

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

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
МОНОЛИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ  
ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ  
И МЕТОДИКА ВЫБОРА СХЕМ ДЕФОРМАЦИЙ  
И РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОВ

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 539(075)  
ББК 30.121я7  
Т495

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

**Глустенко С.Ф.**

**Т495 Технология изготовления монолитных панелей для конструкций летательных аппаратов и методика выбора схем деформаций и расчёта параметров напряженно-деформированного состояния процессов** [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / С.Ф. Глустенко. – Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (1,8 Кбайт). – Самара, 2014. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

**ISBN 978-5-7883-1000-8**

Изложены основные понятия теории, методики и практики формообразования монолитных панелей различной формы и назначения, применяемых для изготовления летательных аппаратов. Приведено обоснование способов выбора различных видов технологических процессов, обеспечивающих получение деталей заданной конструкции и точности. Представлена методика анализа эффективности различных способов деформации заготовок способами и методами гибки, прокатки на копровально-гибочных прессах, дробеструйной обработки и др.

Приведено описание многообразия типов монолитных панелей как сборочных единиц объектов сборки (агрегатов и планера) в зависимости от их конструкции и сложности форм поверхностей и обводов, условий применения. Приведены примеры целенаправленного анализа технологических процессов, методов исследования и оценки технологичности изготовления различных типов монолитных панелей, выбора рекомендаций по их применению. Показаны способы технологического анализа монолитных панелей на этапах проектирования изделия с целью снижения трудоемкости их изготовления.

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 539(075)  
ББК 30.121я7

ISBN 978-5-7883-1000-8

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. Основные виды деталей и классификация технологических процессов их изготовления в зависимости от конструкции .....</b>	<b>6</b>
1.1. Классификация типовых деталей, их геометрические и конструктивные характеристики .....	6
1.2. Технологическая классификация монолитных панелей ЛА по условиям деформации и формообразования.....	11
<b>Глава 2. Теоретические основы и информационная база проектирования технологических процессов формообразования монолитных панелей.....</b>	<b>17</b>
2.1. Методика проектирования технологии изготовления монолитных панелей и выбора схем деформаций по применяемому оборудованию и оснастке .....	17
2.2. Исследование и анализ деформированного состояния заготовок для панелей на этапах механической обработки заготовок .....	20
2.3. Технология и способы формообразования монолитных фрезерованных панелей различной формы и видов.....	23
<b>Глава 3. Методика разработки технологических процессов деформаций заготовок методами свободной гибки и раскаткой роликами .....</b>	<b>29</b>
3.1. Разработка технологических процессов формообразования панелей методом свободной гибки.....	29
3.1.1. Теоретическое обоснование способов выбора расчётных схем для определения технологических параметров свободной гибки .....	30
3.2. Процессы формообразования панелей методом раскатки роликами .....	40
3.2.1. Построение расчётных схем для определения технологических параметров деформации методом раскатки роликами .....	41
3.2.2. Технологические требования к деталям, подвергаемым формообразованию методом раскатки роликами .....	56
3.3. Определение технологических параметров деформации в моделях процессов формообразования дробеструйным методом .....	58
3.3.1. Расчёт степени поверхностной деформации при дробеструйной обработке .....	63
3.3.2. Расчёт силовых параметров дробеструйной обработки .....	65
3.3.3. Методика контроля качества обработки деталей при формообразовании и правке дробеструйным методом .....	67
3.4. Рекомендации по использованию дробеструйного метода формообразования и правки монолитных панелей конструкций ЛА.....	68

<b>Глава 4. Методика разработки и исследования технологических процессов формообразования заготовок монолитных панелей</b>	
<b>методами свободной гибки на опорах .....</b>	<b>70</b>
4.1. Методика выбора минимального радиусагиба для операций свободной гибки на опорах.....	70
4.2. Исследование условий формообразования по получаемым величинам обратного пружинения заготовок .....	72
4.3. Исследование параметров напряженно-деформированного состояния монолитных панелей при формообразовании гибкой с использованием программного комплекса DEORM-2D .....	74
<b>Заключение .....</b>	<b>78</b>
<b>Библиографический список .....</b>	<b>79</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития авиационной техники характеризуется широким применением в конструкциях летательных аппаратов (ЛА) крупногабаритных монолитных панелей, которые обладают рядом преимуществ по сравнению со сборными панелями, состоящими из предварительно обработанных методами холодной штамповки листовых заготовок с установленным на них подкрепляющим силовым набором. Изготовление таких деталей требует специальных технологических решений, строгого соблюдения порядка операций и режимов обработки. Так как любая операция, связанная с упругопластическим деформированием металла, неизбежно приводит к возникновению в деталях остаточных напряжений, то необходимо разрабатывать одновременно и технологические способы компенсации и устранения остаточных деформаций, которые искажают конфигурацию готовой панели и вызывают отклонения от теоретического контура элементов конструкции изделия. Кроме этого, нужно иметь представление о влиянии параметров техпроцесса на погрешности формы и тем самым предъявлять обоснованные требования к режимам исполнения операций, влияющих в наибольшей степени на отклонения от теоретически заданного профиля.

Многообразие типов монолитных панелей, усложнение форм поверхностей агрегатов, выполняемых из них, требуют целенаправленного анализа технологических процессов, методов исследования технологичности изготовления различных типов монолитных панелей, методов выработки рекомендаций по их применению. Технологический анализ монолитных панелей на этапах проектирования изделия связан с большой трудоемкостью, так как требует изучения не только конструкций панелей, но и специального исследования поверхности агрегатов.

Важность и актуальность проблемы изготовления монолитных панелей подтверждается всё возрастающим объемом их применения в производстве авиационной и космической техники, отечественными и зарубежными исследованиями.

# **Глава 1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ДЕТАЛЕЙ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНСТРУКЦИИ**

## **1.1. Классификация типовых деталей, их геометрические и конструктивные характеристики**

Операции формообразования различными способами при изготовлении деталей аэрокосмической техники применяются повсеместно. Все многообразие панелей сгруппировано по классам по различным конструктивно-технологическим признакам. В качестве основы и инструмента классификации принята функция расстояния (сходства), которая определяет степень близости образа к тому или иному классу. Установлено, что при выполнении фрезерных работ основное влияние на остаточные деформации оказывает фактор перераспределения термических остаточных напряжений в заготовках. Возникновение остаточных напряжений от механизма процесса резания незначительно. Таким образом, при оптимально спроектированном технологическом процессе механообработки остаточные деформации панели вносят минимальный вклад в итоговую погрешность формы перед сборкой.

Формообразование геометрического контура монолитной панели выполняется различными методами гибки, прокатки на копировально-гибочных прессах, обработки дробью и др.

Гибка на прессах затруднена в связи с большими размерами изделия. Кроме того, отмечено снижение усталостной прочности изделия после процесса прессования.

Формообразование дробью является наиболее прогрессивным методом, при котором обеспечивается требуемая геометрия и упрочнение поверхностного слоя. Однако эта технология предъявляет высокие требования к параметрам процесса и постоянству режимов обработки. После формообразования крупной дробью осуществляются зачистка отпечатков и последующее упрочнение мелкой дробью, которые также оказывают влияние на конечную форму панели.

Традиционные методы формообразования и правки подкреплённых деталей – гибка на прессах и обработка дробью – не всегда позволяют добиться требуемого результата, прежде всего, в связи с большими габаритными размерами и сложной формой деталей.

Технологические возможности данного процесса могут быть существенно расширены за счет применения методов локального пластического деформирования (гибка на копировально-гибочных прессах, гибка на прессах с варьированием схем нагружения по расстояниям между опорами и различным усилием деформации в сочетании с выбором схем деформации за один переход, раскатка роликами и др.).

Основным содержанием исследований и направлением развития технологии деформации панелей является исследование и аналитическое описание процессов деформирования монолитных фрезерованных механически или получаемых химическим травлением панелей обшивок летательных аппаратов при различных схемах процессов ОМД и видов применяемого оборудования.

В настоящее время широкое распространение получают методы раскатки роликами, но они имеют выраженную специфику применения в основном для деталей типа балки комплексного поперечного сечения (КПС). Требуется совершенствование схем и технологий, позволяющих повысить эффективность проектирования и изготовления инструмента, оборудования, разработки технологий формообразования и правки данного типа деталей.

Решение такой задачи основано на классификации панелей, однако каждый классификатор по количеству классификационных подразделений, характеру и содержанию признаков, степени детализации и т.д. в какой-то степени условен. Одни и те же детали в зависимости от основного назначения по классификатору могут быть исследованы и представлены по-разному.

При изучении главных признаков геометрической классификации определяющим считают тип оболочки, характеризующий пространственную форму поверхности панели. Деление оболочек на однородные группы проводим в зависимости от того, замкнуто или не замкнуто их главное сечение. Это позволяет выделить и исследовать монолитные панели (не имеющие замкнутого сечения) и монолитные отсеки (замкнутого сечения).

Установлено, что определяющим и важным для выбора технологии формообразования признаком является кривизна панели. С учетом этого признака все многообразие монолитных панелей делится на панели одинарной и двойной кривизны.

Исследование технологии изготовления панели одинарной кривизны в изометрической плоскости показало, что они могут быть получены простым изгибом, в отличие от панелей двойной кривизны, которые неизометрические. Однако во многих случаях для деления панелей по признаку

кривизны необходим анализ схемы построения поверхности. Именно анализ схем дает наиболее точную информацию для классификации. Схема построения поверхности характеризуется видом образующей, исходных направляющих сечений, по которым движется образующая, и видом движения образующей по исходным сечениям. В настоящее время геометрический анализ позволяет нам разделить панели в зависимости от схемы их построения на 30 типов – 14 изометрических, 16 неизометрических. Отмечено, что каждая из этих типов панелей имеет свои особенности при формообразовании, но в целом более технологичными являются панели с изометрической поверхностью, так как могут быть получены из плоской заготовки изгибом без вытяжки или посадки одних зон поверхности относительно других.

Дополнительно одним из важных признаков в дополнение к панелям одинарной и двойной кривизны является их деление на панели знакопеременной кривизны.

Таким образом, можно сделать вывод, что панели делятся по форме на панели одинарной кривизны (цилиндрической и конической формы), двойной кривизны и комбинированные.

Одним из методов классификации может быть введение и использование в качестве основной геометрической характеристики понятия полной кривизны, которое основано на утверждении, что полная кривизна равна произведению некоторых главных показателей кривизны. То есть главные кривизны – это кривизны на поверхности в двух ортогональных направлениях. В общем случае направление главных параметров кривизны может не совпадать с направлением ребер жесткости панелей, что необходимо учитывать при выборе направления приложения нагрузок при их формообразовании. На основании этой характеристики и подхода предусматривается деление панелей в зависимости от формы внешней поверхности на следующие виды:

- панели одинарной кривизны (нулевой полной кривизны);
- панели двояковыпуклой формы (положительной полной кривизны);
- панели седловидной формы (отрицательной полной кривизны);
- панели сложной формы, сочетающие в себе участки одинарной и двойной кривизны.

Кроме того, технологичность панели помимо геометрических параметров характеризуется совокупностью конструктивных особенностей. Любая из панелей может иметь полотно и силовой набор различных типов.



В этом случае главными признаками при определении полотна панелей являются: переменность толщины полотна, наличие соединительных законцовок, вырезов, местных жесткостей (площадок), изменяющих степень деформирования на данном участке. Полотно может быть постоянной, плавнопеременной (клиновой), ступенчато-переменной толщины. Оно может быть без законцовки, а также иметь одну или две законцовки.

Для силового набора применяются следующие признаки: вид набора в плане; расположение ребер относительно выпуклости панели; тип поперечного сечения. В плане силовой набор может быть: ребристым (в виде системы параллельных или веерных ребер); вафельным (в виде двух систем ребер, пересекающихся под прямым или косым углом); криволинейным (в виде системы замкнутых или разомкнутых криволинейных ребер); силовой набор может отсутствовать. Расположение ребер относительно образующих поверхности (вдоль, по нормали или под углом) позволяет оценить изгиб и закрутку ребер в процессе формообразования. Например, при формообразовании цилиндрической панели ими будут:

- ребра, расположенные вдоль образующих, остаются прямолинейными при деформации;
- ребра, перпендикулярные к образующим, изгибаются на максимальную величину без закрутки при деформации;
- ребра, расположенные под углом к образующей, изгибаются на величину меньше максимальной и закручиваются при деформации.

По расположению ребер относительно выпуклости полотна возможны варианты расположения с выпуклой или вогнутой стороны. Для исследования панелей, поверхность которых построена на двух прямолинейных или криволинейных и разных знаков (одном выпуклом, а втором вогнутом) направляющих сечениях, такая характеристика не имеет значения.

Таким образом, при рассмотрении панелей по типам поперечного сечения ребра можно установить, что они бывают открытые (в виде пластин), закрытые (Т-образные, Г-образные), замкнутые. Выделенные типы, в свою очередь, могут иметь постоянные или переменные размеры сечения.

По конструктивным особенностям панели делятся на три основных типа (по расположению силового набора в плане, рис. 1):

- вафельные (с продольными и поперечными ребрами жесткости);
- стрингерные (с продольными ребрами жесткости);
- смешанные (вафельно-стрингерные).

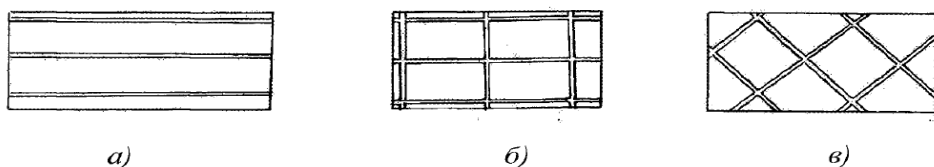


Рис. 1. Силовой набор в плане:  
 а – стрингерный; б – вафельный, в – смешанный

Деление монолитных панелей по типу применяемых для их производства заготовок выглядит следующим образом: в качестве исходных применяют пресованные профили сложного поперечного сечения и горячекатаные плиты, которые находят наибольшее применение.

В силу того, что для каждого технологического процесса изготовления монолитных панелей решающее значение имеют геометрические и конструктивные признаки, классификацию техпроцессов проводим с учетом этих признаков.

Процессы изготовления крупногабаритных монолитных панелей из катаных плит требуют значительной механической обработки. Коэффициент использования материала при изготовлении вафельных панелей обычно колеблется в пределах 8-12 %, а при изготовлении нервюр и лонжеронов не превышает 4-8 %. Основным типом механической обработки является фрезерование, которое в современных условиях проводится чаще всего на станках с ЧПУ. Для обработки на таких станках необходимо применять групповой учет конструктивных признаков, так как панели различной геометрии могут иметь технологическую общность и обрабатываться по одному типовому процессу. Также детали, родственные по геометрии признаков, могут не иметь между собой ничего общего с точки зрения последовательности технологических операций обработки.

Изучение нормативных и методических материалов показало, что первое и основное деление проводят на детали одностороннего и двустороннего оребрения. Других комбинаций расположения конструктивных элементов относительно полотна не существует, поэтому указанные два класса охватывают все 100 % панелей. Именно этот фактор определяет основные отличия в последовательности и качественном составе операций при механообработке.

Следующими признаками анализа данной классификации являются: вид наружного контура; наличие сквозных окон; наличие местных утолщений. Наружный закрытый контур панели подвержен максимальной де-

формации и соответственно имеет максимальные остаточные напряжения. Детали любого вида наружного контура могут иметь определенный набор конструктивных элементов: полотен, полок, ребер, окон, лючков, отверстий. Анализ данных элементов в панелях позволяет учитывать их принадлежность в конструктивном классификаторе, определяющем деформации этих элементов при изготовлении и влияние на общую деформацию детали.

## **1.2. Технологическая классификация монолитных панелей ЛА по условиям деформации и формообразования**

Установлено, что степень деформации панелей при механообработке зависит от схемы базирования, типа и надежности крепежных приспособлений. Базирование заготовки может осуществляться по плоскости и двум базовым отверстиям или по плоскости и двум боковым поверхностям заготовки.

В отраслевом стандарте отмечается недопустимость использования тисков, так как их применение вызывает деформирование заготовки. Для крепежа рекомендуется использовать вакуумный стол или прижимы.

Классификационными признаками по общности состава и последовательности выполнения технологических операций формообразования служат жесткость деталей, величины остаточных напряжений перед обработкой, точность размеров детали. Например, рассмотренные выше вафельные панели, как правило, относятся к маложестким деталям повышенной точности, а величина остаточных напряжений максимально снижается регламентированным растяжением заготовок на металлургических заводах.

Используя проанализированные классификационные признаки, такие как наличие сквозных окон; схему базирования; тип крепления; жесткость детали; степень деформации; трудоемкость обработки; точность обработки; методические материалы, можно обосновать разбивку панелей по признаку одностороннего расположения ребер на 432 типовых представителя. Для деталей с двухсторонним расположением число типовых представителей увеличивается при таком подходе до 1296.

Широкое применение вафельных конструкций панелей представляет ряд проблем для технологий их производства не только на этапах получения исходных заготовок механической обработкой или другими видами обработки, но и при формообразовании контура деталей. Технологичность заготовки снижается за счёт сложной геометрии её формы,

переменной толщины полотна, наличия выступающих элементов контура, больших размеров. Соответственно при формообразовании известными методами, такими как гибка на универсальном и специальном оборудовании, прокатка между валками, дробеструйная обработка, выявляются специфические проблемы и происходит рост трудоемкости изготовления, появляется брак в связи с разрушением и потерей точности.

Анализ процессов деформации показал, что наиболее перспективным методом формообразования крупногабаритных монолитных панелей как одинарной, так и двойной кривизны является формообразование дробью, так как этот процесс позволяет получать панели практически любой сложности и больших габаритных размеров, а также снизить трудоемкость изготовления и повысить точность. Однако применение такого способа требует высокой квалификации персонала и является трудоемким процессом. На основании анализа закономерностей формообразования монолитных панелей для оценки их технологичности по показателю допустимой максимальной деформации можно применять следующий критерий:

$$G = \frac{K}{b^2},$$

где  $K$  – полная площадь кривизны, м<sup>-2</sup>;  
 $b$  – ширина панели, м.

Предлагаемый критерий является косвенным для оценки максимальной деформации, которая определяет возможность создания конкретной формы поверхности панели. Для всего многообразия панелей, изготавливаемых в серийном производстве, большие значения критерия соответствуют большей трудоемкости процессов и сложности их выполнения. Монолитные панели со значениями критерия больше +3 и меньше -3 в конструкции изделия практически не применяются, так как при их формообразовании распространенными в промышленности методами создаются деформации больше предельных норм. В зависимости от значения критерия рекомендованы для анализа следующие схемы формообразования внешней поверхности панели (рис. 2).

В исследуемой методике технологической классификации панелей по критерию технологичности формообразования помимо степени кривизны существенную роль играют толщина полотна панели, тип ребер жесткости, расположение ребер (одностороннее либо двустороннее).

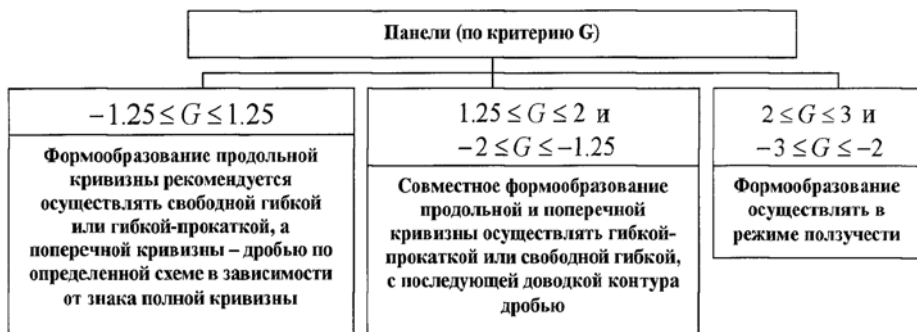


Рис. 2. Классификация по критерию G [60]

При анализе панелей сложной формы, имеющих отличия по кривизне участков и изменению толщины полотна по площади, общую площадь необходимо разбивать на характерные зоны для обработки с различными технологическими режимами.

Изучение типового технологического процесса формообразования дробью панелей крыла включает в себя ряд сопутствующих стадий выполнения операций, которые в той или иной степени оказывают влияние на конечную форму панели. Так, обработка панели дробью большого диаметра и с высокими скоростями приводит к увеличению шероховатости и необходимости выполнения операции зачистки.

Однако при анализе операции зачистки выяснилось, что одновременно происходит удаление поверхностного слоя и снижение уровня остаточных напряжений после формообразования. В процессе зачистки на поверхности панели появляются риски, которые снижают усталостную прочность и требуют операции повторного упрочнения, которая необходима для повышения усталостной прочности вафельной панели.

В результате изучения технологических процессов упрочнения панелей дробью можно сделать вывод, что они аналогичны процессам формообразования дробью и являются практически их разновидностью.

Далее рассмотрим важную особенность классификации панелей по условиям сборки планера самолета, которая отличается рядом особенностей, причиной которых являются большие габариты агрегатов и уменьшенное количество конструктивных разрезов. Основные методы сборки крыла, применяемые в самолетостроении, подробно исследованы и описаны. В отличие от общемашиностроительной классификации сборочных работ, в самолетостроении технологические процессы сборки зависят: от

метода базирования (от каркаса или от теоретического контура); положения сборочных ступеней (вертикальное и горизонтальное). Таким образом, все существующее многообразие панелей можно представить для анализа следующими схемами:

- по кривизне (рис. 3);
- по конструктивным признакам (рис. 4);
- по технологическим признакам фрезерования (рис. 5);
- по технологическим признакам формообразования (рис. 6).

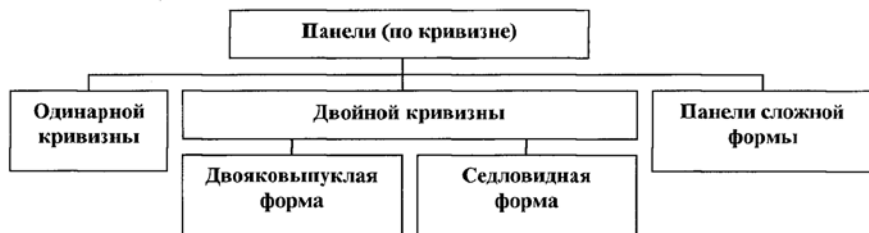


Рис. 3. Классификация панелей по кривизне

Анализ современных технологических процессов формообразования монолитных панелей со сложным силовым набором в виде ребер различной конструкции показал, что выбор способа формообразования зависит от степени деформации, геометрических соотношений характерных форм, жесткости, механических свойств материала заготовок. С другой стороны, эффективность способа зависит от того или иного вида применяемого деформирующего инструмента и технологического оборудования. Исследование особенностей современных технологических процессов формообразования панелей показало также, что возможности автоматизации процессов деформаций деталей могут качественно изменить эффективность традиционных способов деформации металла. Например, использование оборудования с числовым программным управлением качественно изменяет процессы гибки панелей. 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 ос-

настки, её конструкции применительно к используемому оборудованию, необходимости увеличения количества контрольных операций при изготовлении того или иного профиля, трудоемкость изготовления и качество которого зависит от степени сложности его конфигурации.



Рис. 4. Конструктивная классификация панелей

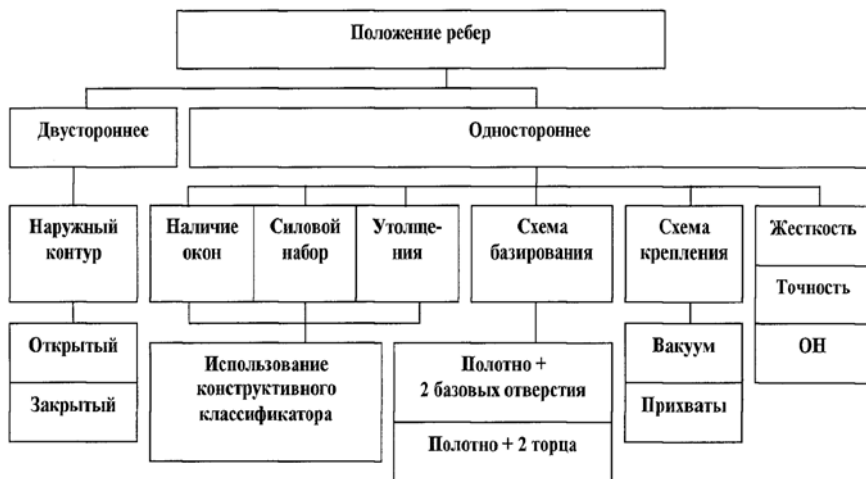


Рис. 5. Технологическая классификация панелей

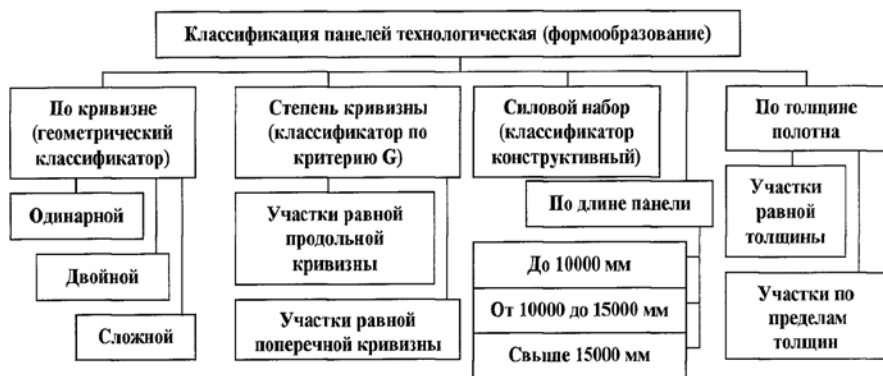


Рис. 6. Технологическая классификация панелей



## **Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ МОНОЛИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

### **2.1 Методика проектирования технологии изготовления монолитных панелей и выбора схем деформаций по применяемому оборудованию и оснастке**

Современный уровень развития авиационной техники характеризуется широким применением в планере летательного аппарата крупногабаритных монолитных деталей пониженной жесткости. Исследование замены сборной конструкции целиком монолитной исключает необходимость ручного труда на сборку, но, как правило, увеличивает объем работ по изготовлению сложной панели в виде одной детали. Вместе с тем к различным по форме и видам внутреннего оребрения монолитным панелям предъявляются общие конструктивно-технологические требования, в первую очередь к точности изготовления полотна и ребер. При этом независимо от габаритов деталей поле допуска этих элементов может изменяться в пределах от 0,3 до 0,8 мм на 1000 мм длины, причем в последних разработках изделий намечается тенденция к ужесточению полей допусков. Это вызвано стремлением к улучшению весовых характеристик летательных аппаратов без ущерба для прочности, к точности изготовления которых будут предъявляться более жесткие требования. Повышение точности изготовления монолитных панелей на металлорежущем оборудовании представляет собой сложную технологическую задачу. В общем виде можно выделить следующие ее основные части: обеспечение высокоточными заготовками с минимальным уровнем остаточных напряжений и проектирование технологических процессов на основе научно обоснованных оптимальных процессов резания, формообразования, упрочнения и современных требований к полуфабрикатам.

Материалом, применяемым для авиационных панелей, в большинстве случаев являются алюминиевые сплавы: высокопрочные В93, В95; теплоустойчивые Д16, Д19.

Таблица 1. Механические свойства авиационных материалов

Марка материала	$\sigma_B$ (МПа)	$\sigma_{0,2}$ (МПа)	$\delta$ %	E (МПа)	$\mu$
B93, B95	520-680	440-640	12-7	70000	0,33
D16, D19	440-540	330-440	18-11	70000	0,33

Таблица 2. Химический состав алюминиевых сплавов

Марка материала	Основные компоненты, в %					
	Al	Cu	Mg	Mn	Ti	Zn
B93	основа	0,8-1,2	1,6-2,2	-	-	6,5-7,5
B95	основа	1,4-2,0	1,8-2,8	0,2-0,6	-	5,0-7,0
D16	основа	3,8-4,5	1,2-1,6	0,3-0,7	-	-
D19	основа	3,2-3,7	2,1-2,6	0,5-0,8	0,02-0,1	-

Сплавы этой группы обрабатываются в закаленном и состаренном состоянии. Для сплавов D16 и D19 применяют естественное старение, а для B93 и B95 искусственное старение.

Для анализа были использованы несколько существующих способов уменьшения остаточных напряжений в заготовках после их термической обработки. Один из них – релаксация, основан на процессе постепенного перехода из неравновесного состояния, вызванного внешними причинами, в равновесное (рис. 7). На основе свойств релаксации напряжений для алюминиевых деформируемых сплавов предусмотрено естественное и искусственное старение. Иногда, когда готовая деталь не поддается рихтовке, используют искусственное старение детали в принудительном состоянии. При этом релаксация протекает по заданным условиям.

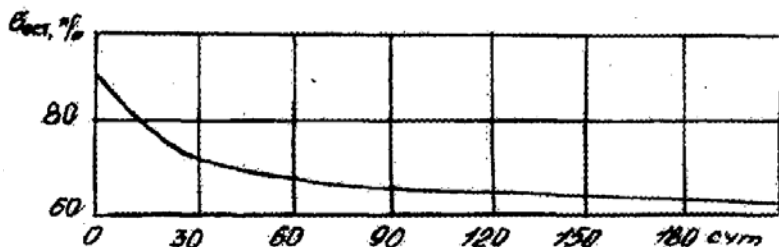


Рис. 7. График зависимости уменьшения остаточных напряжений от времени естественного старения

Широкое применение получил метод снятия остаточных напряжений пластическим растяжением заготовок. Метод заключается в том, что заго-

товку на специальных станках растягивают на 0,2 % выше предела текучести материала  $\sigma_T$ . Данный метод может быть использован для заготовок равного сечения: плиты, поковки, листы. Выполняется он только на опытных станках металлургических заводов.

Поэтому перед механической обработкой заготовки из профилей и катаных плит должны быть подвергнуты заданному заранее растяжению с заданной для каждого сплава остаточной деформацией 1,5-3 %.

Метод растяжения заготовки за пределы текучести для заготовок небольших размеров можно использовать, если на предприятиях есть соответствующей мощности рихтовочные валки (рис. 8). При изгибе и выпрямлении заготовка удлиняется, а это равносильно тому, что она пластически растягивается.

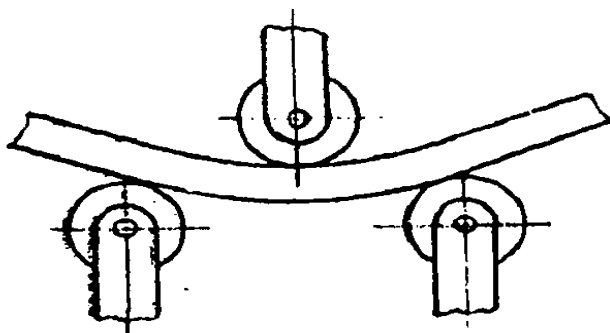


Рис. 8. Схема формовки плоской заготовки на валках

После изучения высокопрочных алюминиевых сплавов выяснилось, что они чувствительны к повторным нагрузкам, к концентрации напряжений и действию острых надрезов и эксцентриситетов, к перепаду жесткости, поэтому при изготовлении деталей и изделий из этих сплавов необходима тщательная проработка конструктивных форм.

В качестве полуфабрикатов основное применение находят горячекатаные плиты и профили сложного поперечного сечения.

Методом удаления материала с монолитных панелей является фрезерование, в процессе которого детали придаются необходимые контуры и снимается порядка 80-90% материала. Механическая обработка, как известно, приводит к нарушению равновесной эпюры остаточных напряжений, что сопровождается короблением на всех стадиях обработки.

Обработка таких деталей усложняется еще и тем, что в процессе резания появляются новые факторы, которые оказывают решающее влияние на поведение детали. К этим факторам относят:

- характер перераспределения остаточных напряжений, зависящий от величины, последовательности и условий резания;
- базирование и крепление;
- взаимодействие сохранившихся и технологических остаточных напряжений.

В ряде случаев ввиду снижения жесткости обрабатываемой детали ее коробление нарушается действием технологических остаточных напряжений.

В результате этого деталь находится в сложнапряженном состоянии, что ведет к отклонению формы от заданных геометрических размеров.

В настоящее время большая часть монолитных панелей малой жесткости обрабатывается на оборудовании с ЧПУ.

При исследовании выявили что многие авторы отмечают, что имеющийся опыт обработки на фрезерных станках с ЧПУ обобщен недостаточно полно, методические материалы по решению многих технологических задач отсутствуют, особенно это относится к деталям, сильно подверженным деформациям.

## **2.2. Исследование и анализ деформированного состояния заготовок для панелей на этапах механической обработки заготовок**

Точность изготовления зависит от того, насколько хорошо спроектирован технологический процесс, позволяющий компенсировать погрешности формы. Необходимо заранее предвидеть характер и величину деформаций детали и ее элементов по всем операциям технологического процесса. Это одна из сложных задач технолога при проектировании технологического процесса.

Деформация крупногабаритных деталей малой жесткости при механической обработке настолько сложный технологический процесс, что говорить в целом о деформации детали очень сложно, так как каждая из них имеет свои индивидуальные особенности. При решении этой задачи идут путем оценки деформации детали в целом на основе деформации ее отдельных элементов. На рис. 9 представлена для анализа схема влияния деформации конструктивных элементов на количество дефектов детали.

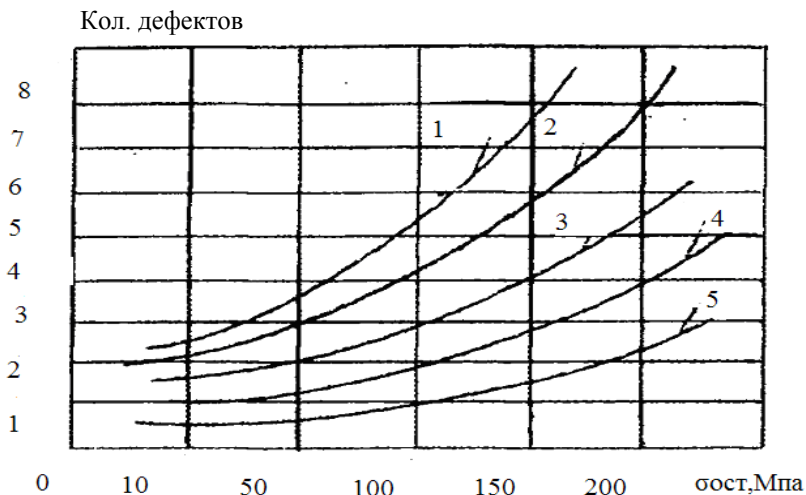


Рис. 9. Влияние остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  на количество дефектов (концентраторов напряжений): (1 - полотно; 2 – полки, ребра, фланцы; 3 – окна, лючки, бобышки, отверстия; 4- наружный контур; 5-нарушение геометрии переходов рельефа контуров

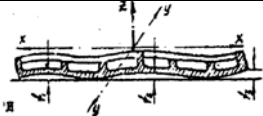

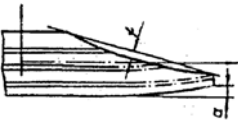
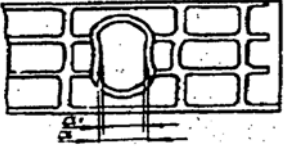
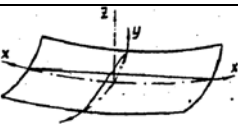

Теоретическое обоснование взаимосвязи величин остаточных напряжений и количества концентраторов напряжений заключается в том, что при деформации панелей с элементами жесткости в первую очередь происходит деформация именно полок и ребер жесткости. Полотно панели с меньшими степенями деформации решающего влияния на общее коробление детали и величину остаточных напряжений не оказывает. Из-за малого сечения полотна его жесткости недостаточно, чтобы деформировать (сжимать, растягивать или изгибать) силовой каркас детали. В небольшой степени такое влияние сказывается на изгибе детали.

Окна, отверстия, лючки и пазы с точки зрения деформации детали являются так называемым демпфером для гашения влияния остаточных напряжений от других элементов конструкции детали, однако они и сами при этом сильно подвергаются деформации.

Нарушение размеров и так называемых зарезов контура и размеров взаимно сопрягаемых элементов контура чаще наблюдается у крупногабаритных деталей типа панелей, у которых линейная деформация достигает больших размеров. В табл. 3 показано влияние деформации на форму и размеры детали.

Исследования и анализ технологических процессов изготовления панелей показали, что одним из сложнейших этапов изготовления монолитных панелей является этап формообразования по теоретическому контуру, который определяет точность и качество обводообразующей поверхности летательного аппарата (ЛА). Следовательно, в зависимости от требуемой кривизны и конструктивных особенностей силового набора панели зависит выбор основных способов формообразования монолитных панелей, а основными из них являются свободная гибка, раскатка роликами, дробеструйная обработка.

Таблица 3. Конструкция панелей и зависимость формы и размеров панелей от способа деформации

Тип деталей	Эскиз	Характеристика деформации	Плоскости
Монолитные панели малой жесткости с односторонним оребрением		Одноосный гофрированный изгиб $f_1, f_2, f_3$	XZ
Длинномерные панели с односторонним оребрением		Простой одноосный изгиб $f$ на $l$	XZ
Панели с продольным силовым набором		Изгиб в плоскости детали на $f$ и $a$ типа «саблевидность»	XY
Сквозные окна, лючки, отверстия		Искажение формы и размеров внутренних элементов деталей	XY
Панели больших габаритов большой толщины		Двухосный изгиб типа «парус» $f_y, f_x$ на $l$	XZ YZ
Тонкостенные панели		Сложный многоосный изгиб типа «пропеллер» $f_y, f_x, f_z$ на $l$	XZ YZ YZ

### 2.3. Технология и способы формообразования монолитных фрезерованных панелей различной формы и видов

Оценка технологичности формообразования каждого типа монолитной панели является сложной задачей, поэтому существуют определенные правила выбора технологий и применяемого оборудования для правки фрезерованных панелей. Например, для панелей из сплавов В95пчт. применимы следующие способы: гибка, обратная гибка (разгибка), разводка, посадка, закрутка и дробеструйная обработка.

Окончательная доводка общего или местного контура деталей из монолитных панелей может быть осуществлена методом свободного изгиба на прессах типа ПП-250 и СПП-160 или обдувкой дробью.

Анализ правки и местной подгибки на прессах типа ПП- 250 и СПП- 160 на двух опорах путем последовательного нажатия пуансоном на деталь показал достаточную эффективность такого способа, а общая схема правки показана на рис.10. Приемы правки монолитных панелей показаны на рис. 11.

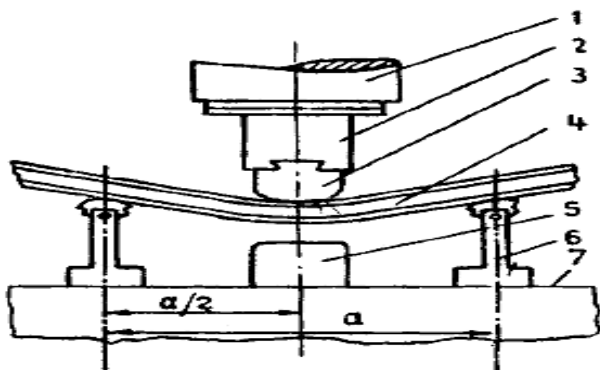


Рис. 10. Схема правки (гибки) на прессах типа ПП-250:  
1 – плунжер пресса; 2 – поворотный адаптер; 3 – пуансон; 4 – деталь;  
5 – ограничитель хода; 6 – опора; 7 – нижняя плита пресса

Также выяснилось, что сложными с точки зрения правки являются деформации, вызывающие продольную закрутку. Для профилей, балок, лонжеронов, панелей тенденция к скручиванию вдоль продольной оси вызывается в первую очередь неравномерным, несимметричным размещением элементов жесткости относительно этой оси. Особенно сильно деформируются подобные детали, изготовленные из штамповок или поковок с последующей механообработкой. Устранение таких дефектов в зависимо-

сти от конструктивно-технологических особенностей деталей производится ручной или машинной правкой, в том числе с обратной закруткой контура детали.

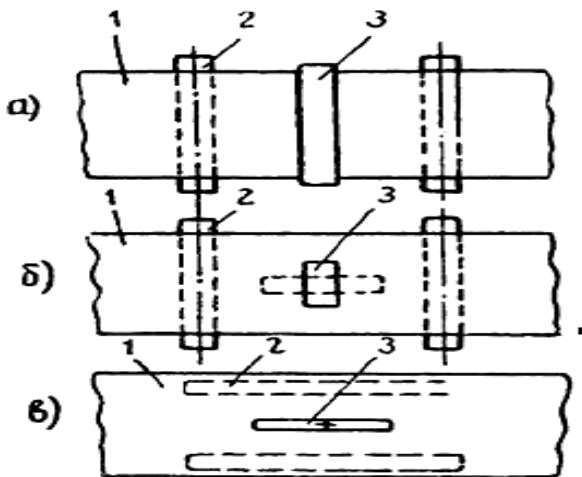


Рис. 11. Приемы правки монолитных панелей (вид со стороны плунжера):  
 а – общего прогиба по размаху; б – местного прогиба (вспучины);  
 в – прогиба по ширине; 1 – деталь; 2 – опора; 3 – пуансон

Правка общей кривизны или общей закрутки заготовок и деталей осуществляется закруткой на крутильных станках и стендах, а также методом свободного внецентренного изгиба на правильных гидравлических прессах.

Массовые коробления полотен типа «хлопунов», неприлегания отдельных элементов к столу у тонкостенных панелей являются, как правило, следствием механообработки. Устраняются обычно рихтовкой или дробеструйной обработкой на установках типа БДУ (рис. 12).

На различных этапах производства установки типа БДУ также применяют для местного упрочнения деталей и формообразования деталей из листов и плит.

Деформации в плоскости детали или в перпендикулярном направлении (отклонение от плоскостности) наблюдаются у кольцевых деталей типа шпангоутов, поясов, профилей, у вытянутых поковок небольшой ширины, прессованных панелей. Устраняются такие дефекты правкой на гидропрессе.



При исследовании также выяснилось, что, как правило, окна, лючки, отверстия деталей с односторонним оребрением типа рам за счёт релаксации остаточных напряжений сжимаются, теряя свои первоначальные размеры. Конструктивные элементы детали, находящиеся в зоне релаксации, например рёбра, изгибаются, нарушаются межцентровые расстояния. Устраняются такие дефекты правкой на гидропрессах в специальных приспособлениях.

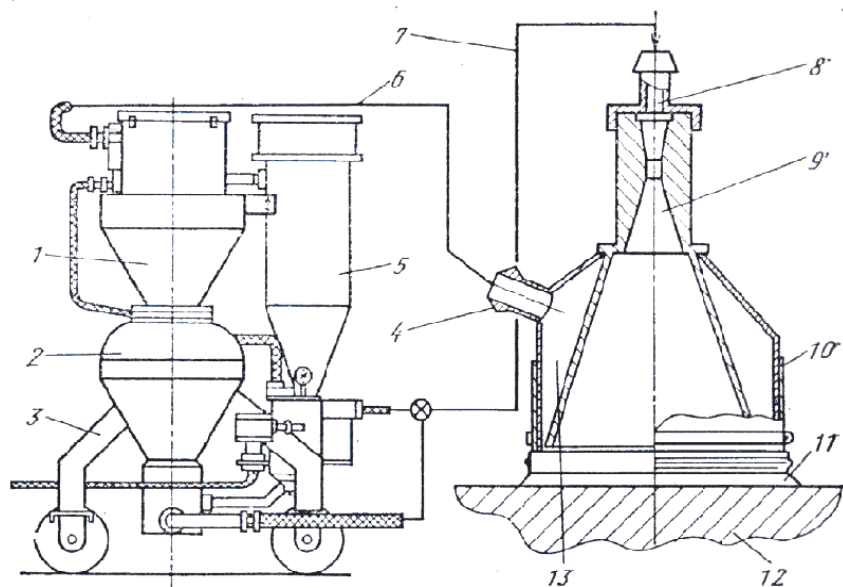


Рис. 12. Дробеструйная установка БДУ-Э2М [20]:

- 1 – система сбора дробы; 2 – система подачи дробы; 3 – транспортируемая тележка; 4, 8 – штуцер; 5 – система очистки дробы; 6 – рукав отсоса дробы; 7 – рукав подачи дробезооушной смеси; 9 – сопло, подающее дробь на поверхность детали; 10 – рабочая камера, щеточное уплотнение; 12 – деталь; 13 – полость разрезания

В качестве инструмента для ручной правки деталей дробеструйной обработкой может применяться устройство переносного типа (пневмопистолет) с одним профилированным рабочим соплом, показанное на рис. 13.

Анализ показал, что формоизменения детали при дробеструйной обработке зависят от целого ряда условий, требующих решения задач для оценки необходимости их учета. В частности, характер и условия деформации зависят: от жесткости детали, определяемой геометрической фор-

мой панели; свойств материала панели и рабочих тел; наличия глобальных и локальных жесткостей; параметров обработки, включающих диаметр и скорость дробы, плотность потока и время обработки, угол соударения дробы с деталью, степень насыщения потока; последовательности зон обработки. Управление данными параметрами должно быть теоретически обосновано, и тогда обеспечивается возможность получения детали заданной формы с заданными значениями остаточных напряжений, оказывающими положительный эффект на эксплуатационные характеристики изделия.

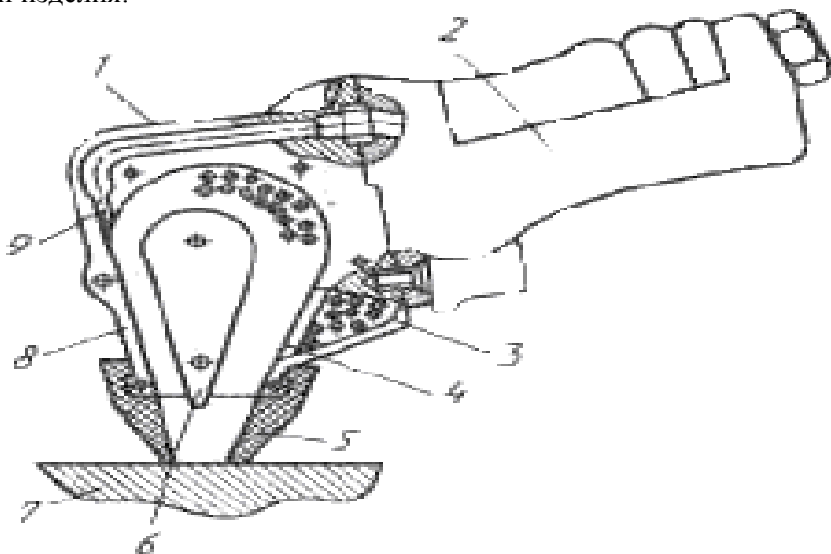


Рис. 13. Схема пневмопистолета с одним профилированным центральным телом (со снятой боковой крышкой):

- 1 – корпус; 2 – ручка; 3 – ловушка для хранения деформирующих тел до включения устройства в работу и сбора шариков после работы;
- 4 – заслонка; 5 – упругие резиновые насадки; 6 – рабочая камера;
- 7 – обрабатываемая поверхность детали; 8 – боковая крышка; 9 – сопло

Таким образом, можно сделать вывод, что обработка деталей дробью – эффективный и широко распространенный технологический способ повышения долговечности и надежности деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). После обработки дробью повышаются усталостная прочность, сопротивление коррозии под напряжением, качество поверхностного слоя (возникновение сжимающих остаточных напряжений, повышение микротвердости, улучшение микрорельефа).

Также выяснилось, что существующие прессовые методы правки отличаются низкими производительностью и уровнем механизации, но и возможности дробеструйной обработки при доводке профильных деталей имеют вполне определённые ограничения в связи с высокой изгибной жёсткостью деталей в продольном направлении.

В связи со значительными технологическими трудностями, возникающими при гибке крупногабаритных подкреплённых деталей на прессовом или валковом оборудовании, получили распространение методы, связанные с локальным пластическим деформированием.

Одним из направлений, расширяющим возможности как формообразования, так и правки, является практическое внедрение в производство методов местного пластического деформирования профильных деталей местной посадкой-разводкой материала детали специальными устройствами, раскаткой рёбер, а также применением комбинированных методов обработки, например, включающих раскатку и дробеструйную обработку.

Оптимальные режимы упрочнения при дробеструйной обработке зависят от целого ряда параметров – диаметра и скорости дроби, времени обработки, твердости обрабатываемого материала и материала дроби, угла падения, степени покрытия и т.п.

Исследования зависимости величины и характера распределения остаточных напряжений по толщине упрочненного слоя, а также структуры материала от режимов дробеструйной обработки позволили установить основные зависимости параметров процессов от режимов технологических процессов. Кривые зависимости стрелы прогиба, распределения остаточных напряжений и твердости поверхностного слоя от времени обработки приведены на рис. 14.

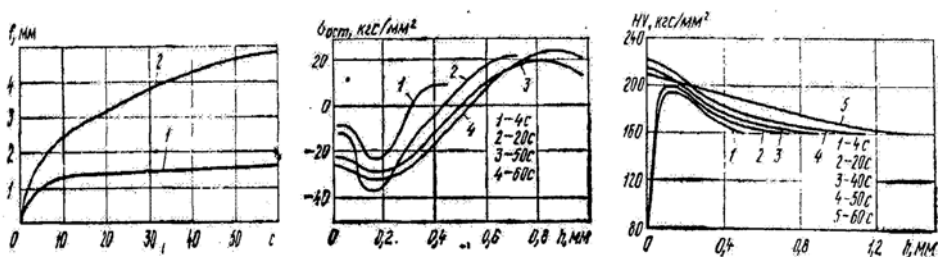


Рис. 14. Зависимость стрелы прогиба, остаточных напряжений и твердости поверхностного слоя от времени обработки

Таким образом, теоретическое обоснование способов выбора различных процессов изготовления монолитных панелей позволяет определить пути и способы получения изделий с заданными параметрами, снизить величины остаточных деформаций до требуемых, что основано как на экспериментальных, так и расчетных методах исследования процессов формообразования. Однако реальные технологические процессы изготовления монолитных панелей отличаются повышенной трудоемкостью, сложностью исполнения, не всегда экономически приемлемы и могут обеспечить требуемую точность деталей.

### Глава 3. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИЙ ЗАГОТОВОК МЕТОДАМИ СВОБОДНОЙ ГИБКИ И РАСКАТКОЙ РОЛИКАМИ

#### 3.1. Разработка технологических процессов формообразования панелей методом свободной гибки

Рассмотрим более детально технологические процессы формообразования крупногабаритных цельнофрезерованных панелей. В соответствии с изложенной выше теорией одним из эффективных способов формообразования является свободная гибка по участкам согласно установленной схеме деформаций, являющаяся одним из наиболее универсальных методов формообразования. Эта технология применяется как самостоятельный процесс для гибки панелей, так и для правки заготовок после механической обработки, а также для подгибки мест усилений перед дробеструйным формообразованием. Свободная гибка (рис. 15) позволяет получать панели с развертывающейся поверхностью.

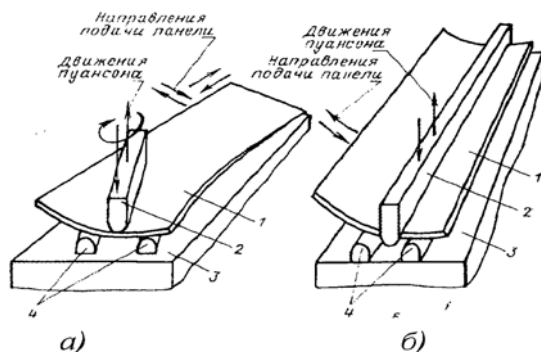


Рис. 15. Гибка монолитных панелей одинарной кривизны:  
а – последовательно по образующей; б – одновременно по всей образующей;  
1 – панель, 2 – пуансон, 3- стол, 4 – опоры

Исследования показали, что в некоторых случаях гибка панелей осуществляется по участкам вдоль линиигиба, например, при подгибке усиленных и гибке деталей со сложным рельефом. Формообразование панелей одинарной кривизны производится преимущественно гибкой прокаткой на валковых станках или гибкой с некоторым шагом на универсальных гибочных прессах. Однако опыт показывает, что в большинстве случаев гибка панелей впередвижку на гибочных прессах по производительности значительно уступает гибке прокаткой в валках на специализированном оборудовании, кроме того, при такой гибке на поверхности панели может оставаться огранка.

### ***3.1.1. Теоретическое обоснование способов выбора расчетных схем для определения технологических параметров свободной гибки***

Гибку как технологическую операцию деформации панелей следует рассматривать с учётом специфики их строения и геометрии, соответственно, от схемы деформаций по площади панели зависит результат преобразования панели из плоской заготовки в изогнутую пространственную деталь. Анализ процессов показал, что результат гибки в основном определяется схемой распределения усилий деформирования при заданных величинах расстояний между опорами и последовательностью выполнения операций гибки и мало зависит от вида и типа оборудования-кривошипных и гидравлических прессов, валковых листогибочных машин, специальных профилегибочных машин для гибки с растяжением, а также универсально-гибочных автоматов.

Соответственно, гибку следует классифицировать по разным признакам. Основными из них по признаку приложения внешних нагрузок являются гибка моментом, гибка поперечной силой, гибка с растяжением или сжатием. По признаку формы деформируемых заготовок ее можно разделить на гибку широких и узких плоских панелей, панелей с профилем и др.

В качестве примера рассмотрим более подробно изгиб моментом плоской панели с отношением длины к ширине более трёх. Изменение кривизны заготовки может происходить тогда, когда одна часть заготовки по толщине испытывает удлинение в тангенциальном направлении, другая – сжатие.

В какой-то момент деформирования, когда наружная и внутренняя поверхности имеют радиусы кривизны соответственно  $R$  и  $r$ , слой, который в данный момент не испытывает ни удлинения, ни укорочения (нейтральный слой), имеет радиус кривизны  $r_n$ . Тогда слои, для которых

$R > \rho > r_n$ , будут испытывать удлинение в тангенциальном направлении ( $\epsilon_\theta > 0$ ), а слои, для которых  $r_n > \rho > r$ , испытывают сжатие ( $\epsilon_\theta < 0$ ).

На рис. 15а приведена схема напряженно-деформированного состояния металла при гибке. Из этой схемы видно, что при гибке имеет место объемно-напряженное и плоскодеформированное состояние.

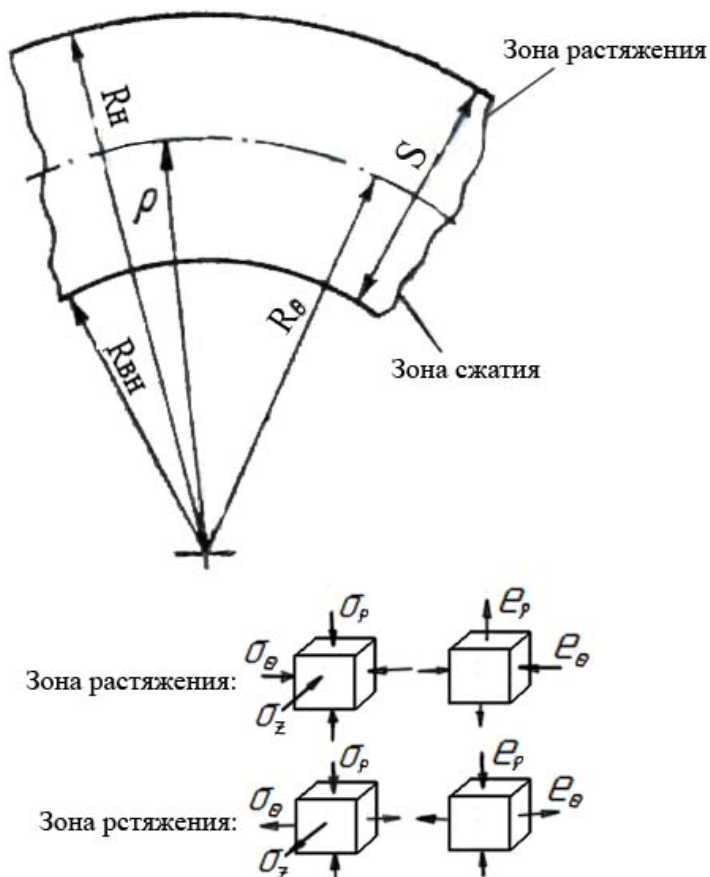


Рис. 15а. Схема напряженно-деформированного состояния металла при гибке

Из сказанного можно сделать вывод, что наиболее «опасным» местом при изгибе заготовки является наружная поверхность заготовки, именно здесь появляются трещины и происходит разрушение заготовки. Предель-

ные возможности металла при гибке характеризуются величиной отношения  $\gamma_{\min}/S$ .

Исследуя состояние материала в зоне изгиба, его изменение по переходам, можно установить, как влияет изменение ширины заготовки, её толщины и формы рельефа на схему напряженно-деформированного состояния металла при гибке.

Это позволяет учитывать конструкцию проектируемой оснастки, а также рассчитать условия устойчивости деформирования. При теоретическом анализе НДС в угловых зонах применяется схема плоской деформации, материал считается изотропным и несжимаемым, компоненты тензора напряжений зависят только от одной из координат. Другие допущения будут формироваться по мере постановки и решения соответствующих задач.

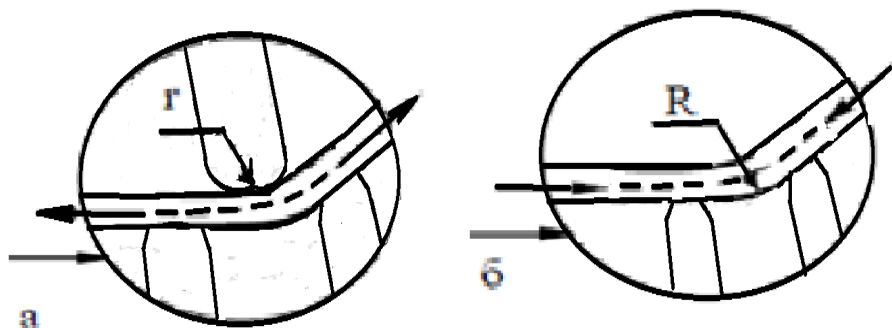


Рис. 16. Гибка угловых зон:

а – на первых переходах; б – на последних переходах

Анализ процессов показал, что при гибке угловых зон на первых переходах в открытых калибрах схема внешних воздействий близка к схеме гибки с растяжением (рис. 16, а), а на последних переходах, где осуществляется гибка заготовки по наружному контуру, схема внешних воздействий близка к схеме гибки с торцевым сжатием (рис. 16, б). В первом случае заготовка, как правило, получает утонение, а во втором – утолщение. При интенсивном деформировании гибку заготовки (даже на первых переходах) осуществляют в открытых калибрах.

А также можно отметить, что на предварительных переходах гибка осуществляется по открытой схеме со всесторонним доступом инструмен-



та (см. рис. 16, а). Данное рассмотрение относится к углам, примыкающим к стенке панели, поскольку растягивающие силы возникают вследствие перетяжки элемента через участок инструмента, соответствующий зоне изгиба угла в придонной части панели. Однако схема растяжения присуща и углам, примыкающим к отбортовкам. Пусть на скругленном участке верхнего ролика нагрузка от действия растягивающих сил распределена равномерно с интенсивностью  $p$ . Величину интенсивности нагрузки (давление на инструмент) можно связать с действующей силой. Действительно, в проекции на биссектрису угла действие растягивающих сил составляет величину  $2N \cos[(\pi - \alpha)/2]$ , а проекция распределенной нагрузки определяется интегралом

$$\int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} pr \cos \theta \cdot d\theta, \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  – уголгиба;  $\theta$  – угол между вектором распределенной погонной силы и биссектрисой угла;  $r$  – радиус кривизны внутреннего контура зоны изгиба.

Приравнивая величину растягивающей силы и силы, определяемой интегралом (3.1), получим

$$-2N \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2}\right) = \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} p \cdot r \cdot \cos \theta d\theta. \quad (3.2)$$

Проводя несложные преобразования левой и правой частей уравнения (3.2), получим

$$N = -p \cdot r. \quad (3.3)$$

Для вычисления смещения нейтрального слоя и последующего определения изменения толщины заготовки в угловой зоне следует рассмотреть ее напряженно-деформированное состояние.

Применим метод для определения напряжений и положения нейтрального слоя по напряжениям. Уравнение равновесия угловой зоны имеет вид

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta}}{\rho} = 0, \quad (3.4)$$

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

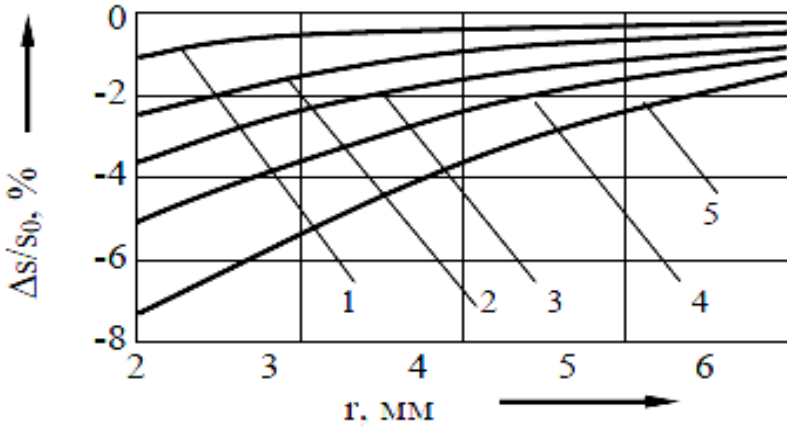


Рис. 17. Зависимость утонения от внутреннего радиуса панели и угла гибки

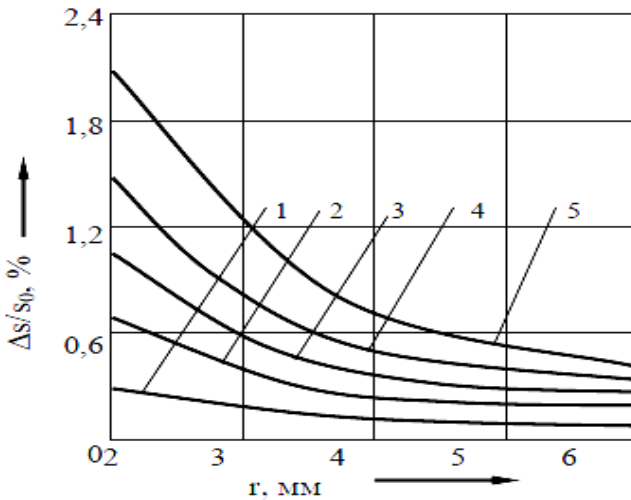


Рис. 18. Зависимость утолщения от величины внутреннего радиуса и угла гибки

Исследуемая модель дает весьма близкие результаты к экспериментальным данным по утонению угловых зон на первых переходах при традиционной схеме деформирования, где среднее утонение составляет 2–3 %, хотя формообразование при гибке моментом и гибке поперечной силой или гибкой с растяжением или сжатием ТП существенно различаются. Особенность деформирования заготовки при гибке моментом в первом переходе обусловлена тем, что здесь происходит монотонное изменение радиуса ее кривизны от бесконечности до конечного значения. В этом случае значительное утонение заготовки обусловлено схемой деформирования, большим углом гибки и отсутствием предварительного упрочнения угловых зон при интенсивном деформировании. Изменение радиусов на последующих переходах незначительно в отличие от традиционного деформирования, при котором радиусы кривизны участков будущих угловых зон изменяются монотонно. Таким образом, исследуемая модель изменения толщины криволинейных участков заготовки в зависимости от расклада силовых факторов предполагает увеличение утонения или утолщения с уменьшением радиуса изгиба и с увеличением угла гибки. Анализ расчета ширины заготовки по разработанной модели позволяет избежать ошибок при разработке технологического оснащения, сократить сроки и затраты на освоение технологии, повысить качество панелей за счет предотвращения потери устойчивости деформируемых элементов панели.

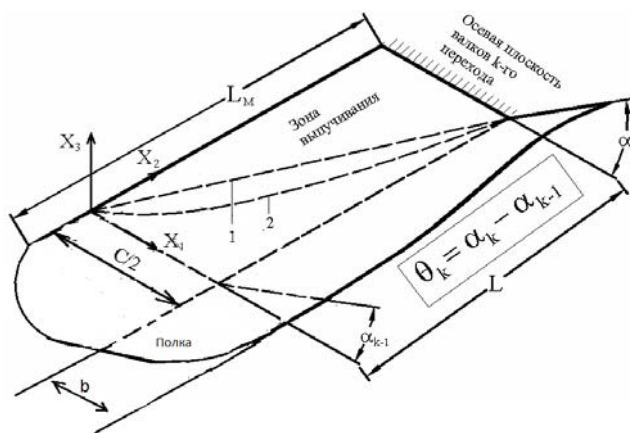


Рис. 19. Геометрия панели и расположение локальной системы координат:  
 1 – аппроксимация реальной границы пластической области;  
 2 – реальная граница пластической области

Исходная формула для определения деформации панели имеет вид

$$e_n = -e_u - e_v = -e_u. \quad (3.5)$$

Следовательно, тогда текущее значение деформации можно вычислить по формуле

$$e_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left( 1 + v^2 \left( \frac{\partial \theta(u)}{\partial u} \right)^2 \right). \quad (3.6)$$

Удельную работу деформации полки  $A_n^{yD}$  с учетом степенного упрочнения можно получить интегрированием приращения удельной работы:

$$A_n^{yD} = \int \sigma_i \cdot de_i = \frac{1}{m+1} \cdot A \cdot e_i^{m+1} \approx \frac{A}{m+1} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot v^2 \left( \frac{\partial \theta(u)}{\partial u} \right)^2 \right]^m, \quad (3.7)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $A$ ,  $m$  – параметры упрочнения;  $C$  – зона изгиба;  $u$  – деформация;  $e_i$  – интенсивность деформаций, определяемая формулой (3.6).

Для вычисления удельной работы, связанной с формированием угловой зоны, необходимо определить следующие предварительные условия. При использовании метода интенсивного деформирования схема формовки предусматривает постоянную величину радиуса зон изгиба на каждом из переходов, что минимизирует энергетические затраты, идущие на формообразование этих зон.

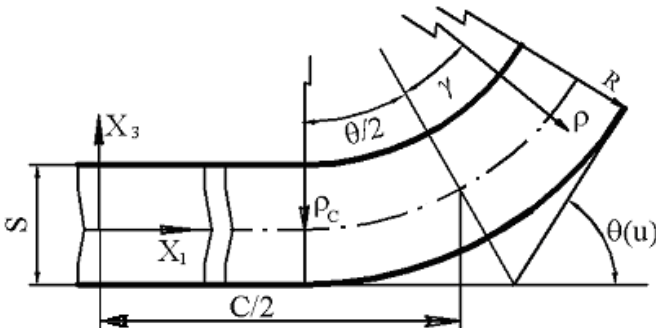


Рис. 20. Параметры угловой зоны

Принимая во внимание первое допущение, можно констатировать, что для угловой зоны условие отсутствия сжатия также выполняется.

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

$$A_{y^{\partial}}^{y^{\partial}} = \frac{1}{m+1} \cdot e_i^{m+1} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \left( \frac{\rho}{\rho_c} \right) \right]^{m+1}. \quad (3.8)$$

Таким образом, при гибке полки происходит перераспределение сил деформации в донную часть панели, под действием которых она выпучивается и переходит в пластическое состояние, причем зона выпучивания обычно не простирается далее зоны плавного перехода. На рис. 21 показана зависимость параметров зоны изгиба от величины поджатия полки для пластической зоны донной части панели, для которой логичными являются следующие допущения:

1) работа сил деформации в зоне выпучивания мала в сравнении с работой пластического сжатия;

2) длина пластической области в донной части панели равна протяженности зоны плавного перехода подгибаемой полки;

3) боковые границы пластической области в донной части профиля близки по форме к ветвям некоторой параболы, которые могут быть аппроксимированы линейной зависимостью с углом подгибки в качестве аргумента.

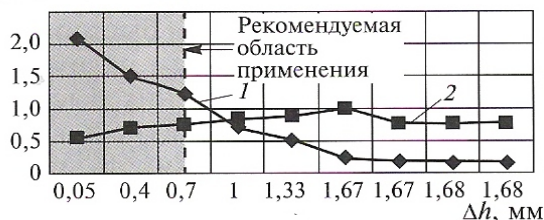
Анализируя последующие этапы деформации заготовки, можно отметить посадку наружного контура зоны изгиба, когда его окружные деформации находятся в стадии пластического течения металла. Дальнейшее деформирование сопровождается набором толщины в зоне, примыкающей к биссектрисе угла и на свободных полках. В реальном процессе деформирования набора толщины металла на полках не наблюдается по двум причинам:

1) в большинстве случаев внутренний радиус зоны изгиба определяется или задается инструментом по его номинальному значению с чертежа, так что зоны высвобождения отсутствуют и движение материала при существенном избытке ширины заготовки происходит в осевом направлении, то есть условие плоской деформации не выполняется;

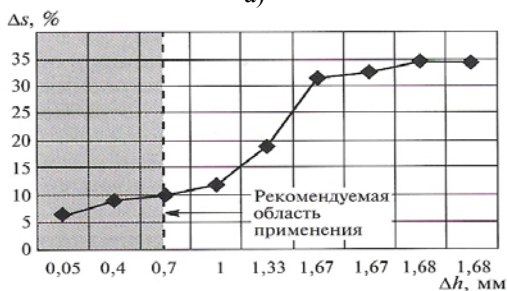
2) при наличии зон высвобождения ширину заготовки выбирают такой, чтобы утолщения полок или потери устойчивости не происходило. Следовательно, уменьшение продольной деформации возможно за счет переднего

поджатия, что значительно усложняет технологию и на практике применяется редко, хотя и позволяет получить существенное утолщение в угловой зоне (до 20–30 %). Обычно желаемое утолщение в зоне изгиба выбирают порядка 5–10 %, что достигается выбором ширины заготовки. При высвобождении угловой зоны заготовки весьма трудно предсказать теоретически величину радиуса утолщения и пружинения заготовки. Прикладные программные продукты на базе метода конечных элементов позволяют автоматизировать процессы расчёта параметров соответствующих процессов при их исследовании.

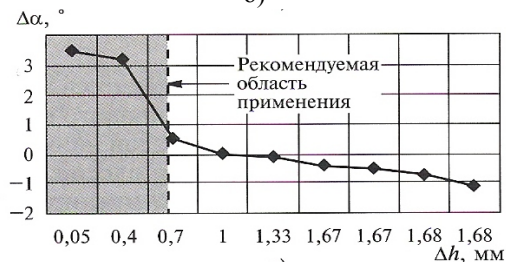
$r$ ; положение НСН



а)



б)



в)

Рис. 21. Зависимости параметров зоны изгиба от величины поджатия полки: а – внутреннего радиуса (кривая 1), положения нейтрального слоя (НСН) (кривая 2); б – величины утолщения угловой зоны; в – угла пружинения

Анализ полученных результатов расчетов показывает, что к главным для технологии формовки характеристикам относятся радиус кривизны, величина утолщения и пружинения при формовке полки согласно приведенным на рис. 21 обозначениям в рекомендуемой области применения подсадки. Значения величины подсадки по оси абсцисс соответствуют моделям в порядке их следования. Рис. 21, а показывает монотонное изменение радиуса кривизны внутреннего контура зоны изгиба и почти линейную зависимость смещения нейтрального слоя наружу (НСН) от величины подсадки. При этом смещение НСН на наружный контур зоны изгиба наблюдается примерно на 88 шаге нагружения при исследовании модели процесса деформации.

Это означает, что вся зона изгиба находится в пластическом состоянии, радиус кривизны внутреннего контура стабилизируется и фактически исчерпывается ресурс пластичности материала.

Дальнейшая подсадка приводит к потере устойчивости полки в форме изгиба с последующим утолщением. Изменение утолщения показывает, что оно может превышать 30 % (см. рис. 21, б), однако при формообразовании вафельных панелей достичь требуемой величины подсадки не удастся, кроме того, при относительном радиусе кривизны менее 0,9 на внутреннем контуре зоны изгиба появляются микроскладки и нарушение покрытия. Исследование напряжений подсадки в полке показывает, что при величине подсадки 0,7 мм среднее напряжение торцового поджатия составляет не более  $0,5\sigma_S$ . На представленной схеме видно, что наружный слой элементов на всем протяжении процесса практически не меняет своей толщины (образуется застойная зона), а внутренний слой подвержен существенному изменению толщины. Механизм этого явления реализуется через деформации сдвига вследствие действия касательных напряжений, распределение которых имеет вид двойной кривой.

Анализируя рис. 18, можно определить, что при значительной подсадке пружинение может быть сведено к нулю или даже становится отрицательным (в основном за счет изгиба прилегающей полки). Таким образом, поджатие полки при высвобождении угловых зон за счет конструкции формирующего инструмента позволяет расширить возможности технологии в части изменения конфигураций угловых зон изготавливаемых панелей, а возникающее при этом торцевое сжатие дает возможность разгрузить наружный контур зоны изгиба по деформациям в 2,0...2,5 раза, что обеспе-

чивает получение радиусовгиба меньше допустимых при наличии утолщения, повышающего несущую способность панели. Использование конечно-элементного анализа для исследования процессов формообразования позволяет совершенствовать технологию формоизменения на прессах и автоматизировать процессы вычислений параметров процессов.

Таким образом, результаты расчётов являются обоснованием для расширения баз данных по классификатору, сформированному по конструктивно-технологическим признакам панелей, и позволяют выявить особенности формообразования различных панелей при разработке технологии их изготовления. Построение модели для определения напряженно-деформированного состояния заготовки (НДС) в угловых зонах и изменения толщины заготовки, учитывающее различие схем нагружения на предварительных и окончательных переходах, позволяет производить уточненный расчет ширины заготовки. Полученное инженерным методом решение задачи вычисления главных параметров формообразования панелей позволяет определить протяженность зоны деформации, а также предельные углы гибки по критерию отсутствия избыточных деформаций заготовки.

Конечно-элементное моделирование процессов формообразования при фиксированном усилии позволяет рассчитать предельные значения радиусагиба, утолщения и пружинения, которые могут использоваться при разработке технологии производства вафельных и других панелей на прессах.

### **3.2. Процессы формообразования панелей методом раскатки роликами**

В настоящее время одним из перспективных способов формообразования панелей является формообразование деталей типа цельнофрезерованных монолитных панелей раскаткой роликами.

В связи с несовершенством отраслевой нормативной документации на процессы раскатки роликами для установления ограничений по деформированию деталей можно воспользоваться ограничениями, установленными в отраслевой нормативной документации на процессы местной разводки и посадки в штампах, схемы нагружения которых подобны схеме процесса раскатки. Согласно им, глубина следов на детали от насечки на



рабочих элементах штампа после посадки не должна быть больше допуска на номинальный размер толщины стенки (полки).

Исследуемая схема нагружения детали при правке раскаткой роликами сходна с процессом прокатки на прокатном стане при замене цилиндрических валков на ролики цилиндрической (конической) формы, или на ролики с круглым (параболическим) профилем, или ролики-калибры. Раскатываемый участок детали зажимается между двумя роликами и нагружается регулируемой силой (рис. 22). При этом один из роликов может перемещаться свободно, а другой является ведущим и обеспечивает перемещение раскатного устройства по обрабатываемому участку детали. В результате раскатанный участок детали пластически деформируется (удлинится), что приводит к управляемому формоизменению детали и образованию остаточных напряжений.

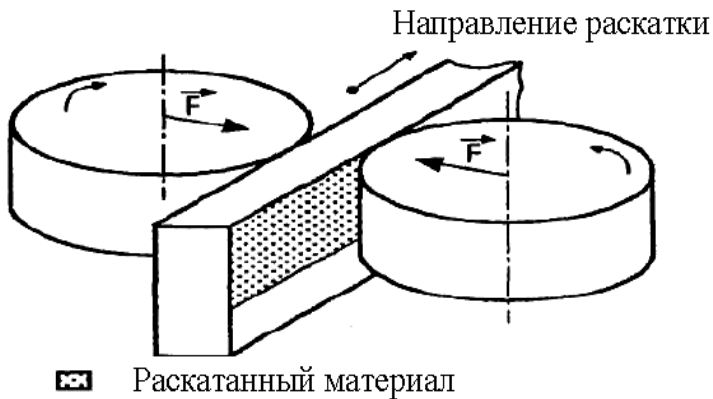


Рис. 22. Схема раскатки роликами

### **3.2.1. Построение расчетных схем для определения технологических параметров деформации методом раскатки роликами**

Решению основных задач, связанных с формообразованием цельнофрезерованных панелей, в частности упругим и упругопла-

стическим изгибом, других деталей-оболочек, посвящено значительное количество исследований, но в их основе лежат классические решения по упругому и пластическому изгибу, исследования по механике пластических деформаций. Однако исследования и анализ методик расчета основных технологических параметров формообразования ребристых панелей методом раскатки ребер показывают, что остаточная кривизна участка ребра панели с присоединенным с двух сторон полотном полной ширины, равной расстоянию между двумя соседними ребрами, определяется в зависимости от обжатия  $h$  раскатанного участка ребра. Расчетная схема процесса приведена на рис. 23.

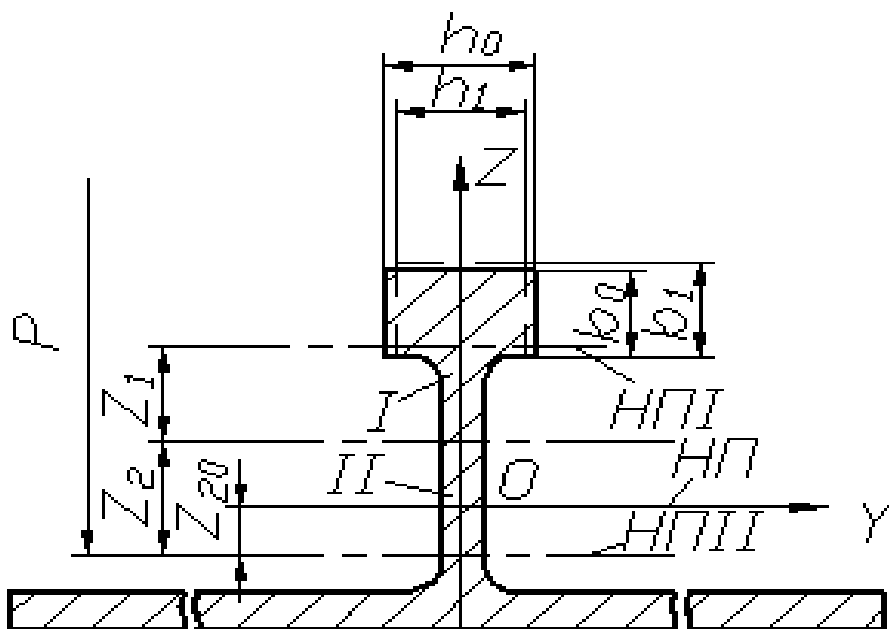


Рис. 23. Расчетная схема для определения остаточной кривизны

Схема процесса раскатки показана на рис. 24.

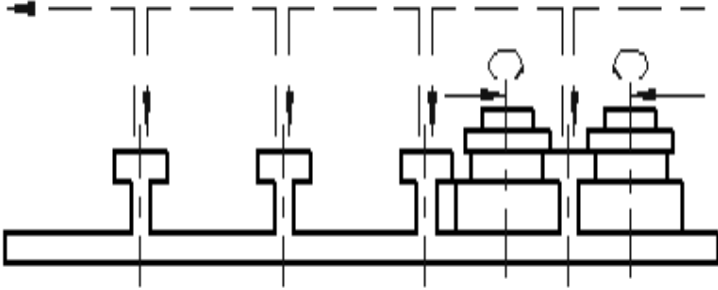


Рис. 24. Схема процесса раскатки

Для выполнения технологических расчетов предлагаются формулы:

$$\rho = R \left( 1 - \frac{I_1 + I_2}{I} \right), \quad (3.9)$$

$$b_0 \left( \frac{\Delta h}{h_0} - \frac{z_1 + z_2}{\rho} \right) = C_b C_0 a \left( \sqrt{r \Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (3.10)$$

где  $z_1$  и  $z_2$  – расстояния от границы раскатываемого и нераскатываемого участков до нейтральных поверхностей соответствующих участков (см. рис. 23);  $\rho$  – радиус кривизны нейтральной поверхности участка до разгрузки;  $\Delta h = h_0 - h_1$  – обжатие;  $C_b$  – коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы на уширение;  $C_0$  – коэффициент, учитывающий влияние натяжения;  $a = 2 \frac{1 - \varepsilon}{2 - 1,5\varepsilon}$  – коэффициент, зависящий от относительного

обжатия;  $\mu$  – коэффициент трения;  $R$  – остаточный радиус гибки;  $I_1, I_2$  – моменты инерции смежных участков относительно своих нейтральных поверхностей;  $r$  – радиус раскатного ролика.

При поиске решения задачи вначале определим значение  $\rho$  по известным параметрам с помощью выражения (3.9), а затем, решая уравнение (3.10), методом подбора (вариации) переменных можно определить искомый параметр  $\Delta h$ .

Из результатов исследования режимов последовательной деформации ребер панели можно сделать вывод, что технологический процесс

следует строить таким образом, чтобы форма панели не зависела от последовательности деформаций ребер. Для этого необходимо выполнять два условия:

1) при переходах от ребра к ребру полотно панели должно деформироваться в пределах упругопластической зоны;

2) влияние смежных ребер и прилегающих участков полотна на процесс в очаге деформации не должно быть существенным при условии:

$$l_{p_{\max}} = 4/3\sigma_s b^2 / E\delta K \rho; l_{p_{\max}} / \rho < 0,1, \quad (3.11)$$

где  $l_{p_{\max}}$  – длина зоны локального воздействия одного ребра вдоль его оси;  $\sigma_s$ ,  $E$  – предел текучести и модуль упругости материала полотна;  $b$  – расстояние между ребрами панели;  $\delta$  – толщина полотна панели;  $\rho$  – радиус изгиба ребра. Коэффициент  $K$  учитывает соотношение жесткости полотна и ребра. Для большинства стандартных авиационных панелей  $K = 1,5 \dots 2,5 M^1$  и определяется зависимостью

$$K = \sqrt{\delta^3 / 16Ib^3}, \quad (3.12)$$

где  $I$  – момент инерции ребра с присоединенным участком полотна шириной, равной  $b$ ;  $M$  – изгибающий момент.

Например, рассмотренные условия были подтверждены экспериментально на образцах монолитных панелей из материала Д16Т с высотой оребрения 50 мм и толщиной 5 мм. При этом в качестве критерия оценки точности выполнения указанных условий была взята для анализа относительная разность прогибов крайних ребер, находящихся в противоположных условиях деформирования. Указанная относительная разность прогибов при соблюдении условий деформирования не превышает 0,03.

Взаимное расположение зон локальных воздействий на ребрах панели позволяет получить требуемую форму панели, а именно прямой и косой изгиб под различными углами к оси ребер.

Необходимый угол изгиба достигается с точностью  $1^0$  за счет проведения одной корректировки промежуточным замером.

Исследуемый дополнительный участок обжатия может быть определен по зависимости

$$l_{pg} = (\alpha_K - \alpha_1)l_{p1} / \alpha_1, \quad (3.13)$$

где  $l_{p1}$  и  $\alpha_1$  – длина зоны локального воздействия вдоль оси ребра и его угол изгиба при корректировке;  $\alpha_K$  – требуемый угол изгиба ребра.

В случае, если максимальная длина локального воздействия деформации больше длины, необходимой для получения заданного угла, формоизменение следует вести повторением обжатый всех ребер. Следует также рассчитывать необходимое число обжатый:

$$n = \rho\alpha_K / l_{\rho_{\max}}. \quad (3.14)$$

Полученная раскаткой точность формоизменения панели в несколько раз превышает точность, достигаемую при свободной гибке впередвижку.

При анализе математических моделей формообразования панелей необходимо вести анализ условий формирования остаточных напряжений и деформаций для различных процессов деформации (дробеударной обработкой, раскаткой роликами и др.) на базе численных методов решения контактных задач. При этом напряженно-деформированное состояние (НДС) в зоне контакта инструмента и заготовки определяется методом исследования векторного поля смещений точек тела. Исходное условие – при отсутствии внешних воздействий и нулевом поле смещений точек объема материала заготовки напряжения во всех точках тела равны нулю. Возмущающими воздействиями являются перемещения поверхностных точек тела при воздействии инструмента, форма которого в зависимости от технологического назначения может быть самой разнообразной: сферической, цилиндрической, торообразной и т.д.

Практический интерес для анализа НДС представляют задачи, связанные с деформацией заготовки инструментом цилиндрической формы или тел в виде поверхности вращения. При воздействии такого инструмента на упругопластический материал ставится и решается соответственно плоская и осесимметричная задачи.

Для решения плоской задачи приведем следующие уравнения равновесия в перемещениях:

$$\alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (\beta + G) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + G \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \alpha \frac{\partial u \partial^2 v}{\partial x \partial x^2} + G \frac{\partial v \partial^2 v}{\partial x \partial y^2} + (\beta + G) \frac{\partial v \partial^2 v}{\partial y \partial x \partial y} = 0; \quad (3.15)$$

$$\alpha \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + (\beta + G) \frac{\partial^2 u}{\partial y \partial x} + G \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \alpha \frac{\partial v \partial^2 u}{\partial y \partial y^2} + G \frac{\partial v \partial^2 v}{\partial y \partial x^2} + (\beta + G) \frac{\partial v \partial^2 v}{\partial x \partial x \partial y} = 0,$$

где  $u = f(x, y)$ ;  $v = f(x, y)$  – смещения точек деформированного материала относительно выбранных осей;  $a = E/(1 - \nu^2)$ ;  $\beta = \mu * E/(1 - \mu^2)$ ;  $E$  – модуль упругости.

Для анализа напряжений, исходя из обобщенного закона Гука, необходимо решить задачу нахождения двух функций  $u$  и  $v$ , которые должны удовлетворять в каждой точке пространства уравнениям равновесия (3.15) и одновременно граничным условиям, заданным в виде перемещений или напряжений. Определение граничных условий осуществляется для двух областей:

- а – зоны контакта, ограниченной поверхностью контакта;
- б – внеконтактной зоны, ограниченной поверхностью нулевых смещений.

Граничные условия в зоне контакта определяются по различным законам задания рабочей поверхности инструмента.

Смещения в зоне контакта цилиндрической формы инструмента, заданного радиусом  $R$ :

$$v(x, 0) = \sqrt{R^2 - x^2} - (R - h), \text{ при } 0 \leq x \leq x_k, \quad (3.16)$$

где  $h$  – глубина внедрения инструмента,  $x_k$  – граничная точка его контакта с поверхностью заготовки.

В первом приближении  $x_k = \sqrt{(2R - h)h}$ . Для инструмента, радиус кривизны которого изменяется по параболическому закону  $y = ax^2$  (параболический цилиндр), получим

$$v(x,0) = h \left( 1 - d \frac{x^2}{x_k^2} \right), \quad \text{при } 0 \leq x \leq x_k. \quad (3.17)$$

В первом приближении можно принять  $x_k = \sqrt{\frac{h}{d}}$ , где  $d$  – заданная постоянная для каждого характерного участка рабочей контактной поверхности инструмента.

Для инструмента с произвольным законом изменения кривизны рабочей поверхности, заданным в виде степенного ряда, имеем

$$v(x,0) = h \left( 1 - \sum_{n=1}^k d_n \frac{x^n}{x_k^n} \right), \quad (3.18)$$

где  $d$  и  $n$  – заданные характерные постоянные.

Аналогично можно получить уравнения равновесия и для осесимметричной задачи с соответствующими граничными условиями.

Для всех рассмотренных, а также других частных случаев общие граничные условия могут иметь вид

$$\begin{aligned} u(0, y) &= 0; & v(0, 0) &= h; \\ u(x, y_m) = v(x, y_m) &= 0; & u(x_n, y) = v(x_n, y) &= 0; \\ \sigma_y(x, 0) &= 0, & \text{при } x_k \leq x \leq x_k. & \end{aligned} \quad (3.19)$$

Также выяснилось, что при упругопластическом деформировании заготовки для решения уравнений (3.15) можно использовать метод переменных параметров упругости. Решение системы уравнений (3.15) в аналитическом виде представляет сложную задачу, поэтому можно применить численный метод решения задачи с использованием метода сеток. В этом случае задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений, неизвестными в которых являются значения функций  $u$  и  $v$  в узлах сетки.

Учитывая симметричный характер деформирования в зоне контакта, решение системы (3.16) может осуществляться внутри замкнутой области, ограниченной положительным направлением координат, т.е. по одну сторону относительно оси симметрии инструмента (рис. 25). При численном решении задачи формообразования для рассмотрения представлены две расчетные схемы обработки: односторонняя и двусторонняя.

Решение задачи при односторонней обработке осуществляется в области, ограниченной координатами:  $x = 0, y = 0, x = x_n, y = y_m$  (рис. 25, а). При двусторонней обработке (рис. 25, б) задача решается отдельно для верхнего и нижнего индентора с координатами области решения для верхнего индентора:  $x = 0, y = 0, x = x_n, y = y_m$ , для нижнего индентора:  $x = 0, y = H, x = x_n, y = H - y_m$ .

Численная реализация задачи на ЭВМ позволяет определять остаточные напряжения в узлах сетки, зону упрочнения, усилие вдавливания для различного типа инструмента при обкатке поверхности панели.

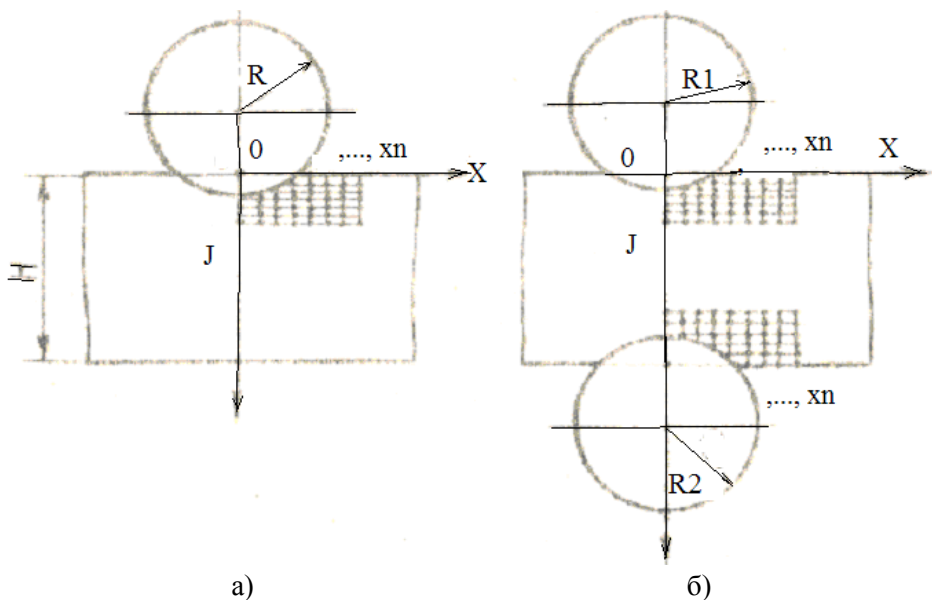


Рис. 25. Расчетные схемы формообразования панели при формообразовании обкаткой: а – односторонняя; б – двусторонняя



Для достаточного теоретического обоснования процессов формообразования типовых профилей деталей необходимо провести анализ деформации с учетом условий решения контактной задачи. Задачу изгиба профильной детали необходимо рассматривать как результат воздействия внешнего изгибающего момента от обработки поверхностного слоя детали. Пластически деформированный слой с толщиной  $h_S$  и осевыми остаточными напряжениями  $\sigma^{ост}(h_S)$  создает изгибающий момент деформируемого слоя относительно нейтральной оси:

$$dM_{изз} = \sigma^{ocm}(h_S)B y dy, \quad (3.20)$$

где  $B$  – ширина детали,  $h_S$  – плечо момента.

Адекватно изменение изгибающего момента сопровождается изменением прогиба детали:

$$dM_{изз} = \frac{8EJ_x}{L^2} df_y, \quad (3.21)$$

где  $J_x$  – осевой момент инерции;  $L$  – длина детали.

Совместное решение (3.20) и (3.21) дает:

$$f_y = \frac{L^2 B}{8EJ_x} \int \sigma^{ocm}(h_S) y dy. \quad (3.22)$$

С учетом решения контактной задачи для цилиндрического инструмента выражение (3.22) имеет вид

$$f_y = \frac{L^2 B}{8EJ_x} \sum \left[ (\alpha - \beta) \frac{\mu}{2p} \left[ (u_{i+1,j} - u_{i-1,j}) - \frac{1}{4p^2} (v_{i+1,j} - v_{i-1,j})^2 \right] - \mu(\alpha - \beta) \frac{1}{2l} (v_{i,j+1} - v_{i,j-1}) \left[ 1 - \frac{1}{4l} (v_{i,j+1} - v_{i,j-1}) \right] \right] (A - h_{sj}) p. \quad (3.23)$$

Тогда уравнение для расчёта прогибов при решении осесимметричной задачи имеет вид

$$f_y = \frac{L^2 B}{8EJ_x} \sum \left[ \alpha \frac{1}{2p} (u_{i+1,j} - u_{i-1,j}) + \alpha 8 \frac{1}{4p^2} (v_{i+1,j} - v_{i-1,j})^2 + \right. \\ \left. + \beta \frac{1}{ip} u_{ij} + \beta \frac{1}{2l} (v_{i,j+1} - v_{i,j-1}) + \beta \frac{1}{8l^2} (v_{i,j+1} - v_{i,j-1})^2 \right] (A - h_{sj}) p, \quad (3.24)$$

где  $p = y_m / M$  – шаг сетки;  $A = H - h_{H.O.}$

Локальный характер обработки отдельных участков профильной детали сопровождается приложением внешних сил и моментов, не совпадающих с главными осями инерции сечения, что создает локальные изгибающие моменты, под действием которых происходит общий разворот поперечного сечения панели или деформируемой детали относительно конструктивной оси на некоторый угол как результат косоугольного изгиба (рис. 26, а).

Для случая обработки горизонтальных боковых участков полотна детали (рис. 26, б) угол между главной осью инерции и действительной плоскостью изгиба  $\beta$  определится как

$$\beta_i = \arctg \frac{J_x}{J_y} \cdot \frac{\sum_{j=1}^m \sigma_{zj} B_i (x_0 - B_i / 2) p}{\sum_{j=1}^m \sigma_{zj} B_i (y_0 - j \cdot p / 2) p + \sum_{j=1}^m \sigma_{zj} B_i (y_0 - D_i + j \cdot p / 2) p}, \quad (3.25)$$

где  $B_i$  – ширина локального  $i$ -го участка обработки детали.

Для случая двухсторонней обработки ребра детали (рис. 26, в):

$$\beta_i = \arctg \frac{J_x}{J_y} \cdot \frac{\sum_{j=1}^m \sigma_{zj} A_i (x_0 - C - j \cdot p / 2) p + \sum_{j=1}^m \sigma_{zj} A_i (c + j \cdot p / 2) p}{2 \sum_{j=1}^m \sigma_{zj} A_i (C_i - A_i / p) p}, \quad (3.26)$$

где  $A_i$  – высота локального  $i$ -го участка обработки ребра.

Однако при исследовании полученных данных установлено, что разворот поперечного сечения панели может быть и следствием неравномер-

ного изгиба продольных ребер панели в вертикальной плоскости при их раскатке или двухсторонней дробеударной обработке. Прогиб концевой участка панели при раскатке ребра на величину  $f_0$  (рис. 26, а) вызывает угол поворота поперечного сечения, равный

$$\beta = \arctg \frac{l^2(1-k)}{2BR}, \quad (3.27)$$

где  $l$  – участок раскатки ребра;  $B$  – расстояние между ребрами;  $R$  – радиус изгиба ребра;  $k$  – коэффициент влияния обрабатываемого участка на необработанный,  $k = f_1/f_0$ .

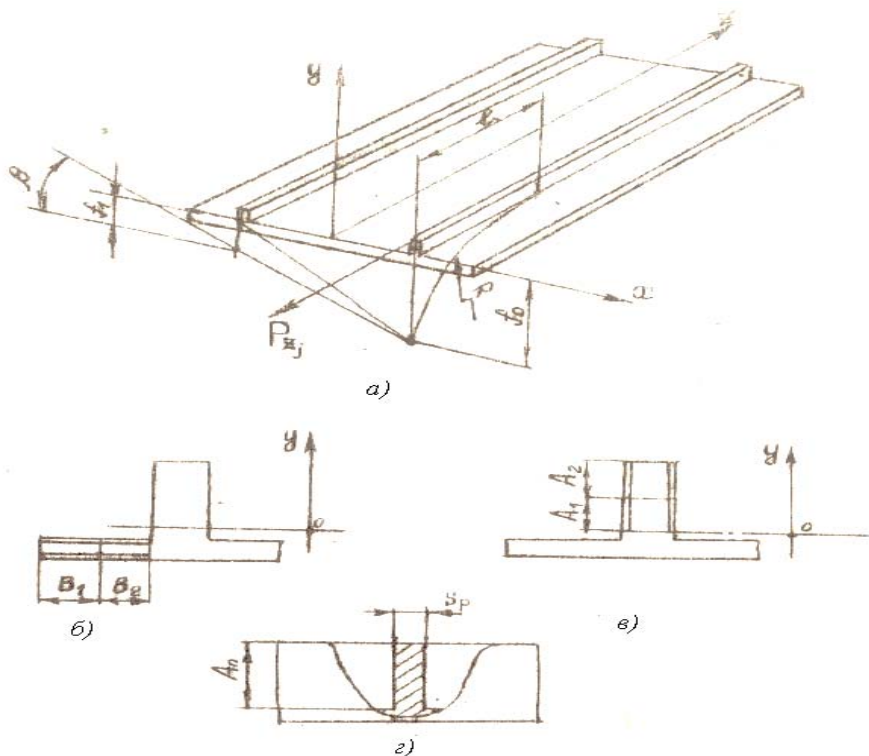


Рис. 26. Анализ расчетной схемы обработки профильной детали:  
 а – разворот при раскатке ребра; б – двухсторонняя обработка боковых  
 участков полотна; в – обработка продольного ребра детали;  
 г – обработка поперечного ребра

Рассмотренная методика может использоваться для определения технологических параметров процесса формообразования панелей и деталей сложного профиля, когда необходимо определить величины деформаций при одноосном изгибе деформируемых участков. В этом случае разворот поперечного сечения участков в приведенной методике рассмотрен как результат косоугольного изгиба, когда при его определении не учитываются нормальные напряжения, дополнительно вызывающие закрутку профиля.

Целью анализа методики расчета внутренних сил, действующих на ребро в процессе обработки панелей с несимметричным профилем ребра, является получение параметров раскатки ребер, обеспечивающих формирование продольной кривизны детали. Для этого необходимо установить зависимости между силовыми факторами процесса и деформацией изгиба обрабатываемой детали.

Решение может быть выполнено в технологической системе координат, ось  $Y$  которой параллельна ребрам панели, оси  $X$  и  $Z$  совпадают с наружной поверхностью и с левым обрезом рассматриваемого сечения соответственно (рис. 27).

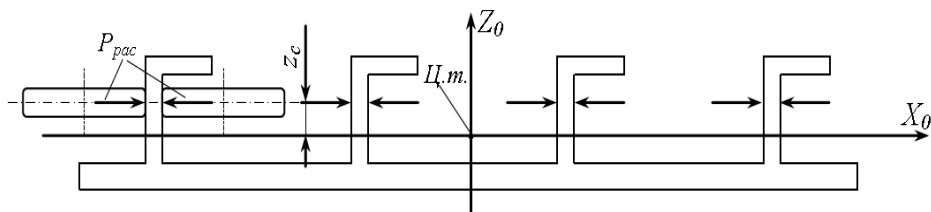


Рис. 27. Анализ силовых факторов, действующих при раскатке

Согласно схеме, силовыми факторами раскатки являются силы  $P_{рас}$ , которые действуют на ребро детали со стороны деформирующих роликов,  $z_c$  - расстояние от линии приложения этих сил, совпадающей с осью симметрии роликов, до центра тяжести сечения при заданном количестве раскатываемых ребер.

Результатом действия силовых факторов раскатки является возникновение внутренних сил  $R_y^{BH}$ , действующих на деталь со стороны ребер на расстоянии  $z_c$  до центра тяжести сечения, что приводит к возникнове-

нию изгибающего момента  $M_{рас,y}$ , который связан зависимостью с кривизной  $K_{УПФ_y}$  детали в направлении оси  $Y$  (рис. 28):

$$K_i = \frac{12M_i}{EK_{ynp}H_{npj}}; \quad i, j = x, y, \quad (3.28)$$

где  $E$  – модуль упругости 1-го рода;  $H_{npj}$  – приведенная постоянная толщина детали, эквивалентная по моменту инерции детали комплексного сечения криволинейной формы;  $K_{ynp}$  – коэффициент вида НДС, характеризующий отличие зависимости между компонентами напряжений и деформаций в рассматриваемом направлении при сложном НДС от зависимости, отвечающей одноосному НДС в области упругих деформаций. При одноосном изгибе пластин  $K_{ynp} = 1,125$ , при двухосном изгибе он определяется следующим выражением:

$$K_{ynp} = \frac{2}{8}(3 + a_R),$$

$a_R$  – коэффициент, характеризующий соотношение радиусов кривизны при двухосном изгибе,

$$a_R = \frac{R_y}{R_x}.$$

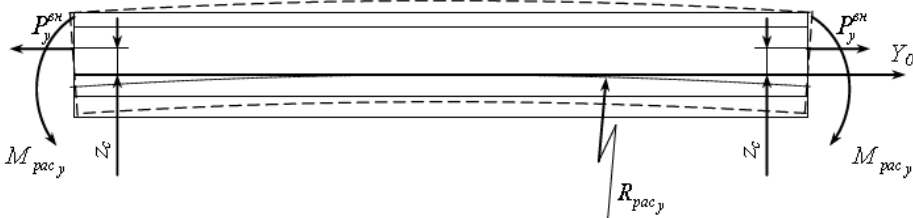


Рис. 28. Анализ деформации панели под действием внутренних силовых факторов раскатки

Сила  $P_{рас}$ , действующая на ребро детали со стороны роликов, может сопровождаться различными силовыми механизмами.

В случае использования схемы винтового механизма наладки роликов создаваемая им сила  $P_{pac}$  связана с моментом приближенной зависимостью

$$P_{pac} = \frac{M_3}{0,1d + fd_1/3}, \quad (3.29)$$

где  $M_3$  – момент затяжки болта при регулировке роликов;  $d$  – диаметр силового болта;  $f$  – коэффициент трения;  $d_1$  – диаметр торца болта, через который давление передаётся на нажимной ролик.

Для подтверждения результатов расчётов при определении величины внутренней распределенной силы  $P_Y^{BH}$ , действующей на деталь со стороны раскатанного ребра, можно использовать экспериментальный метод, при котором выполняется раскатка рёбер образца с заданной силой раскатки  $P_{pac}$ , после чего определяется кривизна образца, по формуле (3.28) вычисляется действующий на него изгибающий момент  $M_{pac}$ , а сила  $P_Y^{BH}$  находится как

$$P_Y^{BH} = M_{pac} / n_p z_c, \quad (3.30)$$

где  $n_p$  – количество рёбер в расчётном сечении;  $z_c$  – расстояние от оси роликов до центра тяжести сечения.

Результаты анализа экспериментального определения параметров раскатки в виде зависимости внутренней силы  $P_Y^{BH}$  от момента затяжки болта установки роликов применительно к монолитным панелям крыла самолёта приведены на рис. 29.

Исследуемая методика расчета технологических параметров процесса формообразования может быть использована при обработке деталей типа панелей, когда необходимо получить только деформацию одноосного изгиба. Также может быть исследована методика оценки угла закручивания несимметричного профиля относительно плоскости изгиба в процессе формообразования для определения параметров его компенсации путем упругопластического кручения заготовки в обратном направлении.

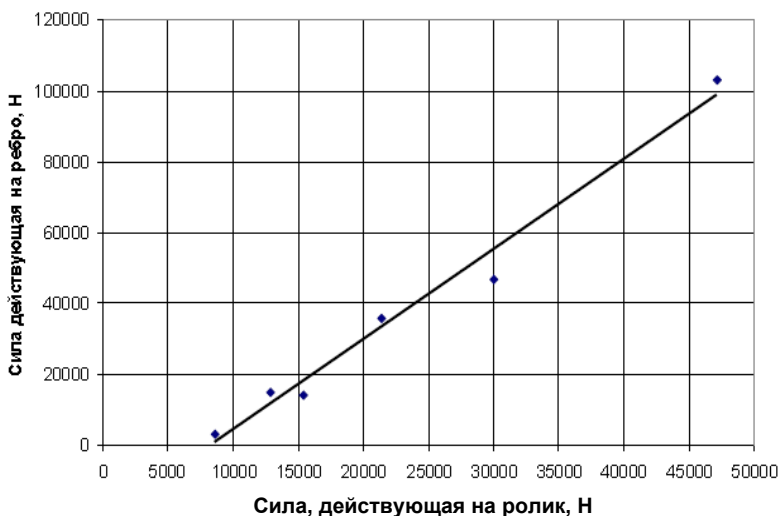


Рис. 29. Анализ зависимости внутренней силы, действующей на деталь со стороны раскатанных ребер КПО, от момента затяжки силового болта

Для анализа параметров деформации, в отличие от процесса формообразования раскаткой роликами, где образуются продольные растягивающие силы, может быть использована схема, при которой внецентровая перерезывающая сила, образующаяся в процессе изгиба на гибочно-малковочном оборудовании, вызывает дополнительное закручивание отдельных поперечных сечений профиля.

Приведенные методики расчета технологических параметров при обработке раскаткой роликами маложестких подкрепленных деталей с целью формоизменения были построены на расчете деформации одноосного изгиба, что не всегда позволяет рассчитывать величины деформации деталей силового каркаса летательных аппаратов, которые включают в себя изгибы в двух плоскостях и закручивание. Поэтому для таких деталей необходимо применять другие расчетные схемы, учитывающие одновременное образование комплекса деформаций, включающего двухосный изгиб и закручивание.

Для исследования задач, связанных с местным пластическим деформированием маложестких деталей, рассмотрим метод, основанный на теории начальных напряжений. Согласно этой теории, начальные напряжения  $\sigma_H$  в отличие от остаточных являются неуравновешенной нагрузкой. Их действие эквивалентно приложению к детали осевой силы  $P$  и изгибающе-

го момента  $M$ , которые при закрепленной детали компенсируются внешними силами зажима. После раскрепления происходит деформация детали в виде изгиба и удлинения (укорочения). В результате деформации начальные напряжения перераспределяются по всему сечению детали, принимают равновесное состояние и превращаются в остаточные напряжения (рис. 30).

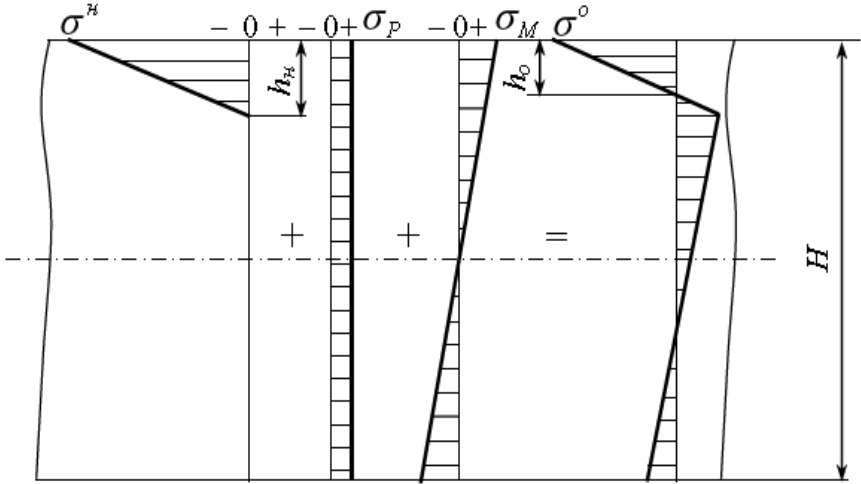


Рис.30. Принципиальная схема образования остаточных напряжений в панелях

Эпюра остаточных напряжений может быть найдена алгебраическим суммированием эпюры начальных напряжений  $\sigma^H$ , эпюры от осевой силы  $\sigma_P$  и эпюры от изгибающего момента  $\sigma_M$  по формуле

$$\sigma^o = \sigma^H + \sigma_P + \sigma_M. \quad (3.31)$$

### 3.2.2. Технологические требования к деталям, подвергаемым формообразованию методом раскатки роликми

Формообразование и правка деталей из алюминиевых сплавов раскаткой ребер допускается только после окончательной термообработки. Правке подвергаются только детали, правка сборочных единиц и узлов недопустима.



Правке раскаткой роликами должны подвергаться детали с отсутствием трещин, царапин, сколов, вмятин, наплывов и других поверхностных дефектов.

Кроме этого, имеется ряд других ограничений. Так, правка методом роликовой раскатки запрещена в следующих случаях:

- при воздействии на производстве на детали температур выше  $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- на деталях с защищёнными покрытиями (анодирование хромовой кислотой, окраска, электролитическое осаждение и т.д.);
- в районе отверстий (рис. 31). Величина отступа указывается в технологической документации;
- на острых кромках, не соответствующих требованиям конструкторской документации, на обрабатываемых поверхностях детали.

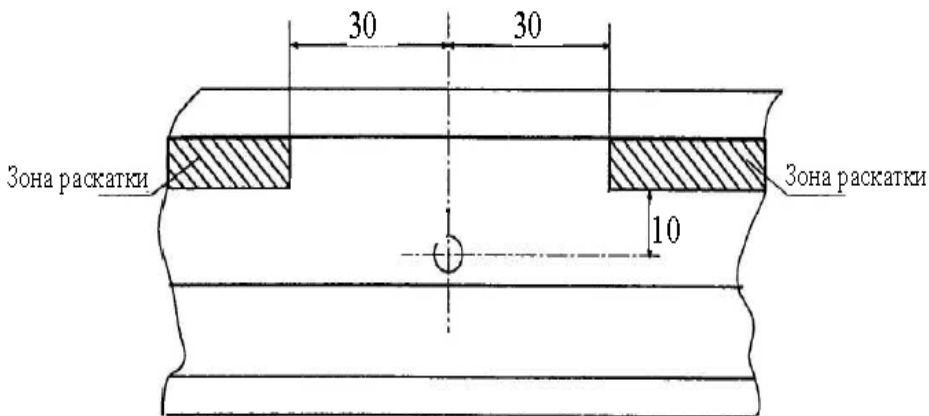


Рис. 31. Условия использования обработки детали с отверстиями

Перед правкой детали должны быть очищены от коррозии, тщательно промыты и обезжирены. Поверхностные дефекты в виде вмятин и царапин необходимо удалить зачисткой. Шероховатость обрабатываемых поверхностей должна быть не выше Ra 3,2.

Особое внимание необходимо уделить мерам по предотвращению образования трещин в деталях, подвергаемых формообразованию и правке раскаткой. Поскольку раскатка может привести к «закатыванию» мелких

трещин, обязательным требованием к технологическому процессу является включение в него операций контроля – цветной или люминесцентной дефектоскопии.

Давление роликов на деталь должно быть ограничено по следующей причине. В определённом диапазоне технологических нагрузок, когда глубина пластически деформированного слоя меньше половины толщины раскатываемого участка детали, раскатку можно отнести к процессам поверхностного пластического деформирования. В этом случае, вследствие влияния срединных упругодеформированных слоёв, у поверхности образуются остаточные напряжения сжатия. Если же пластическая область распространится на всю толщину участка, на поверхности вследствие неполной разгрузки могут образоваться растягивающие остаточные напряжения, что отрицательно скажется на ресурсе детали. Исходя из этого, предельно допустимое давление роликов на деталь должно определяться на основе измерения остаточных напряжений или глубины пластически деформированного слоя.

### **3.3. Определение технологических параметров деформации в моделях процессов формообразования дробеструйным методом**

Обработка ударами шариков характеризуется локальностью пластического деформирования поверхности детали. В результате силового воздействия деформирующей среды на поверхности панели образуются лунки при соответствующей схеме НДС по толщине заготовки. При полном покрытии поверхности отпечатками предполагается, что сжатие всех слоев по толщине в среднем будет соответствовать деформации осевого сжатия под одним отпечатком, типовая качественная эпюра которых представлена на рис. 32.

При деформированном состоянии каждого слоя можно определить изменение формы и размеров заготовки в целом. Исследования режимов дробеструйной обработки показывают, что размеры сечения детали в направлении действующих сил остаются практически неизменными, но с характерными признаками неравномерной деформации поверхностных слоев – искажением их решетки и искривлением плоскостей скольжения,

повышением твердости, увеличением плотности дислокаций. Это свидетельствует о том, что при дробеструйной обработке реализуется сложное нагружение.

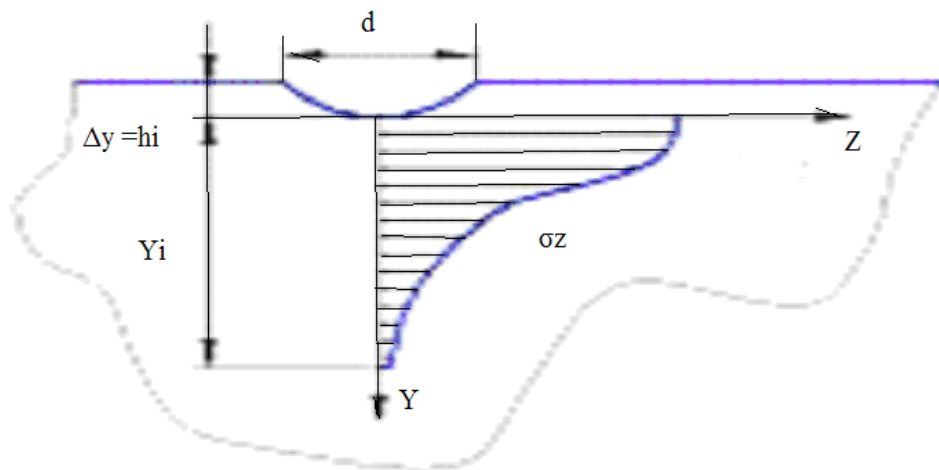


Рис. 32. Эпюра остаточных деформаций осевого сжатия по толщине пластически деформированного слоя под отпечатком диаметра  $d$  и глубиной  $h_i$

Последующие удары вблизи каждого отпечатка ведут к перераспределению деформаций под ним так, что при отсутствии объемных изменений размеры детали в среднем при полном покрытии поверхности отпечатками оказываются неизменными. По эффекту это можно рассматривать как частный случай обкатки. Однако при дробеструйной обработке происходит сложное взаимодействие многократных первичных деформаций прямого нагружения и разгрузки вторичных деформаций последующего нагружения. Лишь в начальный период неустановленной обработки первичные деформации по интегральному показателю значительно отличаются от вторичных. При стабилизации же процесса характеристики обработанной части детали практически выравниваются до уровня исходной необработанной части. Можно предположить, что при каждом ударе шариком форма и размеры очага деформации примерно одинаковы и соответствуют единичному вдавливанию. Следовательно, на первом этапе решения задача определения НДС поверхностных слоев сводится к

исследованию основных параметров очага деформации под единичным отпечатком.

Аналитически задача определения НДС под единичным отпечатком аналогична задаче Герца в теории упругости при наличии пластических деформаций и до сих пор не имеет точного решения. Можно отметить приближенное ее решение для идеально-пластичного материала, преследующее конечной целью определение контактных напряжений и деформирующих сил в зависимости от глубины вдавливания сферического инструмента. Из-за сложности комплексного решения контактной задачи пластичности упрочняемого материала теоретически и экспериментально исследуются только отдельные из характеристик НДС.

Из параметров деформированного состояния наибольший интерес для процессов дробеструйной формообразующей и упрочняющей обработки представляют показатели степени поверхностной деформации, толщина пластически деформированного слоя в наиболее характерной осевой зоне вдавливания шарика. Предлагается оценивать степень деформации сравнением площади круга до вдавливания  $F_K$  с площадью поверхности шарового сегмента лунки  $F_L$ , соответствующего данному кругу, а степень деформации можно определить по формуле

$$\psi_F = \frac{(F_L - F_K)}{F_L}. \quad (3.32)$$

Следует различать степень деформации в невосстановленной лунке  $\psi_H$ , когда шарик находится в лунке под нагрузкой, и в восстановленной лунке  $\psi_в$ , после снятия нагрузки. Обозначив диаметр невосстановленного отпечатка  $d_H$  для  $\psi_H$ , из геометрических соотношений получим

$$\psi_H = 0,5 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{d_H}{D} \right)^2} \right], \quad (3.33)$$

где  $D$  – диаметр вдавливаемого шара.

После снятия нагрузки происходит упругое восстановление лунки, которое сопровождается изменением ее диаметра и кривизны. Обозначив диаметр остаточного отпечатка  $d$ , а глубину восстановленной лунки  $h$ , для определения степени деформации в восстановленной лунке будем иметь

$$\psi_{\epsilon} = 1 - \left(\frac{d_H}{d}\right)^2 - \left(\frac{d_H}{d}\right)^2 \frac{h}{D_1}, \quad (3.34)$$

где  $D_1$  – диаметр кривизны лунки.

Выразив в уравнении диаметр кривизны лунки  $D_1$  через параметры  $d$  и  $h$ , находим

$$\psi_{\epsilon} = 1 - \frac{1}{1 + 4\left(\frac{h}{d}\right)^2} \frac{d_H}{d}. \quad (3.35)$$

Таким образом, в качестве показателя поверхностной деформации можно принимать критерий  $d/D$ . При его изменениях от 0,05 до 0,6 для всех материалов  $d_H/d$  близко к единице, а  $h/d$  значительно меньше единицы, и тогда формула (3.35) приближенно может быть записана так:

$$\psi_{\epsilon} = 1 - 4\left(\frac{h}{d}\right)^2. \quad (3.36)$$

Различие формул (3.35) и (3.36) состоит в том, что для восстановленной лунки средняя степень поверхностной деформации определяется не только геометрическими факторами, но и упругопластическими свойствами, вызывающими различное восстановление глубины лунки после вдавливания шарика на одну глубину в материалы с различными свойствами. Измерения глубины остаточного отпечатка затруднено в связи с динамичностью процесса нагружения.

Эксперименты показывают, что при  $d/D = 0,05 \div 0,6$  зависимость  $h/d$  от показателя поверхностной деформации  $d/D$  приближенно может быть принята линейной:

$$\frac{h}{d} = C_0 \left( \frac{d}{D} - B_0 \right), \quad (3.37)$$

где коэффициенты  $C_0$  и  $B_0$  зависят от упругопластических свойств материала заготовки. Значения данных коэффициентов приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значение коэффициентов  $C_0$  и  $B_0$ 

Сплав	$C_0$	$B_0$
АК4-1Т	0,249	0,020
Д16Т	0,248	0,023
В95ПЧ	0,237	0,30

Параметр  $h/d$  как показатель степени остаточной деформации в лунке и критерий геометрического подобия остаточных отпечатков используется при сравнении очага деформации материалов с различными упруго-пластическими свойствами или с различными условиями деформирования. Для конкретных материалов и условий обработки отношение  $h/d$  определяется критерием  $d/D$ , который и принимается в качестве основного показателя деформированного состояния поверхности при исследовании силовых факторов поверхностного наклепа. Важнейшей характеристикой деформированного состояния является и толщина пластически деформированного слоя. При полном покрытии поверхности отпечатками толщина пластически деформированного слоя  $h_{нл}$  соответствует размерам очага деформации осевой зоны единичного вдавливания.

Для нахождения  $h_{нл}$  один из подходов предполагает использовать решение контактной задачи с учётом упругости, возникающей при вдавливании шарика в плоскую поверхность заготовки. При этом предполагается, что на глубине, превышающей зону пластического деформирования, распределение напряжений и деформаций такое же, как и при чисто упругом деформировании. Для практических расчетов наибольшее распространение имеет формула

$$h_{нл} = \sqrt{\frac{P}{\sigma_{0,2}}}, \quad (3.38)$$

где  $P$  – сила вдавливания;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести материала.

В динамических процессах экспериментальное определение силы  $P$  и динамического предела текучести  $\sigma_{0,2}$  затруднительно. Необходимо связать глубину пластически деформированной зоны с геометрическими параметрами остаточного отпечатка. Если предположить, что между пределом текучести и твердостью по Бринеллю имеет место постоянное со-

отношение и что при  $d/D \leq 0,5$  твердость по Бринеллю равна твердости по Мейеру, то для толщины наклепанного слоя получим формулу

$$h_{nl} = K_{nl}d, \quad (3.39)$$

где  $K_{nl}$  – коэффициент, для сталей равный  $K_{nl} = 1,5$ .

Исследования, проведенные на алюминиевых сплавах, показывают, что  $K_{nl}$  не более 1,5 и зависит от глубины вдавливания. Для определения  $h_{nl}$  рекомендована эмпирическая формула:

$$h_{nl} = \frac{K'_{nl}hD}{d}, \quad (3.40)$$

где  $K'_{nl} = 5,8$  для алюминиевых сплавов.

### **3.3.1. Расчет степени поверхностной деформации при дробеструйной обработке**

При оценке напряженного состояния поверхностных слоев циклически идеальных и упрочняемых материалов практически достаточно знать упругие постоянные  $E$ ,  $\mu$  и пластические константы  $K$  и  $n$ . Эти характеристики могут быть определены из испытаний на одноосное растяжение. Значения  $K$  и  $n$  определяются из условий прохождения аппроксимирующей кривой  $\sigma = K\varepsilon^n$  через точки условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\varepsilon_{0,2}$ ) и предела прочности ( $\sigma_\varepsilon$ ,  $\varepsilon_\varepsilon$ ):

$$n = \frac{(\ln \sigma_\varepsilon - \ln \sigma_{0,2})}{(\ln \varepsilon_\varepsilon - \ln \varepsilon_{0,2})}, \quad (3.41)$$

$$K = \frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon_\varepsilon^n}. \quad (3.42)$$

Режимы динамической обработки ударами шариков характеризуются диаметром шариков, скоростью их соударения с поверхностью заготовки, временем обработки и удельной плотностью потока. Изменение первых двух параметров изменяет кинетическую энергию удара и степень производимой поверхностной деформации. Время обработки и удельная плотность потока влияют на степень покрытия поверхности отпечатками, а

также на изменение деформированного состояния поверхностных слоев при повторных ударах. При анализе влияния режимов обработки на поверхностную деформацию, оцениваемую отношением  $d/D$ , используют соотношения:

$$\psi = \frac{d}{D} = \left( \frac{2 n_{дин} + 2}{3 H_{дин}} \rho V^2 \right)^{\frac{1}{n_{дин} + 2}}, \quad (3.43)$$

где  $H_{дин}$  – истинная динамическая твердость;

$n_{дин}$  – показатель динамического упрочнения;

$\rho$  – плотность материала шариков;

$V$  – скорость удара.

Применительно для ударно-барабанного метода скорость удара  $V$  можно рассчитать по формуле

$$V = \sqrt{2gD_{бар}}, \quad (3.44)$$

где  $D_{бар}$  – диаметр барабанной установки.

Динамические характеристики материалов представлены в табл. 5.

Таблица 5. Динамические характеристики материалов

Марка сплава	$H_{дин}$ , МПа	$n_{дин}$
Сталь 40	2930	2,00
40Х	5340	2,00
30ХГСА	8200	2,00
30ХНМА	5400	2,00
Д16Т	2350	2,12
В95ПЧ	3200	2,14
АК4-1Т	2240	2,10

Уравнение (3.44) может быть рекомендовано для определения поверхностной деформации при допущении, что последующие удары шариков менее эффективные, чем первые. Для сталей увеличение диаметра отпечатка  $d$  прекращается после 10-20 ударов и соответствует  $(1,3 \div 1,5) d_1$ , где  $d_1$  – диаметр отпечатка при первом ударе.



### 3.3.2. Расчёт силовых параметров дробеструйной обработки

Создаваемая поверхностной обработкой эпюра напряжений не уравновешена по сечению заготовки и приводит к внутреннему изгибающему моменту  $M$ , значение которого на единицу периметра равно

$$M_x = \int_{h_{на}} \sigma_{xx}'' \left( \frac{H}{2} - z \right) dz, \quad (3.45)$$

$$M_y = \int_{h_{на}} \sigma_{yy}'' \left( \frac{H}{2} - z \right) dz. \quad (3.46)$$

Напряженное состояние поверхностных слоев при отсутствии начальных остаточных напряжений:

$$\sigma_{xx}'' = -E_{II} \varepsilon_{xx}^{ocm} \quad \text{при} \quad \varepsilon_s \geq \varepsilon_u > 0; \quad (3.47)$$

$$\sigma_{xx}'' = -K_{II} (\varepsilon_{xx}^{ocm})^n \quad \text{при} \quad \varepsilon_u > \varepsilon_s, \quad (3.48)$$

где  $E_{II}$  и  $K_{II}$  – приведенные модули, учитывающие сложность напряженного состояния и зависящие от модуля  $E$  и  $K$  и соотношений между компонентами НДС,

$$E_{II} = \frac{E}{1 - \mu}, \quad (3.49)$$

$$K_{II} = 2^n K. \quad (3.50)$$

Можно ограничиться рассмотрением внутреннего силового поля в направлении оси  $x$ , совпадающей с наибольшей стороной образца. При этом в направлении оси  $y$  расчеты будут аналогичны.

После интегрирования уравнение (3.45) примет вид

$$\frac{M}{bH^2} = E_{II} \frac{h_s}{h_{nl}} \gamma \left[ \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \gamma \right) \left( 1 - \frac{h_s}{h_{nl}} \right)^2 + \frac{1}{3} \gamma \left( 1 - \frac{h_s}{h_{nl}} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} K_{II} \frac{h}{h_{nl}} \left\{ \frac{\gamma(1-\gamma)}{n+1} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{h_s}{h_{nl}} \right)^{n-1} \right] - \frac{\gamma^2}{n+2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{h_s}{h_{nl}} \right)^{n-2} \right] \right\}, \quad (3.51)$$

где  $M/bH^2$  – внутренний удельный момент, вносимый упрочняющей обработкой;  $b$  – ширина;  $H$  – толщина образца;  $\gamma = h_{nl}/H$  – относительная толщина пластически деформированного слоя;  $h_s$  – толщина слоя, соответствующая переходу степенной аппроксимации кривой упрочнения в линейную. Соотношение  $h_s/h_{nl}$  определяют по формуле

$$\frac{h_s}{h_{nl}} = 1 - \frac{h_{nl}}{h} \left( \frac{K_{II}}{E_{II}} \right)^{\frac{1}{1-n}}. \quad (3.52)$$

График изменения  $M/bH^2$  в зависимости от  $\gamma$  и  $\psi$  приведен на рис. 33.

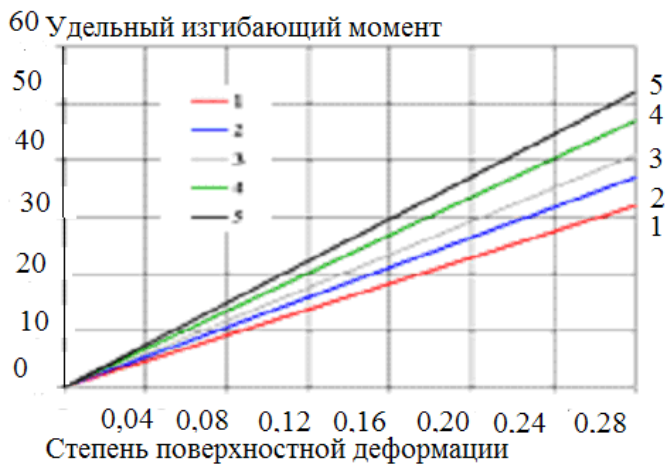


Рис. 33. Удельный изгибающий момент, возникающий при динамической обработке деталей из сплава Д16Т при степени поверхностной деформации  $\psi$ :

1 – 0,04; 2 – 0,08; 3 – 0,16; 4 – 0,32; 5 – 0,48

### 3.3.3. Методика контроля качества обработки деталей при формообразовании и правке панелей дробеструйным методом

Интенсивность обработки контролируют по связанным с ней изменениям физико-механического состояния поверхностного слоя. Контроль производится по образцам-свидетелям, в качестве которых используют плоские пластины (рис. 34). Образцы-свидетели изготавливаются из того же материала, что и обрабатываемые и упрочняемые детали. Контроль интенсивности обработки осуществляется по прогибу обработанной с одной стороны пластины.

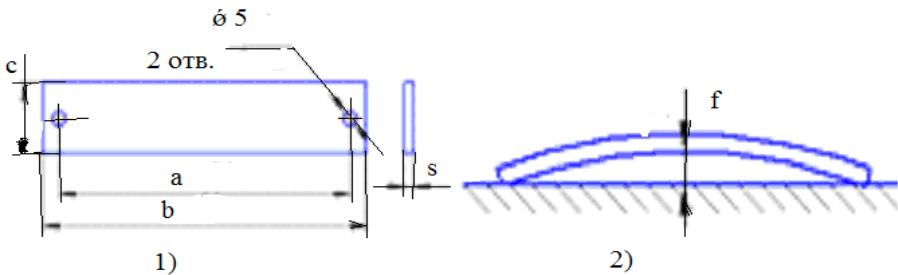


Рис. 34. Образец-свидетель (1) и схема измерения его прогиба  $f$  (2))

Размеры образцов-свидетелей и рекомендуемые значения прогибов приведены в табл. 6.

Таблица 6. Размеры и прогиб плоских образцов-свидетелей

Материал	Ширина, мм	Толщина $H$ , мм	Прогиб $f$ , мм
Сталь	19	$1,3 \pm 0,03$	2,0-3,5
Алюминиевый сплав	19	$2,0 \pm 0,1$	1,4-1,6
Титановый сплав	19	$1,3 \pm 0,03$	1,2-1,6

При односторонней обработке пластины под действием момента  $M/(bH)^2$  срединный слой получит относительную кривизну  $\bar{\chi}_{0x}$ , определяемую из условий равновесия следующими соотношениями:

$$\bar{\chi}_{0x} = \frac{12M}{bH^2 E_{II}}. \quad (3.53)$$

Относительный прогиб  $\bar{f} = f/H$  посредине пластины на базе измерения  $a_{II}$ :

$$\bar{f} = \frac{1}{8} \left( \frac{a_u}{H} \right)^2 \chi_{0x}. \quad (3.54)$$

Тогда прогиб  $f$  можно определить по формуле

$$f = \bar{f} \cdot H = \frac{3}{2} \frac{Ma_u^2}{2bH^3 E_{II}}. \quad (3.55)$$

Формула (3.53) с учетом выражений (3.54) и (3.55) по известной поверхностной деформации  $\gamma$  и  $\psi$ , определяемой свойствами материала и параметрами режимов формообразования, позволяет прогнозировать прогиб образца при проектировании технологических параметров и назначать режимы обработки, исходя из его величины и допустимой интенсивности деформаций, оцениваемой прогибом образца. Для удобства записи, совместив начало координат со срединным слоем, для остаточных напряжений при односторонней обработке пластины получим

$$\sigma'_{xx} = -\sigma''_{xx} + \frac{12M}{bH^2} \frac{z}{H} + \frac{P}{bH} \quad \text{при} \quad \frac{H}{2} - h_{nl} \leq z \leq \frac{H}{2}, \quad (3.56)$$

$$\sigma'_{xx} = \frac{12M}{bH^2} \frac{z}{H} + \frac{P}{bH} \quad \text{при} \quad -\frac{H}{2} \leq z \leq \frac{H}{2} - h_{nl}. \quad (3.57)$$







В пластически деформированном слое остаточные напряжения определяются разностью напряжений, вносимых обработкой, и напряжений объемной упругой деформации, а в остальной части они соответствуют только напряжениям упругой деформации.

### **3.4 Рекомендации по использованию дробеструйного метода формообразования и правки монолитных панелей конструкций ЛА**

Расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности – от 200 до 250 мм, сопло перемещается поперек ребер жесткости со скоростью от 0,5 до 0,9 м/мин. Обработка ведется по замкнутому циклу. В качестве обрабатывающей среды применяются стальная литая дробь марки ДСЛ диаметром от 0,8 до 1,2 мм, стальные шарики из конструкционной стали марки ШХ-15 диаметром от 0,8 до 3,0 мм. Для оценки масштабов применения проч-

няющей обработки поверхностным пластическим деформированием в табл. 7 представлены типовые детали и методы упрочнения, применяемые для обработки силовых деталей самолета Ан-124 «Руслан».

**Таблица 7. Детали самолета Ан-124«Руслан»,  
подвергаемые упрочнению дробеструйными методами обработки**

Типовые представители	Панели, пояса	Панели, балки, пояса, шпангоуты	Балки, кронштейны, щеки	Кронштейны, накладки	Щеки, фитинги, профили	Кронштейны, траверсы, рельсы
						
Метод упрочнения	Дробеметный	Ударно-баранный	Виброшлифование		Вибронаклеп	
Максимальные габариты	27000x2300x144	9400x1200x300	2500x320x20	314x230x75	1200x500x260	
Применяемые материалы	Д16чТ, В95пчТ2	Д16Т, 30ХГСА, ВТ22	Д16чТ, В95пчТ2, В93пчТ3, Ак-6Т1	ОТ 4-1, ВТ-22	Д16чТ, В93пчТ3, Ак-6Т1	ВТ-22, ВНС-5, 30ХГСА
Кол-во наим./ деталей	63/126	153/314	432/1489	12/23	61/150	65/188
Фюзеляж	14/28	42/119	89/302	1/2	11/22	8/20
Крыло	42/84	51/77	272/989	10/19	25/72	51/154
Оперение	7/14	41/84	53/148	-	25/56	-
Пилон	-	19/34	15/33	1/2	-	6/14
Оборудование	УДП-2-3,5	УБЯ-3-11А УБЯ-4-13 УБЯ-4-30	ВУД-4000 ВУД-2500 ВУД-1000	ВУД-1000	ВУД-2500 ВУД-1000	ВУД-2500 ВУД-1000

## Глава 4. МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗАГОТОВОК МОНОЛИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ МЕТОДАМИ СВОБОДНОЙ ГИБКИ НА ОПОРАХ

### 4.1 Методика выбора минимального радиусагиба для операций свободной гибки на опорах

Определяющим при этом является минимальный внутренний радиус  $r_{min}$ . Детали, выполняемые с предельно минимальными радиусами сгиба, принято считать нетехнологичными.

Минимальный радиус  $r_{min}$  зависит от механических свойств материала, НДС материала заготовки при деформировании, характеристик его пластичности и анизотропии, то есть от марки и состояния материала, состояния кромки заготовки, исходной толщины материала  $s_0$ , направления волокон. Принято оценивать процесс гибки через относительный внутренний радиус  $\bar{r} = r / s_0$ , в том числе  $\bar{r}_{min} = r_{min} / s_0$ .

Величина  $r_{min}$  определяет предельные возможности деформирования материала при свободной гибке и соответствует такому значению радиуса зоны сгиба, при котором не наблюдается разрушения в поверхностном (наружном) слое заготовки вследствие возникновения опасных растягивающих напряжений.

При проектировании деталей рационально закладывать радиусы сгиба больше  $r_{min}$ . Рекомендуемые их значения  $r$  не меньше соотношения:  $r = r_{min} + s_0$ , то есть следует увеличивать на одну толщину листовой заготовки. Такие рекомендации принимают при гибке в условиях классических схем пластического деформирования, что позволяет не учитывать анизотропию материала в зависимости от направления волокна.

В случаях гибки в условиях, приближенных к объемному НДС материала, можно принимать радиусы сгиба, близкие к  $r_{min}$ , например, в условиях стесненного изгиба, без опасности разрушения материала панели по наружному волокну. Лимитирующей оказывается величина  $\bar{r}$  по условиям возникновения явлений экструзии. Привести в одном учебном пособии все рекомендуемые минимальные радиусы сгиба для различных материалов и разного состояния материала при гибке, а именно : отоженное  $M$ , свежее

закаленное  $Tc.з$ , искусственно состаренное  $T1$ , закаленное на воздухе  $TГ$ , закаленное и естественно состаренное  $T$ , после закалки и правки  $Tпр$ , нагартованное  $H$ , полунагартованное  $П$  и т.д., нет возможности, поэтому в табл. 8 и 9 приведены только рекомендации по выбору  $r_{min}$  для ряда листовых алюминиевых и титановых сплавов с учетом перспектив развития указанных методов деформации и повышения технологичности конструкций летательных аппаратов.

Таблица 8. **Минимальные радиусы сгиба листовых алюминиевых сплавов**

Марка	Минимальный относительный радиус сгиба при гибке на угол $\varphi=90^\circ$ при деформации		Примечание
	холодной	горячей	
АМцМ АМг2М	0,5 1,0	–	а) ненагартованное состояние
АК4-1чАМ Д16АМ Д16чАМ Д19чАМ 1201АМ 1163АМ	2,0	–	б) нагартованное состояние
АК4-1чАТ АМг6М 1420Т 1430Т	1,5	0,5-1,0	а) ненагартованное состояние
Д16АТ Д16чАТ Д19чАТ 1163АТ 1201АТ В95АМ 1430Т	3,0	–	б) нагартованное Для ресурсных деталей изготовление с $r_{min}$ не рекомендуется. $\epsilon_{осм}$ ограничена $\epsilon_{осм} \leq \epsilon_{дон} \leq \epsilon_{пред}$
1420ТГ 1420Т <sub>ГПР</sub> 1430Тсз	1,5-2,0	0,5-1,0 для 1420, 1430	а) ненагартованное состояние
АК4-1чАТ Д16чАТ Д19чАТ В95АТсз 1451Тсз	4,0-5,0	0,5-1,0 для 1420	б) нагартованное состояние. Режимы искусственного старения согласовывать с ВИАМ

Таблица 9. Значения  $r_{min}$  для листовых титановых сплавов

Марка, состояние материала	Минимальный относительный радиус сгиба при гибке на угол $\varphi=90^\circ$ при деформации		Примечание
	холодной	горячей	
BT 1-00 BT 1-0	2,0	–	
OT4-0 OT4-1 ПТ7М	2,5	–	
OT4 BT16	3,0	–	
BT14 BT6 BT6C	6,0	2,0	
BT5-1 BT20 BT22	8,0	3,0	

В случае необходимости получения детали с радиусами сгиба меньше указанных в таблицах гибка при холодной деформации проводится за несколько переходов с промежуточными смягчающими термообработками или с нагревом заготовки, или при создании благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния материала при исследовании процессов на основе программных комплексов, например, DEFORM-2D.

#### 4.2. Исследование условий формообразования по получаемым величинам обратного ружинения заготовок

Необходимо учитывать, что применение такого метода изготовления деталей усложняет технологию производства, увеличивает цикл обработки и повышает трудоемкость и себестоимость панелей. Дополнительно после окончательной термической обработки требуется провести эксперименты по определению качества и ресурса изделий.



Также дополнительно к данным в табл. 8 и 9 необходимо указывать состояние материала кромок заготовки в зоне сгиба, для этого предусматриваются варианты:

- а) ненагартованное (зачищены, фрезерованы или подвергнуты смягчающей термообработке);
- б) нагартованное (после раскроя в штампах, на гильотинных ножницах).

Применение ряда материалов с  $r_{min}$  имеет ограничения, которые устанавливаются производственными инструкциями ПИ-1.2.136-79 – для Д16ч при применении в конструкции в состоянии Т1; ПИ-1.2.150-80 – для сплава 1201АТ (детали с переменной деформацией); ТР1.4.467-78 – для материалов 1420Т, 1420ТГ на последнем переходе. Для деталей ресурсных изделий ограничение вводится по относительной деформации ( $\epsilon_{ост} \leq \epsilon_{доп} \leq \epsilon_{пред}$ ).

При использовании сварной заготовки (например, длинномерных деталей)  $r_{min}$  следует увеличивать на одну толщину против указанных в табл. 6, 8.

Для деталей, изготавливаемых гибкой из химически фрезерованного материала, радиус сгиба следует увеличить на 1-2 толщины против табличных значений.

В реальных технологических процессах отклонения от заданного радиуса сгиба вследствие пружинения материала, которые характеризуются углом пружинения и зависят от марки материала, его состояния, толщины и радиуса сгиба, могут колебаться для одного и того же материала от поставки к поставке. При гибке на угол  $90^\circ$  с  $r_{min}$  (табличным) величина пружинения, например, для заготовок из алюминиевых сплавов будет соответствовать данным табл. 10. Увеличение радиуса сгиба приводит к увеличению пружинения.

**Таблица 10. Пружинение при гибке с минимальными радиусами алюминиевых материалов**

Минимальный относительный радиус, $r_{min}$	Угол пружинения $\Delta\alpha$ , град
0,5	0 ... 1,5
1,0	0 ... 2,0
1,5	1,0 ... 3,0
2,0	3,0 ... 6,0
2,5	4,0 ... 8,0

Выбрав наиболее благоприятную схему напряженно-деформированного состояния материала, можно пружинение свести до минимума или до нуля.

#### 4.3 Исследование параметров напряженно-деформированного состояния монолитных панелей при формообразовании гибкой с использованием программного комплекса DEORM -2D

Используя приведенные выше теоретические положения, построим расчётную схему формообразования панелей методом гибки на опорах с регулируемым усилием на пуансоне и изменяемом шаге опор. Результаты исследований представлены на следующих схемах (рис. 35-41):

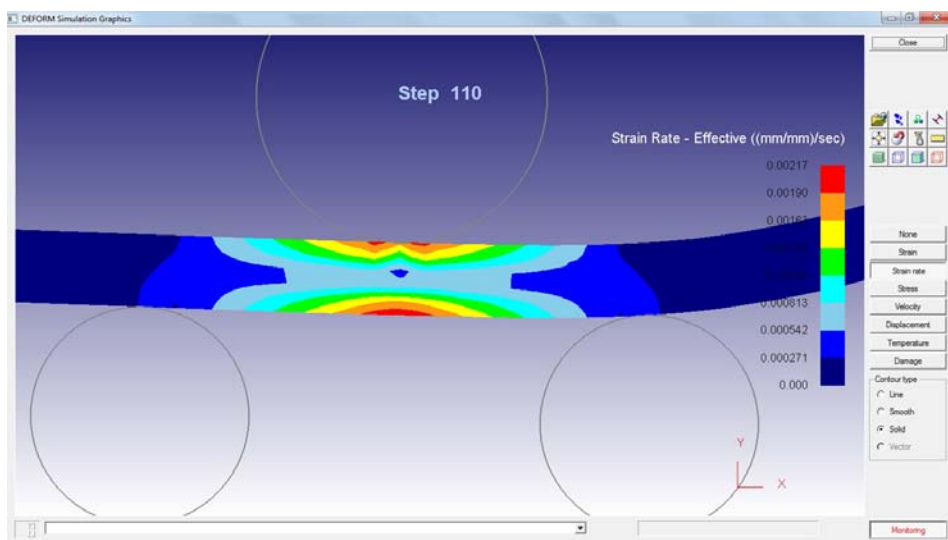


Рис. 35 .Напряженно-деформированное состояние панели при формообразовании – гибке на опорах с регулируемым усилием на пуансоне при шаге 110 мм

Таким образом, возможности программного комплекса DEORM -2D позволили получить значение текущих параметров деформации и напряжения по объему заготовки при всех схемах деформации панелей.

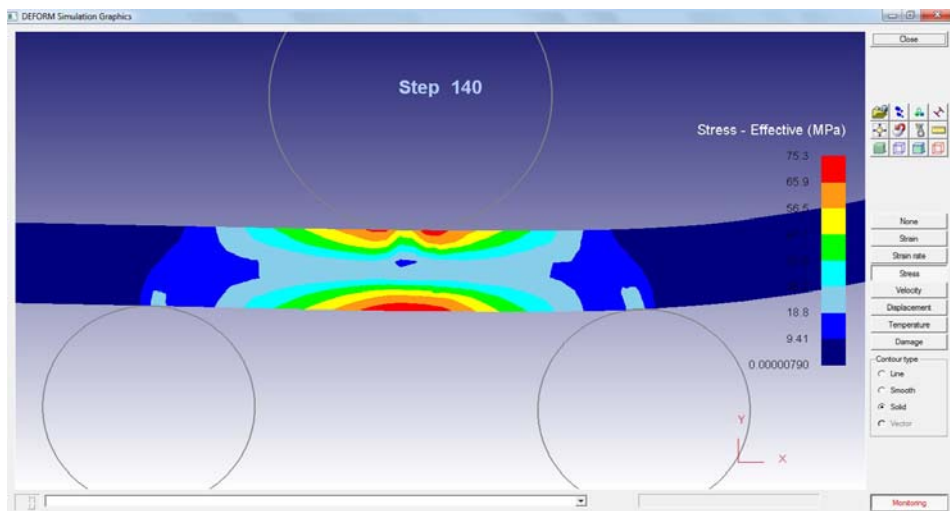


Рис. 36 .Напряженно-деформированное состояние панели при формообразовании – гибке на опорах с регулируемым усилием на пуансоне при шаге 140 мм

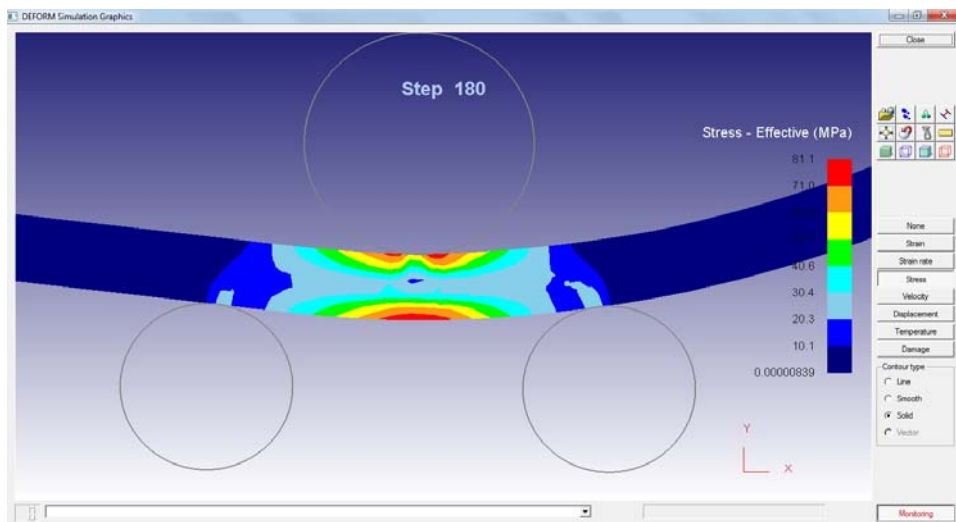


Рис. 37 .Напряженно-деформированное состояние панели при формообразовании – гибке на опорах с регулируемым усилием на пуансоне при шаге 180 мм

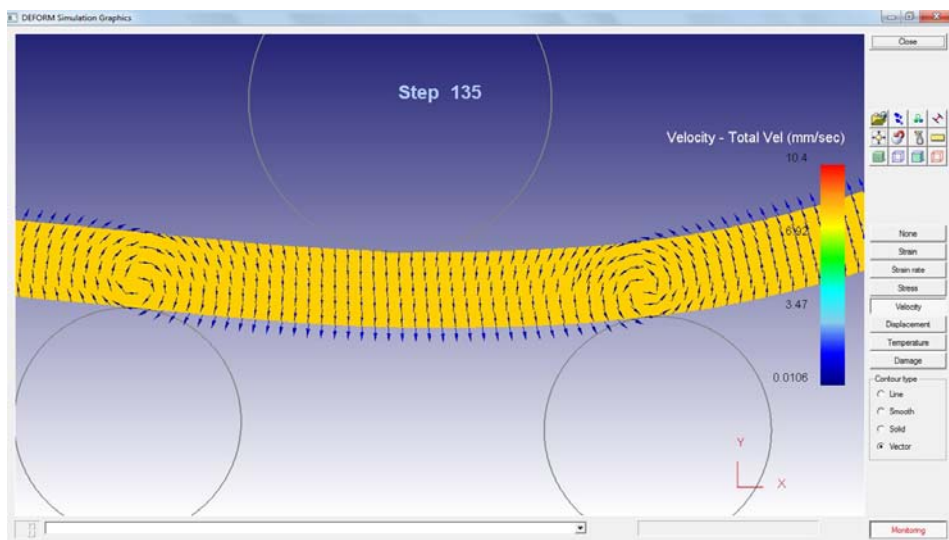


Рис. 38. Распределение интенсивности деформации по объему панели при гибке на опорах в зависимости от скорости перемещения инструмента на шаге 135 мм

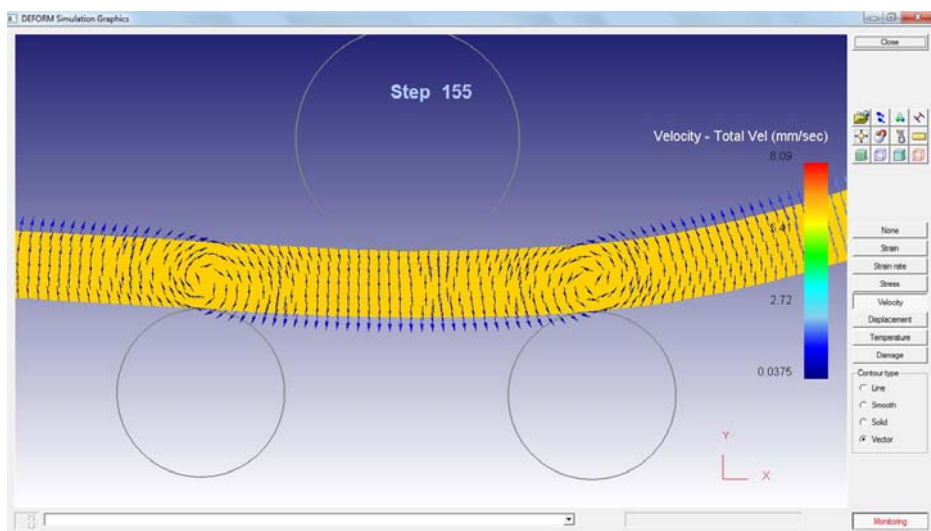


Рис. 39. Распределение интенсивности деформации по объему панели при гибке на опорах в зависимости от скорости перемещения инструмента на шаге 155 мм

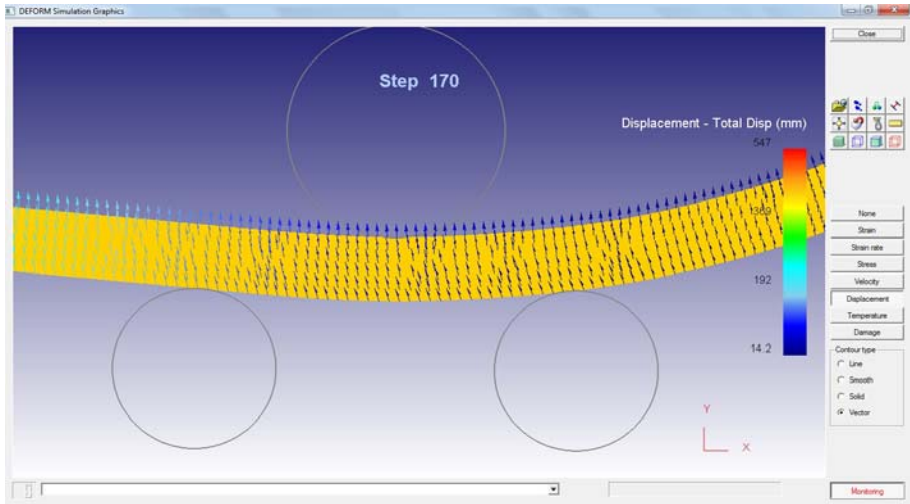


Рис. 40. Распределение интенсивности деформации по объему панели при гибке на опорах в зависимости от скорости перемещения инструмента на шаге 170 мм

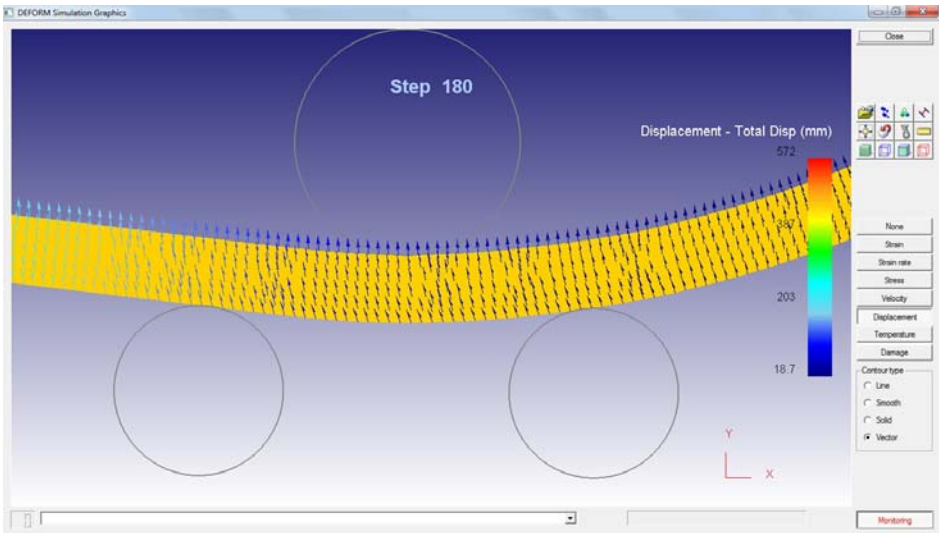


Рис. 41. Распределение интенсивности деформации по объему панели при гибке на опорах в зависимости от скорости перемещения инструмента на шаге 180 мм

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены вопросы теории и практики изготовления монолитных элементов конструкций авиационной и космической техники, характеризующихся широким применением в летательных аппаратах. Приведены теоретические обоснования наиболее широко применяемых и эффективных методов формообразования и правки монолитных панелей и деталей по условиям специальных технологических решений, строгого соблюдения порядка операций и режимов обработки. Показана методика обоснования технологических операций, связанная с упругопластическим деформированием металла, неизбежным появлением в деталях остаточных напряжений и остаточных деформаций, изменяющих конфигурацию готовой панели и отклонения параметров её контура от теоретического.

Рассмотрена методика технологического анализа монолитных панелей на этапах проектирования летательных аппаратов. Показана методика и результаты расчётов напряженно-деформированного состояния панелей в процессах деформации, выполненных в условиях автоматизации проектирования технологических процессов формообразования панелей с использованием ЭВМ на базе современных программных продуктов.

## 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. Металловедение [Текст] / *А.П. Гуляев*. – М.: Metallurgy, 1986. – 544 с.
6. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов [Текст] / *Ю.М. Лахтин*. – М.: Metallurgy, 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. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов [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.: Metallurgy, 1983. – 527 с.
11. Безопасность производственных процессов [Текст]: справочник / под ред. С.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.
12. Намычкин, А.С. Техничко-экономические расчеты цехов листовой штамповки в дипломном проектировании [Текст] / *А.С. Намычкин, М.В. Лапшов, О.М. Шебуняева*. – Куйбышев: КуАИ, 1989. – 32 с.
13. Скворцов, Г.Л. Основы конструирования штампов для холодной штамповки [Текст] / *Г.Л. Скворцов*. – М.: Машиностроение, 1987. – 345 с.

Учебное издание

*Тлустенко Станислав Федотович*

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ ПАНЕЛЕЙ  
ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И МЕТОДИКА  
ВЫБОРА СХЕМ ДЕФОРМАЦИЙ И РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССОВ**

Учебное пособие

Редактор Т.К. К р е т и н и н а

Электронное издание

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

---

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