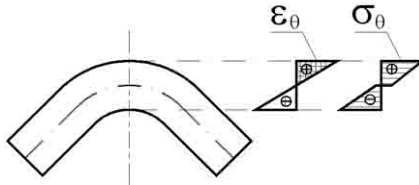


Рис. 41. Схема напряженно-деформированного состояния заготовки при получении профиля методом стеснённого изгиба

Метод стеснённого изгиба позволяет получить радиусы гибки ($r=0,5-2$ мм) меньше предельно допустимых при обычной гибке.

3.2.1. Методы калибровки профилей

Калибровкой профиля называется технологическая последовательность формообразования деталей, когда система последовательно расположенных калибров с изменяемой геометрией профиля по переходам обеспечивает получение готового профиля заданных размеров. Готовый профиль получают за несколько проходов, число которых устанавливают в зависимости от конфигурации профиля и числа деформаций металла. Для придания профилю калибра необходимой формы в валках изготавливаются специальные рабочие формообразующие поверхности необходимой конфигурации, размеры которых определяются схемой калибровки валков по переходам (рис. 42).

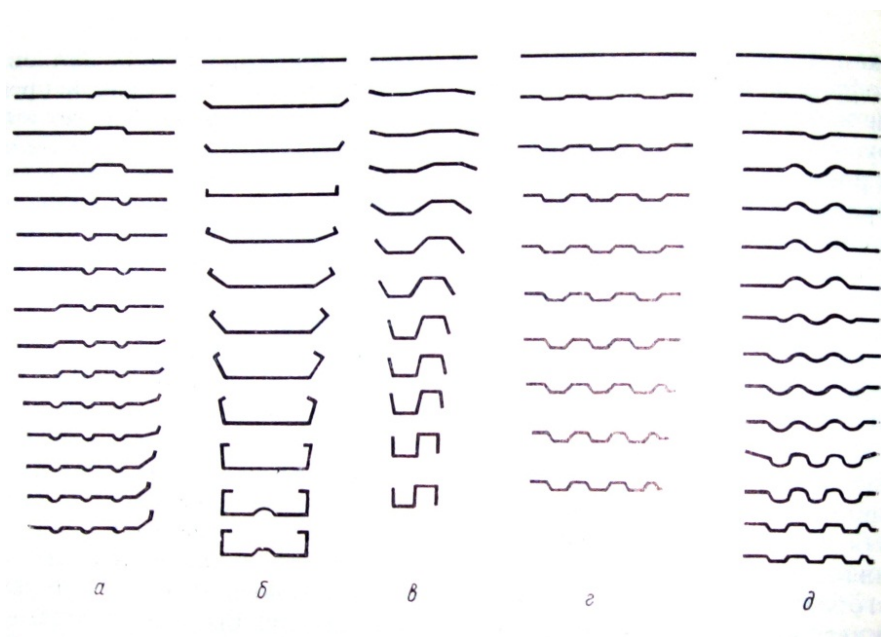


Рис. 42. Типы калибровок валков для различных изделий

Существуют следующие типы калибровок валков:

1. Последовательная калибровка валков, предусматривающая подгибку профиля последовательно по участкам, начиная от оси профиля, с последующей подгибкой периферийных участков (рис. 42, а).

2. Последовательная калибровка валков, при которой подгибка профиля начинается на крайних участках заготовки, а затем последовательно приближается к середине (рис. 42, б).

3. Калибровка валков по одновременной схеме деформации, при которой профилирование проводится путем одновременной подгибки всех элементов профиля (рис. 42, в).

4. Комбинированная калибровка валков, при которой профилирование заготовки начинается с постепенного изгиба всех или некоторых характерных участков заготовки с последующей деформацией отдельно каждого участка профиля (рис. 42, г).

5. Калибровка с осадкой волнистой заготовки, при которой первоначально путем изгиба образуются участки профиля с волнообразными гофрами, а в последующих клетях им придают необходимую форму изгибом и сжатием (рис. 42, д).

6. Последовательная калибровка с подгибкой профиля от оси к периферии предусматривает подгибку профиля последовательно по участкам, начиная формирование профиля с середины полосы с последующим профилированием периферийных участков.

Для теоретического обоснования схем формообразования соответственно можно определить три метода расчета схем калибровки гнутых профилей:

– Первый и второй методы, которые характеризуются деформацией заготовки по кривой постоянного радиуса, равного радиусу внутреннего закругления готового профиля; первый – от периферии к центру (рис. 43, а), второй – от центра к периферии (рис. 43, б).

– Третий метод (рис. 43, в) характеризуется постепенным уменьшением изгиба до радиуса внутреннего закругления готового профиля [1].

При расчете по первому методу изгибаемый прямолинейный участок k суммируется с горизонтальным участком полосы, а затем в каждом проходе изгибается участок, соответствующий углу подгибки в этом проходе. Длину участка закругления (длину дуги) определяют по формуле:

$$L_i = \pi \cdot \rho \cdot \alpha_i / 180,$$

где α_i – суммарный угол для данного прохода, образуемый между участками профиля при его подгибке, град; ρ – радиус закругления по ней-

тральной линии, мм. При этом длина k_i участка, который предстоит деформировать в последующих клетях по переходам, равна $k_i = L_2 - L_1$. Из рис. 43 видно, что участки k уменьшаются с увеличением угла подгибки. В последнем проходе $k_i = 0$, т.е. весь прямой участок превратился в дугу. Участок k при расчете ширины калибра нижнего и верхнего валков добавляют с двух сторон к горизонтальному участку, размеры которого в процессе профилирования не изменяются.

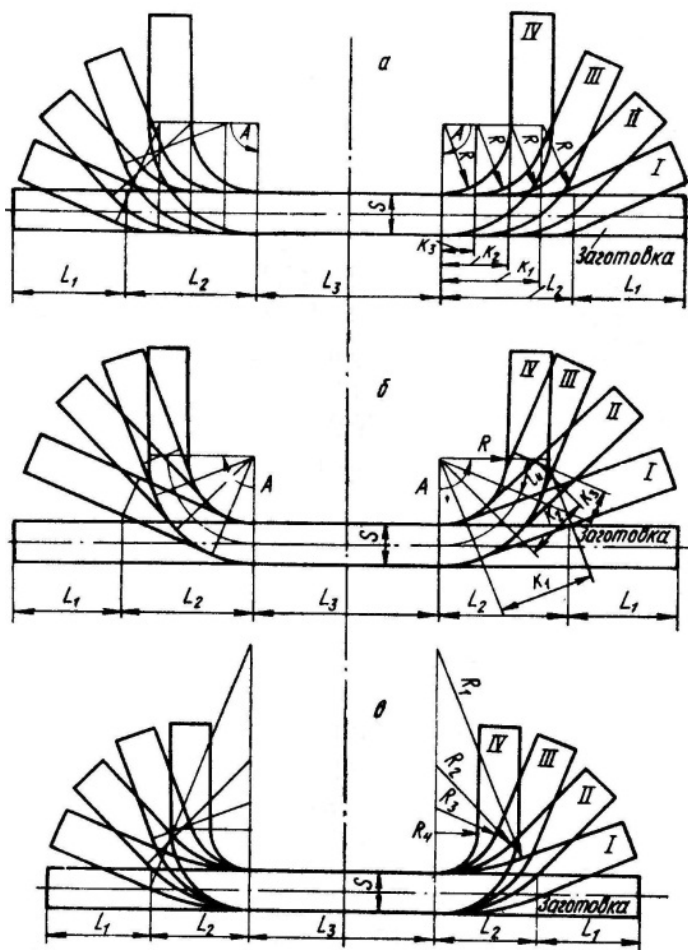


Рис. 43. Методики расчета калибровки гнутых профилей (I-IV —последовательность процесса)

Второй метод предусматривает изгиб прямолинейного участка k в процессе профилирования. Следовательно с увеличением угла подгибки размеры участка k уменьшаются. Прямолинейный участок полки профиля L_1 в процессе профилирования не изменяется. Длины участков k прибавляются к длине прямолинейного участка L_1 при расчете наклонной части калибра нижнего валка. Прямолинейный участок заготовки L_2 в процессе профилирования по третьему методу превращается в кривую заданного радиуса R_4 в результате постепенного увеличения кривизны всего участка L_2 .

Радиусы внутреннего закругления профиля в промежуточном проходе i можно определить по формуле:

$$R_i = (L_2 \cdot 180) / (\pi \cdot \alpha_i) - xs,$$

где L_2 – длина изгибаемого участка, которая во всех проходах остается постоянной, мм; α_i – суммарный угол подгибки в данном проходе, град; s – толщина заготовки, мм; x – коэффициент нейтрального слоя, зависящий от соотношения r/s (относительного радиуса); r – внутренний радиус закругления в месте изгиба, мм.

Выбранная методика расчета калибровки предполагает одинаковый радиус изгиба во всех проходах.

Суммарным углом подгибки α_c считается центральный угол, образованный соответственно пересекающимися криволинейными элементами формируемого профиля. Угол подгибки $\Delta\alpha_n$ в данном текущем пропуске по клетям равен разности суммарных углов в рассматриваемом α_n и предшествующем α_{n-1} пропуске (рис. 44).

С увеличением угла подгибки за проход значения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) металла профиля возрастают и при достижении определенных значений в местах изгиба металл значительно утоняется, а вдоль кромок профиля возникают гофры.

В связи с этим необходимо уточнять оптимальные режимы формовки на основе расчётов параметров напряженно-деформированного состояния заготовки и механических свойств металла, размеров заготовки и текущих элементов формируемого по переходам профиля, системы калибровки валков и технологического процесса профилирования (непрерывного или поштучного).

При непрерывном процессе профилирования можно применять более жесткие режимы деформации, чем при поштучном, и, следовательно, уменьшить число рабочих клетей. Объясняется это тем, что при поштучном профилировании при относительно больших углах подгибки за пропуск не обеспечивается надежный вход заготовки в валки.

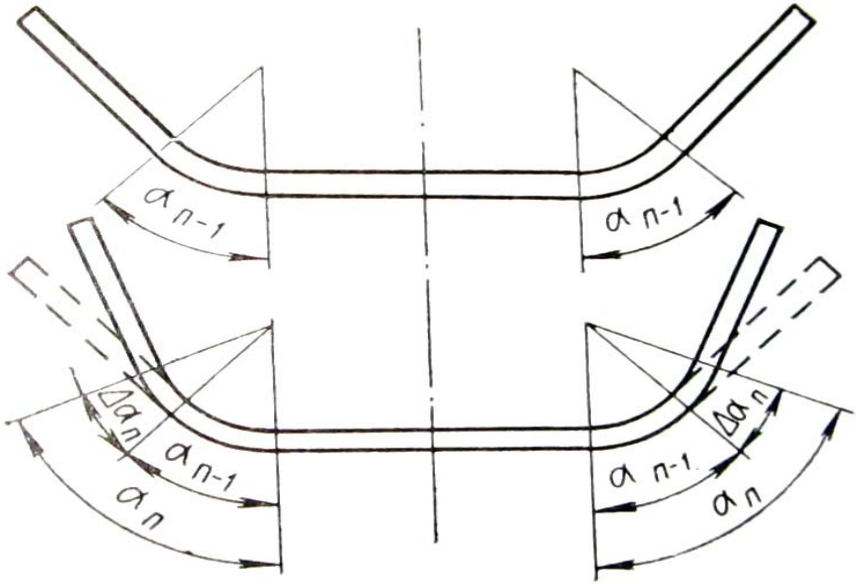


Рис.44. Схема последовательного формообразования (подгибки) элементов профиля

В связи с этим для предупреждения возникающих при жестких режимах формовки дефектов (в виде смятия элементов профиля и др.) максимально допустимые углы подгибки по проходам при профилировании отдельных заготовок следует на основании расчётов НДС заготовки уменьшать (табл. 14).

Таблица 14. Рекомендуемые углы подгибки за один проход [1]

| Клеть | Угол подгибки, град, при непрерывном профилировании |
|---------------|---|
| Первые | 16 |
| Промежуточные | 15-17 |
| Последние | 3-10 |

Критический относительный внутренний радиус изгиба можно определить по предложенной в работе [4] формуле:

$$r_{\bar{e}} = \frac{\bar{a}^{\Delta S/S_0} (1-\psi)^{0,865} - 0,5}{1 - \bar{a}^{\Delta S/S_0} (1-\psi)^{0,865}},$$

где ψ – относительное поперечное сужение; S_0 – начальная толщина металла, мм; ΔS – максимальное утонение, мм.

$$\Delta S = 0,06 \cdot S_0 \sqrt{b\varphi^{2/3}} r_a e_i,$$

где b – ширина подгибаемого элемента, мм; φ – угол изгиба, рад; r_a – относительный внутренний радиус; e_i – интенсивность деформаций в наружном поверхностном слое.

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\ln \frac{R_i}{R_{nc}} + \frac{\Delta S}{S_0} \right),$$

R_i – текущий радиус наружного слоя, мм; R_{nc} – радиус нейтрального слоя, мм.

3.3. Разработка технологии изготовления профнастила

3.3.1. Конструктивно-технологический анализ изделия

Поперечное сечение изделия показано на рис. 45.

Профнастил имеет гладкие внутренние и наружные поверхности, постоянные по длине сечения. Панель имеет оцинкованную поверхность для стойкости против атмосферной коррозии. Контролю размеров и допусков на размеры подвергается каждая панель. Геометрия панели определена стандартами – сортаментами, а также специальными стандартами (включающими сортмент, технические условия и чертежи), согласованными между поставщиком и потребителем.

Поверхность профнастила должна быть чистой. Трещины, расслоения, неметаллические включения, коррозионные пятна и следы серниды недопустимы.

Макроструктуру по условиям техпроцесса изготовления следует проверять у 5 % деталей от партии, но не менее чем у двух панелей.

Микроструктура профиля не должна иметь следов пережога и окисления.

Допустимая величина зазора между поверхностью панели и измерительной линейкой, наложенной на любую поверхность плоскости па-

нели в поперечном направлении от 0,1 до 0,2 мм в зависимости от ширины гофры.

Поверхность панели проверяется визуально без применения специальных увеличительных приборов, размеры измеряют инструментом, обеспечивающим заданную точность.

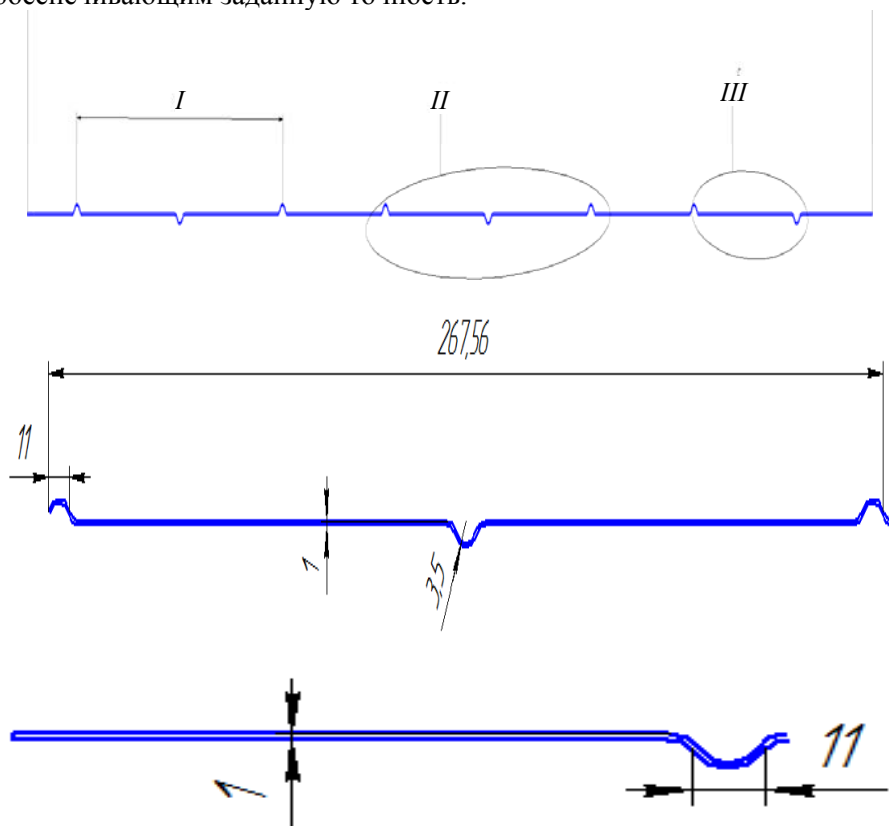


Рис. 45. Элементы формируемого профиля изготавливаемого профнастила:
I, II, III

Регламентируются также параметры: отклонения по волнистости полок и стенок не должны быть более 0,4 мм, по шагу волны - не более 0,2 мм. При значении волнистости до 0,2 мм включительно шаг не лимитируется.

Цинковое покрытие наносят на холоднокатаный или горячекатаный с травлёной и подготовленной поверхностью прокат способом по-

гружения его в цинковый расплав при заданной температуре. Химический состав расплава определяется изготовителем, может быть согласован с потребителем, но при условии содержания в нем цинка не менее 99 %.

Поверхность оцинкованного проката должна представлять собой сплошной слой цинкового или железоцинкового покрытия.

Не допускаются нарушения сплошности покрытия в виде растрескивания на мелких наплывах, расположенных на дефектах стальной основы.

3.3.2. Разработка технологии формообразования заготовок

Для производства данного вида профнастила используем следующую технологическую схему производства:

- 1) входной контроль рулона;
- 2) размотка рулона;
- 3) профилирование в валках;
- 4) резка в меру;
- 5) контроль качества и упаковка.

3.3.3. Выбор заготовки и расчет переходов профилирования

В качестве заготовки используем оцинкованный лист из стали 08кп толщиной 1 мм, состояние поставки листа – отожженное, лист смотан в рулон.

Возможны два типа калибровки заготовки: с последовательного на параллельный или с последовательного на комбинированный. Рассмотрим оба этих варианта.

Производим расчёт количества переходов по существующей методике. В нашем случае рельеф формируется за 4 перехода.

Для калибровки данного профиля используем комбинированный метод.

При комбинированном типе калибровки и с учётом изменения углов подгибки поперечные сечения профиля по переходам будут иметь вид, представленный на рис. 46.

Для примера ниже приведены расчеты валков для III прохода. Валки для IV и V проходов рассчитываются аналогично.

Сначала рассчитаем геометрические размеры самого профиля (рис. 47).

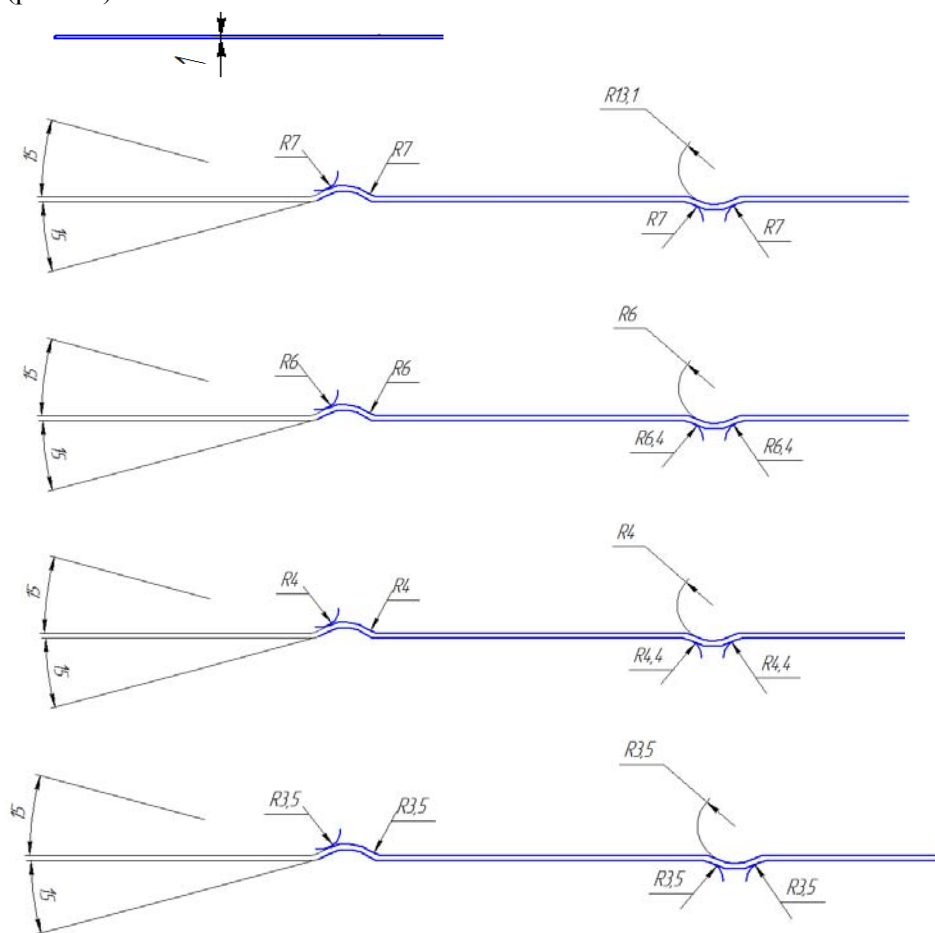


Рис. 46. Общий вид поперечных сечений профиля по переходам в разработанной расчётной схеме его калибровки

Так как профиль является симметричным, то возможно рассматривать только одну его гофру. Все расчёты будут иметь место и для другой стороны профиля и других гофр.

Для определения размера A , B и C необходимо знать размер параметр Δk_i для данного перехода. Уменьшением размеров A , B и C компенсируется увеличение длин дуг L_1 и L_2 при увеличении центрального угла, образующего эти дуги. Δk_i для L_1 распределяется поровну между участками A и B и уменьшает величину каждого из них на $\frac{\Delta k_i}{2}$. Участок C уменьшается за счёт увеличения длины дуг L_1 и L_2 .

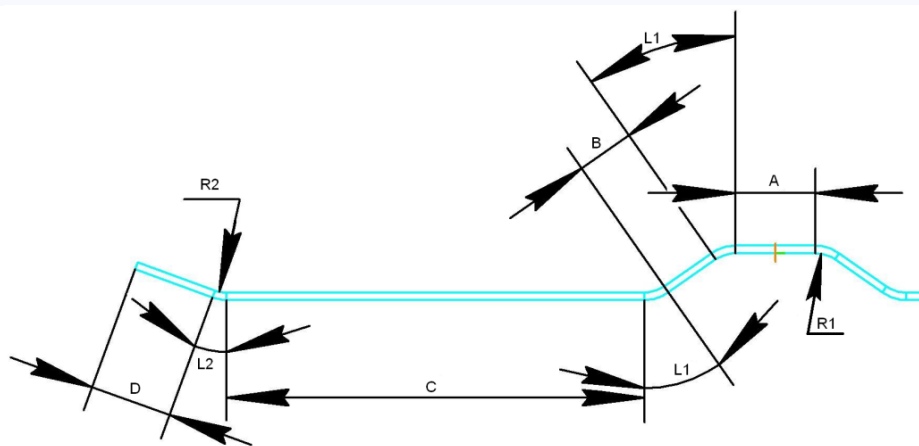


Рис. 47. Схема к определению размеров поперечного сечения профиля

На рис. 48 показано смещение радиусов изгиба при расчете калибровки с постоянным радиусом.

$$\Delta k_i = L_{1i} - L_1(i - 1),$$

где i – номер прохода.

На первом переходе

$$\Delta k_{III} = L_{1III} - L_{1II}.$$

Длина L_i – это длина средней линии i -го участка в месте изгиба. L_i рассчитывается по формуле:

$$L_i = \frac{\pi \cdot \alpha_i \cdot R_i}{180},$$

где α_i – уголгиба на i -м проходе, град; R_i – i -тый радиус кривизны в зоне деформации, мм.

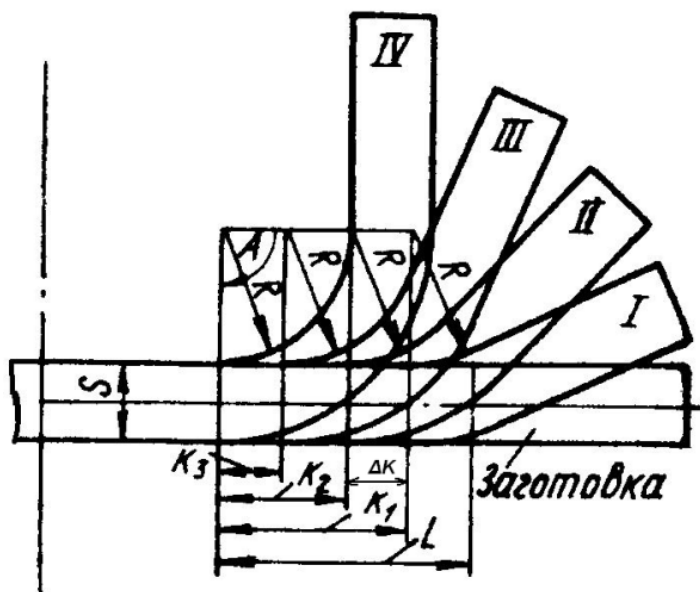


Рис. 48. Схема формообразования со смещением радиусов изгиба при расчете калибровки с постоянным радиусом

R_i во II и III проходах равен сумме радиусагиба R_1 и половине толщины листа $\frac{S}{2}$. Для проектируемого технологического процесса толщина листа $S=1,0$ мм. Радиус кривизны $R_1=5$ мм.

$$L_3 = \frac{\pi \cdot 35 \cdot 5}{180} = 3,05 \text{ мм},$$

$$L_2 = \frac{\pi \cdot 10 \cdot 5}{180} = 0,87 \text{ мм}.$$

3.4. Моделирование и расчет параметров процессов формообразования профнастила на базе программного комплекса DEFORM-2D в условиях автоматизации технологической подготовки производства

Для расчета параметров технологических процессов формообразования заготовок необходимо задать исходные и граничные условия их выполнения. Материал – сталь 08кп, определено четыре перехода деформации, разработан технологический процесс формообразования изделия при построении четырех переходов профилирования при помощи программного продукта DEFORM-2D.

3.4.1. Первый переход формообразования профилей

В первом переходе необходимо построить процесс профилирования заготовки из стального листа 08кп толщиной 1мм в деформирующем инструменте, состоящем из двух стальных валков из стали 9ХС. Для этого была построена расчётная схема наладки инструмента с заготовкой в программном продукте DEFORM-2D, на базе которой производилась деформация заготовки при помощи валков (рис.49).

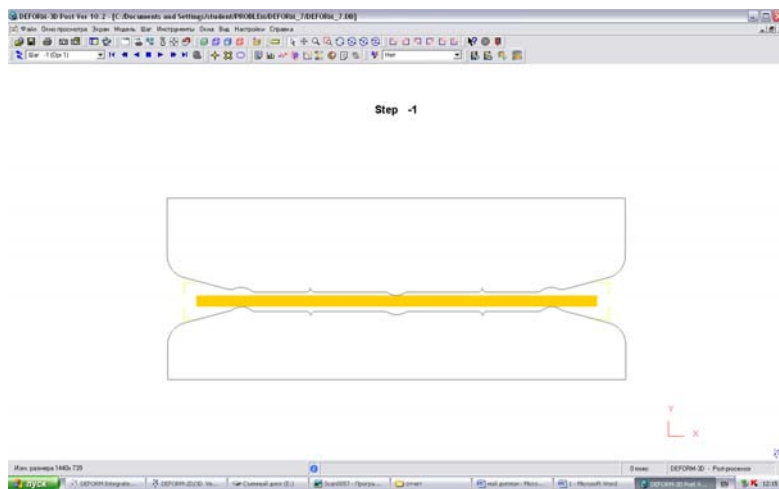


Рис. 49. Расчётная схема: заготовка до деформирования

По результатам расчета деформации по первому переходу были получены следующие величины деформаций в заготовке (рис. 50):

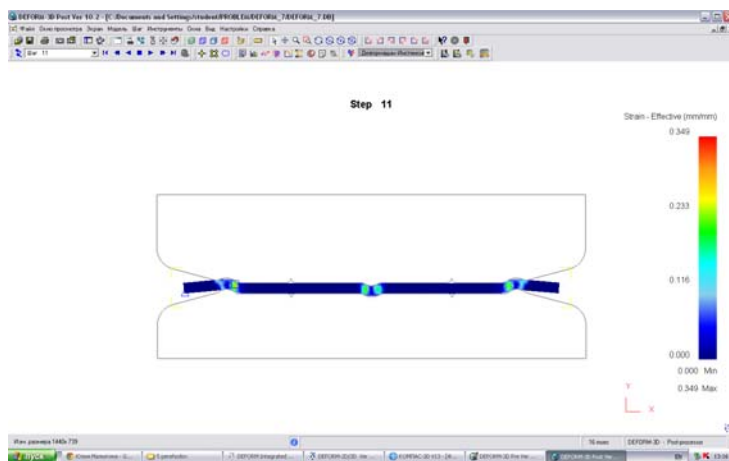


Рис. 50. Величина деформаций по объему и площади заготовки в первом переходе

Соответственно из рис. 51, 52 видно, что в местах углублений в верхнем и нижнем валках величина напряжения достигает больших величин. Это связано с тем, что в конфигурации поверхности валков предусмотрены зоны повышенного сжатия заготовки, необходимые для того, чтобы обеспечить её точную фиксацию на первом переходе.

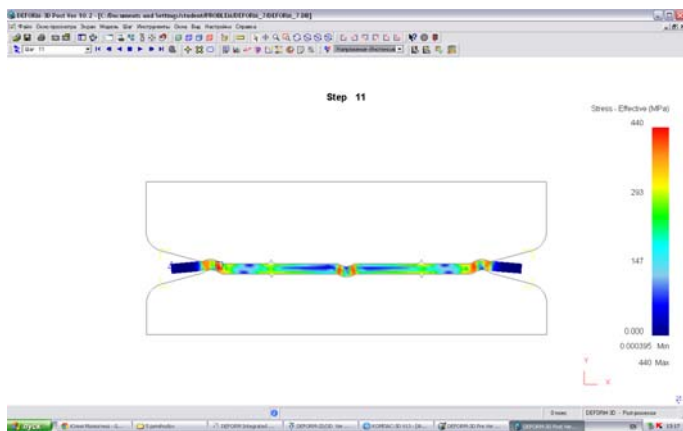


Рис. 51. Величина напряжения в заготовке на первом переходе

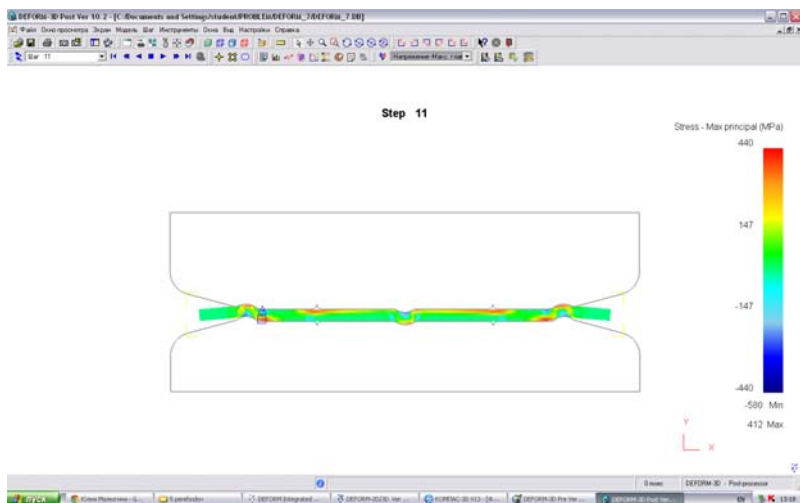


Рис. 52. Зоны максимальных значений напряжений в заготовке

3.4.2. Второй переход формообразования профилей

При расчете второго перехода мы берем заготовку из первого перехода и снижаем радиус выпуклых участков валков на 1 мм, вогнутых – на 5 мм (рис. 53).

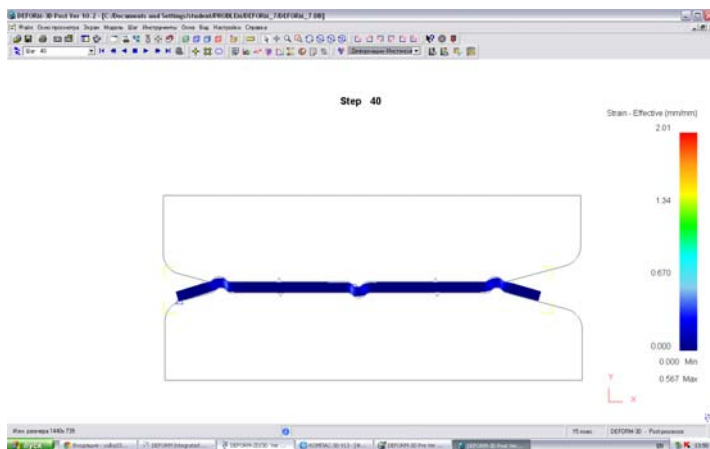


Рис. 53. Величина деформации после второго перехода

Из рис. 54, 55 видно, что напряжения в местах углублений на валках практически снижаются к минимуму. Это связано с тем, что фиксация в этих местах заготовки уже не нужна, так как фиксация теперь происходит в местах изгиба заготовки.

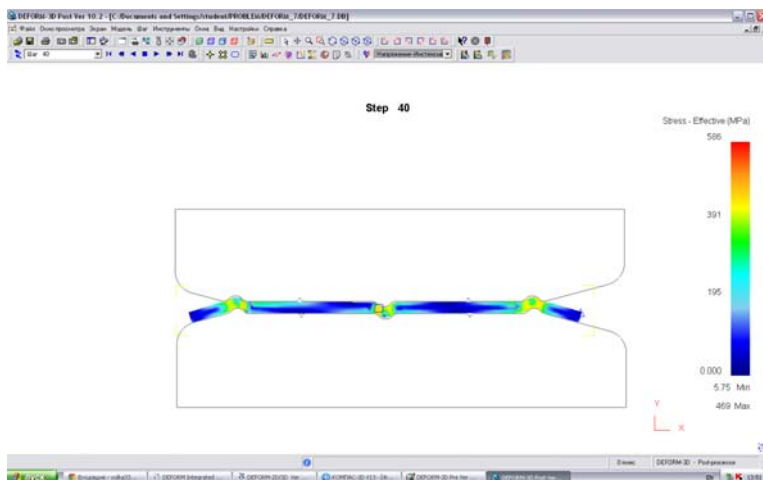


Рис. 54. Величина напряжения после второго перехода

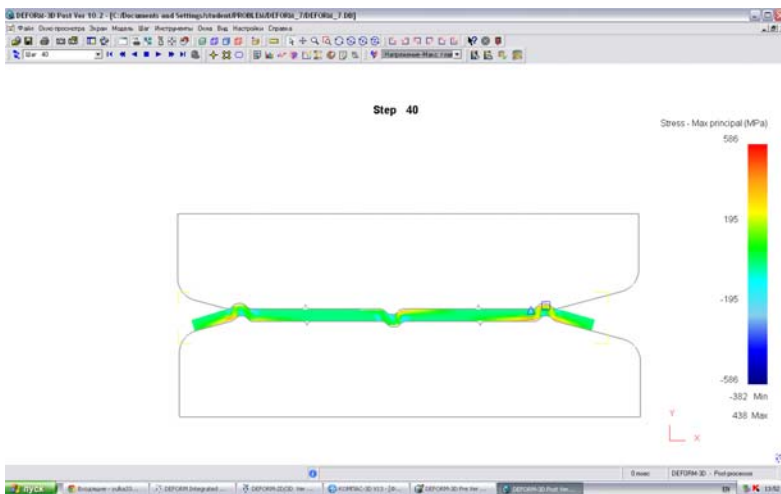


Рис. 55. Величины главного максимального значения напряжения в заготовке после второго перехода

3.4.3. Третий переход формообразования профилей

При расчете параметров третьего перехода мы используем заготовку из второго перехода и также меняем геометрию валков на 2мм (рис. 56–58).

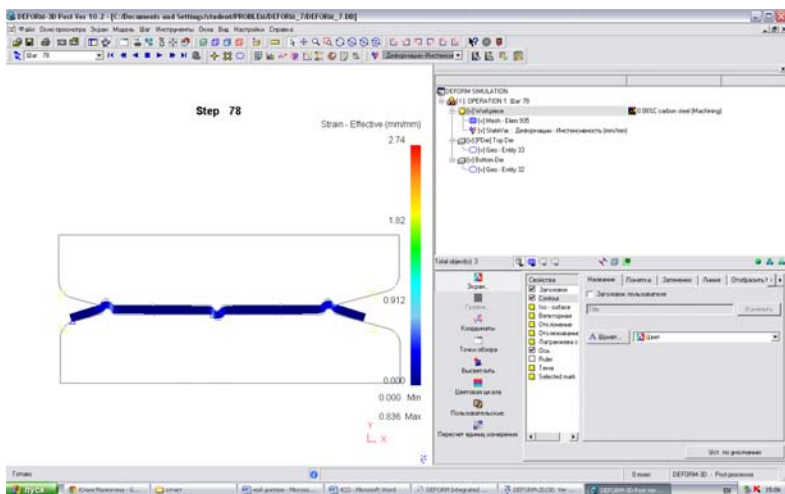


Рис. 56. Величина деформации на третьем переходе

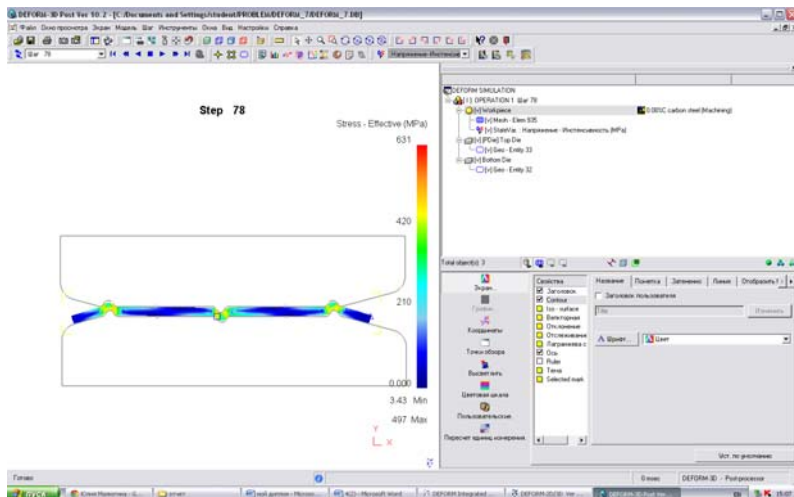


Рис. 57. Величина напряжения на третьем переходе

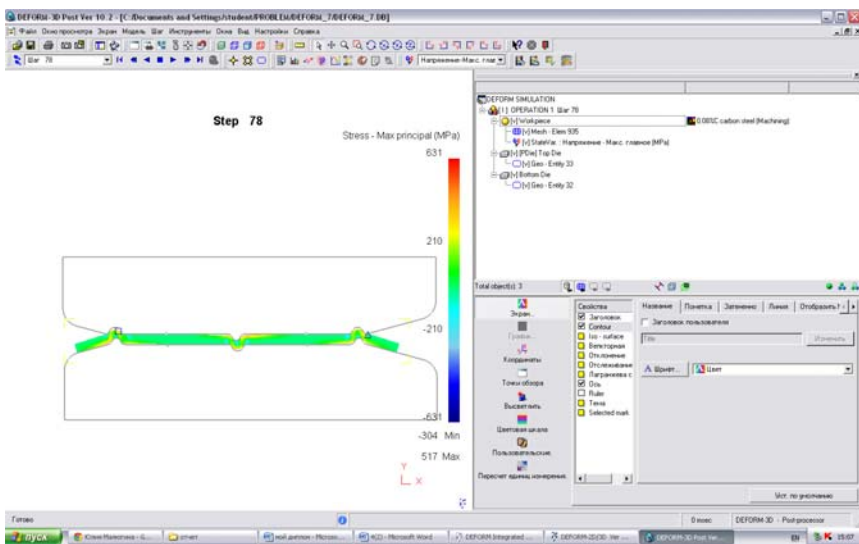


Рис. 58. Величина max главного напряжения на третьем переходе

3.4.4 Четвертый переход формообразования профилей

По аналогии рассчитываем параметры четвертого перехода, геометрия валков изменена в сторону уменьшения на 0,5 мм (рис. 59).

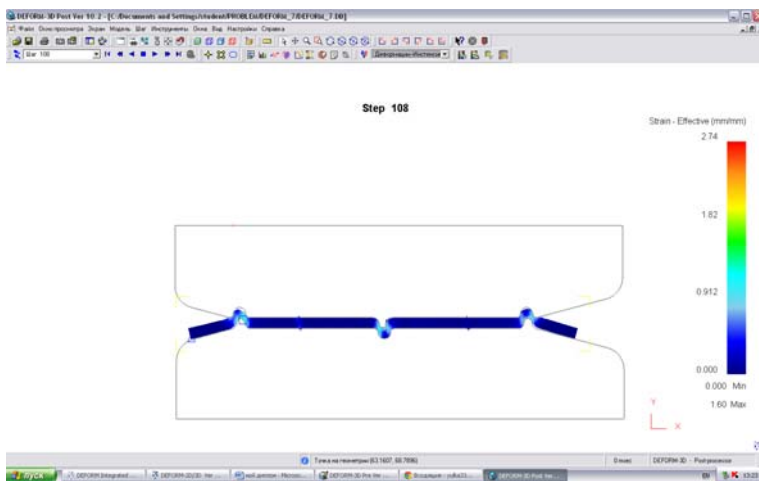


Рис. 59. Величина деформации на четвертом переходе

Из рис. 60, 61 видно, что напряжения в местах углубления достигают больших значений. Это связано с тем, что в этих местах происходит калибровка и правка заготовки, что требует повышения сил её сжатия в валках для точной фиксации для получения точного размера профиля.

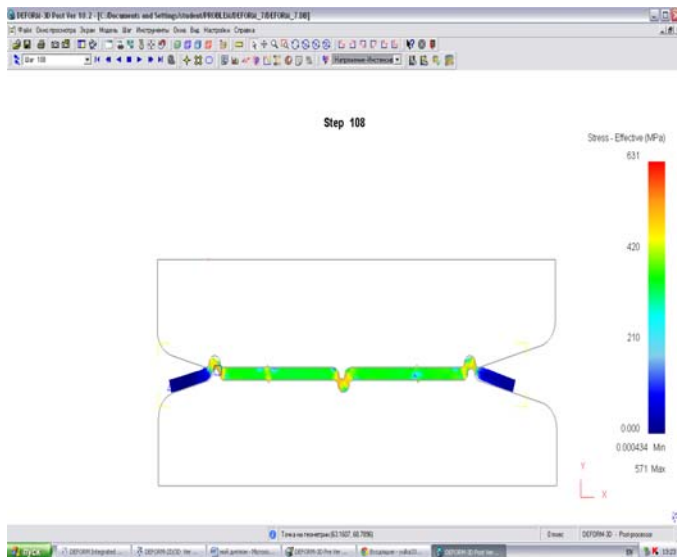


Рис. 60. Величина напряжений на четвертом переходе

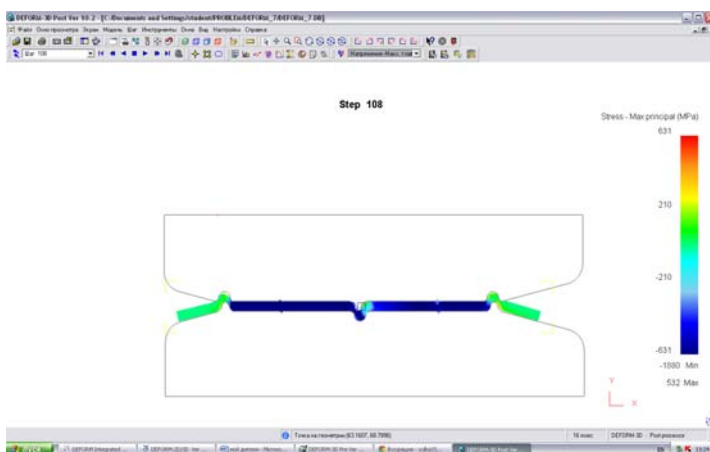


Рис. 61. Величина max главного напряжения на четвертом переходе

3.5. Оценка возможностей программного комплекса DEFORM-2D применительно к целям исследования параметров технологического процесса формообразования профилей

При проектировании технологического процесса было проведено исследование процесса профилирования стального листа с использованием программного комплекса DEFORM-2D.

Программа DEFORM-2D предназначена для моделирования процессов с объёмным напряженным состоянием, таких как ковка, объемная штамповка, волочение, прокатка, прессование и др. На достоверность и качество расчётов параметров технологического процесса оказывает влияние значительное количество факторов, изменяющихся по мере протекания процесса по сложным зависимостям. Несмотря на это, программа DEFORM-2D позволяет проектировать и прогнозировать возможные параметры процессов ОМД при формообразовании листовых заготовок с большой точностью.

DEFORM-2D относится к технологическим CAE-системам (системам инженерных расчетов), предназначенным для работы технологов.

Процесс расчета задачи в программе DEFORM-2D может занимать значительное время, а информация, полученная в результате расчета, обладает высокой достоверностью. Для того, чтобы обеспечить сохранность данной информации и обеспечить удобный и быстрый расчет, программа DEFORM-2D содержит следующие особенности:

1. Условное деление на препроцессор, процессор (решатель) и постпроцессор, что позволяет сделать работу для пользователя наиболее удобной и ускорить расчет.

2. Файл базы данных создается в препроцессоре а после создания содержит всю необходимую для расчета информацию. После осуществления текущего расчета исходный файл дополняется новой информацией, полученной из расчета, после чего он может быть использован для работы в постпроцессоре.

3. Поскольку в файле базы данных информация представляется в виде, удобном для расчета, т.е. таком виде, чтобы решатель мог быстро прочитать этот файл и дописать в него полученную информацию, то файл базы данных имеет большой объём.

4. В DEFORM-2D создан файл с расширением «key», который в компактном виде содержит всю информацию, необходимую для создания базы данных. «Key» файл имеет небольшой объем и удобен для копирования и перемещения. После получения файла его открывают с помощью препроцессора и создают базу данных, которую в дальнейшем используют для расчета.

3.6. Штамповка вытяжкой-отбортовкой сталей группы 08

подавляющее большинство полых осесимметричных деталей с отверстием изготавливаются вытяжкой из плоских заготовок с последующей пробивкой отверстия. Основным недостатком таких технологических процессов – низкий коэффициент использования металла, так как отход, получаемый после пробивки, часто не используется.

Совмещение операций вытяжки и отбортовки при изготовлении полых деталей типа тел вращения с отверстием в донной части позволяет уменьшить число переходов штамповки и значительно снизить расход металла. Деформированию подвергают плоскую заготовку с предварительно пробитым отверстием, размеры которого меньше размеров отверстия в дне готовой детали. Формообразование детали при этом происходит не только за счет течения металла с периферийной части заготовки, но и деформации дна (вытяжки-отбортовки). Это позволяет уменьшить диаметр заготовки и увеличить коэффициент использования металла, а в некоторых случаях – и уменьшить число переходов.

На основе проведенных экспериментов по оценке влияния каждого из пяти выделенных факторов – толщины материала, диаметров заготовки и отверстия, радиусов скругления матрицы и пуансона – на предельное деформирование листового металла установлено два определяющих безразмерных фактора: S_0/d_0 – относительная толщина материала, $d_0/D_{\text{выт}}$ – относительный диаметр пробиваемого отверстия.

Получена математическая модель предельного формоизменения (коэффициент предельного деформирования для группы сталей 08) в виде степенного полинома:

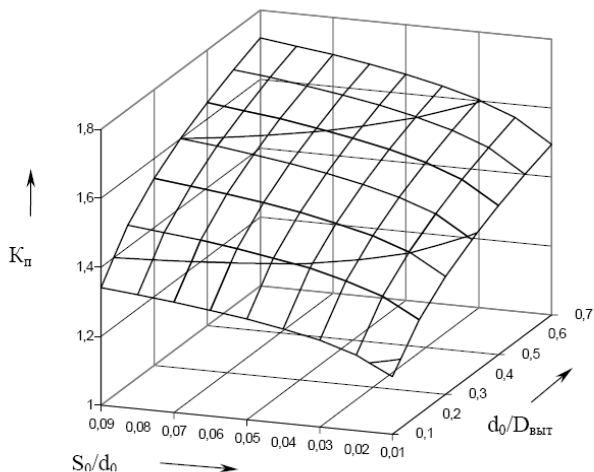


Рис. 62. Влияние относительной толщины материала S_0/d_0 и относительного диаметра пробиваемого отверстия $d_0/D_{\text{выт}}$ на коэффициент предельного деформирования – $K_{\text{п}}$ (группы сталей 08)

$$K_{\text{п}} = 2,096(S_0/d_0)^{0,0635}(d_0/D_{\text{выт}})^{0,1275}$$

Полученные зависимости характеризуют предельные параметры процесса, поэтому для их практического применения коэффициент предельного деформирования $K_{\text{п}}$ необходимо уменьшить на 10-20 %.

По результатам регрессионного анализа построены графики зависимостей коэффициента предельного деформирования $K_{\text{п}}$ от S_0/d_0 и $d_0/D_{\text{выт}}$ для сталей 08кп, 08пс, 08сп и общий – для группы сталей 08 (рис. 62).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубцов, М.Е. Листовая штамповка [Текст] / *М.Е. Зубцов*. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
2. Машиностроительные стали [Текст]: справочник / под ред. В.Н. Журавлева. – М.: Машиностроение, 1981. – 391 с.
3. Попов, Е.А. Основы теории листовой штамповки [Текст] / *Е.А. Попов*. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
4. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / *В.П. Романовский*. – Л.: Машиностроение, 1971. – 782 с.
5. Гуляев, А.П. Metallovedenie [Текст] / *А.П. Гуляев*. – М.: Metallurgiya, 1986. – 544 с.
6. Лахтин, Ю.М. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv [Текст] / *Ю.М. Лахтин*. – М.: Metallurgiya, 1979. – 319 с.
7. Сорокин, В.Г. Марочник сталей и сплавов [Текст] / *В.Г. Сорокин*. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
8. Цветные металлы и сплавы [Текст]: справочник / под ред. Л.П. Лужникова. – М.: Машиностроение, 1967. – 167 с.
9. Колачев, Б.А. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnykh metallorv i spлавов [Текст] / *Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин*. – М.: Машиностроение, 1981. – 416 с.
10. Геллер, Ю.А. Инструментальные стали [Текст] / *Ю.А. Геллер*. – М.: Metallurgiya, 1983. – 527 с.
11. Скворцов, Г.Л. Основы конструирования штампов для холодной штамповки [Текст] / *Г.Л. Скворцов*. – М.: Машиностроение, 1987. – 345 с.

Учебное издание

Глустенко Станислав Федотович

**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
ПРОФИЛИРОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА**

Учебное пособие

Редактор Н.С. Купринова

Электронное издание

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.