Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. А.Н. ТУПОЛЕВА

Н.М.БОДУНОВ, Г.В.ДРУЖИНИН, А.А.РАЗДАЙБЕДИН

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОБОРУДОВАНИИ С ЧПУ

Учебное пособие

Рекомендовано к изданию Учебно-методическим центром КГТУ им. А.Н. Туполева

Казань 2008

УДК 621.981: 621.983.4

Бодунов Н.М., Дружинин Г.В., Раздайбедин А.А. Формообразования профильных деталей на гибочно-растяжном оборудовании с ЧПУ: Учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. 94 с.

ISBN 978-5-7579-1224-0

Рассмотрены физическая сущность и основные закономерности процессов гибки с растяжением профильных деталей. Дано описание методики проектирования процессов пластического формообразования деталей на гибочно-растяжном оборудовании с программным управлением, а также обзор современных разработок по этой тематике. Методика расчета дается в виде, удобном для реализации на ПЭВМ в САПР технологических процессов заготовительно-штамповочного производства.

Предназначено для студентов авиационных специальностей 160201 «Самолето- и вертолетостроение». Пособие может быть полезным при курсовом и дипломном проектировании.

Табл. 4. Ил. 14. Библиогр.: 25 назв.

Рецензенты: канд. техн. наук Б.И.Найшулер (ОАО «КНИАТ»); канд. физ.-мат. наук доц. В.Г.Низамеев (Казанский государственный архитектурно-строительный университет)

ISBN 978-5-7579-1224-0

© Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008

© Н.М.Бодунов, Г.В.Дружинин, А.А.Раздайбедин, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей в области заготовительно-штамповочного производства (ЗШП) в отраслях авиационной промышленности является резкое снижение трудоемкости изготовления деталей за счет сокращения или ликвидация объема ручных доводочных работ, повышения уровня механизации и автоматизации путем внедрения гибких производственных комплексов.

Решение этих задач связано с созданием эффективных схем технологических процессов и специализированного оборудования, базирующихся на управлении деформацией на всех этапах формообразования, что требует создания систем автоматизированного управления процессами. Широкое применение систем программного управления в процессах и оборудовании обеспечивает высокую стабильность процессов формообразования и является технологическим гарантом высокого качества деталей.

В настоящее время особую значимость приобретают вопросы автоматизированного проектирования при создании гибких автоматизированных систем, от решения которых зависит как время запуска новых изделий, так и их качество. В области ЗШП решение этих задач возможно путем создания систем автоматизированного проектирования технологии и оснастки (САПР ТПО ЗШП).

Научную базу расчета процессов формообразования профильных деталей составляет теория пластичности и ее приложения.

Применение научно обоснованных численно-аналитических методов позволяет оперировать сложными многофакторными описаниями процессов, отвечающими требованиям адекватного математического моделирования. При разработке технологических процессов наряду с выполнением расчетов необходимо решать многовариантные проектные задачи. Каждая такая задача имеет множество решений, которые в различной степени удовлетворяют критериям оптимального проектирования. Оптимальному решению соответствует минимум или максимум некоторой функции, называемой целевой или оценочной. Применение математических методов линейного и динамического программирования упрощает поиск оптимального решения, позволяет производить не простой, а целенаправленный перебор вариантов.

Формообразование криволинейных профильных деталей осуществляется разнообразными методами пластического изгиба, среди которых значительное место занимают способы, основанные на пластическом изгибе с растяжением, позволяющие достигнуть высокой точности формообразования. Однако качество существенно зависит от управления процессом деформирования. При ручном управлении оборудованием результаты во многом зависят от опыта и квалификации оператора.

Внедрение в производство гибочно-растяжного оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) повышает точность изготовления деталей из профилей, повышает производительность труда и снижает технологическую себестоимость изделий, а также позволяет добиться полной повторяемости результатов и исключить субъективный фактор.

Эффективность оборудования с ЧПУ определяется степенью автоматизации подготовки управляющих программ, так как от точ-

ности решения этой задачи зависит точность проведения технологического процесса.

Комплексная автоматизация проектирования и изготовления технологической оснастки в ЗШП позволяет снизить технологическую себестоимость деталей в 3,5–4 раза.

Материал учебного пособия представляет собой систематизацию современных работ и методику моделирования процессов гибки на станках с программным управлением с целью автоматизации их проектирования в системе технологической подготовки производства.

Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ГИБКИ

1.1. Классификация криволинейных профильных деталей

Производство летательных аппаратов (ЛА) связано с изготовлением большого количества криволинейных деталей из профилей (рис. 1.1), которые применяются в основном в качестве элементов силового набора (шпангоуты агрегатов ЛА, окантовки нервюр крыла, силовые элементы мотогондолы двигателя, воздухозаборника и т.д.) [2–6, 9, 10, 15, 16, 21].

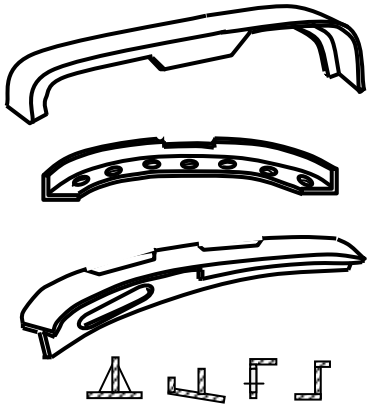


Рис. 1.1. Типовые криволинейные профильные детали ЛА

Современные авиационные конструкции проектируются из расчета минимального веса, что достигается максимальным приближением конструкций к равнопрочной. Это привело к значительному увеличению деталей переменного сечения. Кроме того, переменность сечения часто продиктована конструктивно-технологическими соображениями. Существуют несколько наиболее важных конструктивно-технологических признаков профильных деталей, определяющих выбор технологического процесса, оборудования и оснастки:

- тип профиля (прессованный, гнутый, катаный и пр.);
- тип сечения профиля (симметричность / асимметричность поперечного сечения профиля относительно плоскости изгиба);
- сечение профиля (простое или сложное);
- пространственность формы детали;
- направление изгиба;
- характер изменения сечения профиля по длине детали (непрерывное по известному закону, дискретное);
- характер изменения кривизны контура профильной детали (постоянная и переменная по длине);
- относительная кривизна детали;
- величина угла гибки;
- наличие малкованных участков по длине детали;
- наличие подсечек и их вид, отверстий;
- габариты детали.

Актуальность классификации деталей ЛА обусловлена разработкой в отраслях авиастроения систем автоматизированного технологического проектирования по основным видам производства.

Целью классификации тонкостенных деталей является формирование групп и видов деталей, обладающих общностью конструк-

тивно-технологических признаков и технологических задач их формообразования [16]. Вследствие этого задачи технологической подготовки производства решаются не для отдельных деталей, а для типовых представителей классификационных групп.

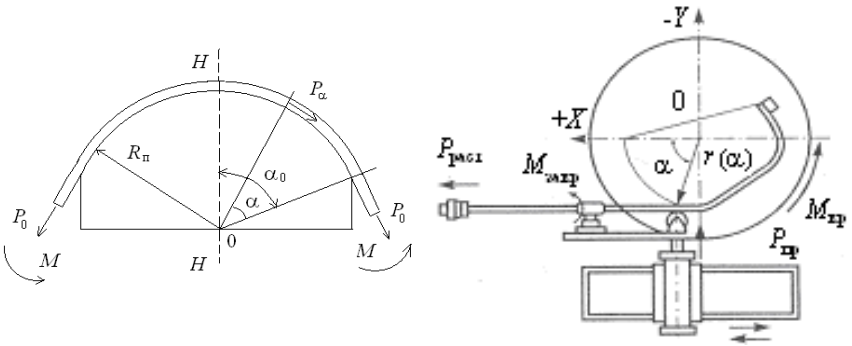
В результате внедрения в производство конструкторско-технологического кода изделия имеется существенное сокращение номенклатуры проектируемых технологических процессов и оснастки, создаются предпосылки типизации и оптимизации технологических решений, использования САПР ТПО.

1.2. Анализ возможных схем процессов гибки с растяжением

Технологические процессы изготовления тонкостенных деталей из листов и профилей отличаются широким многообразием способов формообразования, которые определяются видами оборудования, инструмента, оснастки, силовой схемой нагружения и т.д. [1, 2, 5, 9–16, 21, 24, 25 и др.]. Кроме анализа существующих процессов в указанной литературе приведены методики расчета технологических параметров исследуемых процессов, а также рассматриваются перспективные направления совершенствования существующих и разработки новых методов формообразования деталей из листов и профилей, основанные, в первую очередь, на повышении точности режимов формообразования, уровня механизации и автоматизации работ.

Для изготовления средне- и крупногабаритных деталей из профилей переменного сечения и кривизны (рис. 1.1) наиболее точным и высокомеханизированным способом является изгиб с растяжением, реализуемый в схемах обтяжки на станках типа ПГР (рис. 1.2,*а*) и в схемах гибки намоткой на станках типа СПО (рис. 1.2, *б*). Про-

цессы формообразования осуществляются путем пластического изгиба с растяжением заготовки по оправке (гибочному пуансону) определенной кривизны. Сочетание пластического растяжения и изгиба по сравнению с простым изгибом создает более однородное по сечению напряженное состояние. В результате уменьшается влияние пружинения на кривизну детали, эффект закрутки и потери устойчивости сжатых зон сечения профиля, что повышает точность процесса формообразования.



а *б*

Рис. 1.2. Основные способы формообразования деталей из профилей изгибом с растяжением

Специальные профилегибочные растяжные станки типа ПГР-6, ПГР-7, ПГР-8 и др. предназначены для формообразования деталей методом обтяжки по оправке с растяжением заготовки по той или иной схеме сложного нагружения.

Идентичные по принципу действия модели станков имеют различные мощности и различные габариты изготавливаемых деталей.

Специальные профилеобтяжные станки СПО-40 и СПО-16 предназначены для формообразования деталей методом намотки на оправку с растяжением заготовки усилиями 40 и 16 т соответствен-

но. Расчет силовых параметров процесса и кинематики основных узлов требуется при выборе модели станка и при оценке возможности изготовления какой-либо конкретной детали на станке определенной модели. Процессы гибки-намотки отличаются от известных способов гибки возможностью дополнительного воздействия на заготовку в активном очаге деформации или в непосредственной близости от него (рис. 1.2, *б*). К дополнительным воздействиям относится закрутка заготовки в непосредственной близости от гибочной оснастки и раскатка роликом в процессе гибки профильной заготовки.

Способ гибки-намотки применяется для изготовления криволинейных деталей с малыми радиусами из тонкостенных листовых профилей ($\bar{\rho}_0 = \rho_0 / H < 5$, ρ_0 – радиус кривизны нейтрального слоя, H – высота профиля), деталей с большими углами охвата (более 180^0 и до 320^0) и с большими углами малки. В отличие от других методов данная схема позволяет получать профильные детали с несимметричным относительно плоскости изгиба сечением.

Существует несколько схем ведения процесса гибки-намотки в зависимости от требуемого результата, геометрии заготовки, ее механических и физических свойств (рис. 1.3). Рассмотрим кратко эти схемы [5, 16].

На рис. 1.3,*а* приведена самая простейшая схема, при которой изгиб заготовки осуществляется поперечной силой, передаваемой через ролик, растягивающего усилия нет. Данная схема отличается простотой, но является наихудшей с точки зрения точности изготовления деталей.

На рис. 1.3,*в* показана схема намотки с растяжением заготовки, которая обеспечивает достаточно высокую точность получаемой

детали. В этой схеме необходимо в ряде случаев учитывать нелинейность неотформованного участка заготовки.

Если не учитывать этого фактора, то вследствие кривизны неотформованного участка будет неприлегание заготовки в нужной точке пуансона (появляется угол технологической недоформовки), что приводит к недогибу профиля, а в случае изготовления деталей переменной геометрии (по кривизне и поперечному сечению) – к неточному изготовлению детали.

Необходимость дополнительного объема ручных доводочных работ увеличивает себестоимость изготовления детали.

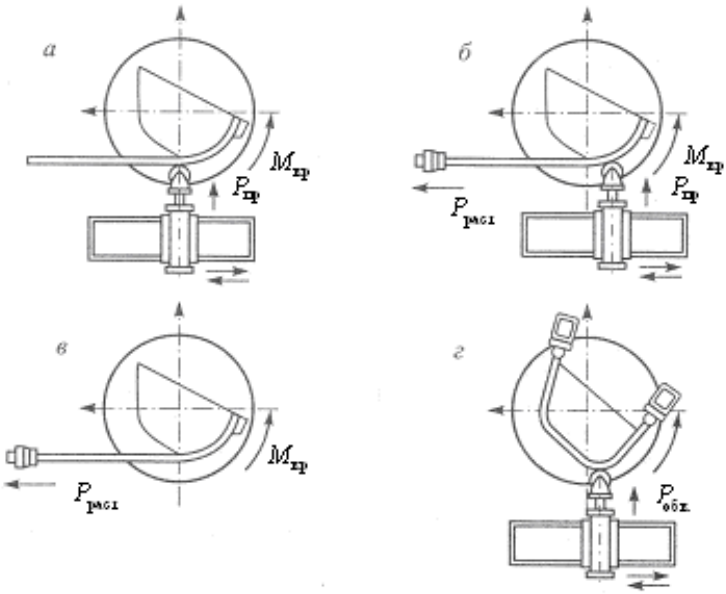


Рис. 1.3. Малокомпонентные схемы нагружения заготовки при гибке-намотке: *а* – простая гибка-намотка; *б* – гибка-намотка с растяжением и прижимом; *в* – гибка-намотка с растяжением; *г* – калибровка растяжением и обкаткой

Рис. 1.3,*б* иллюстрирует сложный, но в то же время точный процесс гибки-намотки. Помимо растяжения заготовки имеется прижимной ролик, который производит калибровку заготовки в очаге деформации. Прижимая заготовку к пуансону, ролик минимизирует также явление нелинейности, что повышает точность получаемой детали. Однако в этой схеме появляется дополнительный параметр для расчета, что усложняет процесс разработки управляющих программ для управления процессом гибки-намотки. Процесс формообразования по данной схеме осуществляется путём намотки предварительно растянутой заготовки на пуансон и одновременной обкатки роликом.

Наличие прижимного ролика позволяет предохранить сечение профиля от возможной потери устойчивости от сжимающих напряжений в поперечном направлении (рис. 1.4).

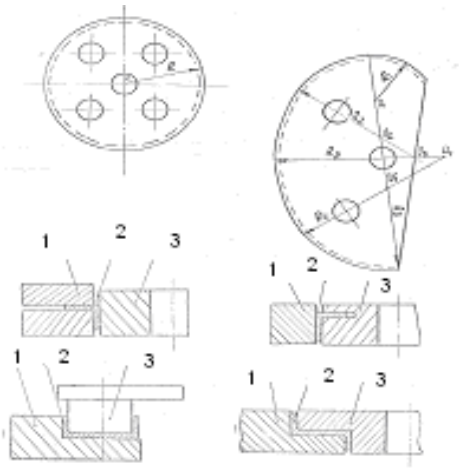


Рис. 1.4. Эскизы гибочной оснастки и инструмента:
1 – гибочный пуансон; *2* – заготовка; *3* – прижимной ролик

На рис. 1.3,*г* показана схема, позволяющая реализовать калибровку растяжением с обкаткой роликом уже согнутой детали.

Наиболее эффективная схема гибки-намотки, где дополнительно используется фильерное устройство изображена на рис. 1.2,*б*. Возможность закручивать заготовку в осевом направлении существенно облегчает формообразование несимметричных профильных деталей. Для устранения деформации закрутки предполагается на участке между точкой контакта прижимного ролика с контуром гибочного пуансона установить фильерное устройство, с помощью которого частично устраняется прогиб и производится предварительная закрутка профиля в направлении, противоположном направлению наименьшего сопротивления.

Фильерное устройство позволяет избежать спиральности получаемой детали. Если этого не сделать, то при неточном вхождении профиля в ручей гибочного пуансона прижимной ролик будет сминать профиль, в результате можно получить неисправимый брак. Если нужно получить заданную спиралеобразную деталь, то с помощью фильерного устройства можно закручивать по программе заготовку. В схеме гибки-обтяжки такая возможность отсутствует и необходимо прибегать к дополнительным усилиям для получения детали без указанных недостатков.

Таким образом, схемы гибки-намотки позволяют производить комплексное (многокомпонентное) нагружение заготовки (см. рис. 1.2,*б*), а также одно-двухкомпонентное нагружение (см. рис. 1.3). По схеме рис. 1.2,*б* можно в течение одного цикла одновременно производить гибку с растяжением и с раскаткой, а также закрутку и, если это необходимо, производить тем же роликом и заданную малковку профиля. Тем самым сокращается время изготовления детали, т.е. увеличивается производительность труда.

Всем приведенным методам гибки с растяжением присуще явление упругого восстановления материала (пружинение), учет которого при проектировании гибочной оснастки и при определении параметров процессов гибки обусловливает точность формообразования (рис. 1.5).

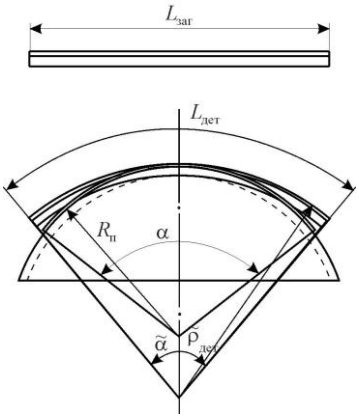


Рис. 1.5. Упругая отдача при гибке деталей из профилей

Учет пружинения заключается в том, что после снятия деформирующих усилий необходимо получить деталь с размерами, максимально приближенными к номинальным, которые заданы чертежом, плазом или математической моделью. В результате возникает прямая технологическая задача (определение по нагрузке получаемой формы детали) и обратная технологическая задача (определение нагрузки, формы технологической оснастки и формы заготовки).

Важнейшей задачей является решение основной технологической задачи (ОТЗ), под которой понимают определение всего комплекса параметров формообразования по заданной (остаточной) геометрии детали и механическим свойствам материала [2, 9, 15, 16]. В тех случаях, когда пружинение не может быть рассчитано с требуемой точностью, неизбежны ручные доводочные

работы, которые резко увеличивают трудоемкость изготовления деталей, их себестоимость.

При проектировании процессов автоматизированной гибки тонкостенных деталей решаются следующие задачи:

- аппроксимация по заданным координатам контура детали параметрическими сглаживающими сплайнами и расчет кривизны детали вдоль ее контура;

- определение величины пружинения и учет его влияния на точность процесса;

- расчет геометрии формообразующей оснастки с учетом пружинения;

- расчет параметров настройки;

- расчет усилий формообразования и выбор оборудования;

- проектирование оптимального маршрутного технологического процесса;

- расчет перемещений исполнительных органов гибочного оборудования, формирование управляющей программы на входном языке ЧПУ и запись ее на программоносителе.

Многообразие возможных вариантов нарушения качества формообразования профильных деталей, в частности, погрешности изготовления, классифицируются следующим образом:

1) форма (серповидность, винтообразность, продольный прогиб, поперечный прогиб, изменение сечения на концах, волнистость, неплоскостность, загиб на концах, малкованность);

2) геометрические размеры (недогиб, перегиб радиусов закруглений, несоответствие угловых параметров, несоответствие линейных размеров);

3) дефекты поверхностей (трещины, вмятины, коррозия, риски, царапины, расслоение металла, забоины, шероховатость, нагар при гибке с нагревом);

4) изменения механических свойств (наклеп, изменение механических параметров, вариации внутренних напряжений).

Основными признаками являются отклонения формы, геометрических размеров, дефекты поверхностей, изменение механических свойств материала профиля. Разделение погрешностей по признакам формы (общего характера) и геометрических размеров является достаточно условным, так как визуально регистрируемые погрешности внешнего вида имеют соответствующие геометрические оценки отклонений. Основными объектами исследований являются геометрические размеры – отклонения реального контура полученной детали от номинальной кривой, реализованной в виде контурного шаблона или другого носителя информации. К дополнительно контролируемым параметрам относят дефекты поверхностей, а также изменения механических свойств. Указанные факторы определяют качество и условия осуществления процесса формообразования.

1.3. Особенности процессов гибки при простом и сложном нагружении

При теоретическом исследовании процессов пластического формообразования методами пластического изгиба с растяжением и построении математической модели различают в зависимости от последовательного приложения внешних нагрузок основные виды нагружения [2, 7, 9, 15, 16].

Простое нагружение. Характеризуется одновременностью действия и одинаковой закономерностью изменения во времени деформирующих сил и моментов, т.е. растяжение и изгибающий момент в сечении до конца активной стадии деформирования монотонно нарастают пропорционально одному параметру. Напряжен-

ное состояние заготовки однозначно определяется конечными (результирующими) деформациями от совокупного действия системы внешних нагрузок. Простое нагружение реализуется при гибке в штампах, свободной гибке и т.д.

Сложное нагружение. Характеризуется равномерным действием внешних нагрузок. Деформации, вызванные последующей нагрузкой, накладываются на ранее созданное деформированное состояние. Напряженное состояние определяется активными составляющими деформаций и отдельные волокна по высоте сечения заготовки могут испытывать знакопеременные пластические деформации. Так как принцип независимого действия сил в этом случае неприменим, напряжения в таких волокнах зависят от последовательности приложения внешних нагрузок, от истории процесса нагружения.

В зависимости от последовательности действия внешних нагрузок на практике применяются следующие основные разновидности сложного нагружения: изгиб с последующим растяжением (И–Р); растяжение с последующим изгибом (Р–И); растяжение с последующим изгибом и дальнейшим дополнительным растяжением (Р–И–Р).

Различают две разновидности схемы Р–И: при одноперехо́дном процессе свежезакаленная заготовка первоначально растягивается до определенной величины, затем при сохранении растягивающей силы производится изгиб по пуансону соответствующей кривизны; при двухпереходном процессе отожженная заготовка растягивается и изгибается, затем проходит вторичную термообработку (закалку), после чего калибруется на том же пуансоне дополнительным растяжением. Схема Р–И обладает существенным достоинством – управляемостью, т.е. в процессе формообразования можно контро-

лировать усилие предварительного растяжения. Точность процесса в данном случае определяется допуском на разброс механических свойств материала и размеров сечения профиля.

Как и предыдущая схема, схема И–Р также применяется при одно- и двух- переходном технологическом процессе. Заготовка первоначально изгибается на определенную кривизну по гибочному пуансону, а затем в изогнутом состоянии растягивается. По схеме И–Р можно получить более однородное, чем при нагружении Р–И, распределение результирующих напряжений и вследствие этого меньшую величину пружинения при одних и тех же значениях деформации растяжения и активного радиуса кривизны, т.е. И–Р допускает возможность гибки на меньший относительный радиус(рис.1.6). Однако из-за влияния трения заготовки об оснастку при последующем растяжении перечисленные преимущества практически сводятся на нет, особенно при больших углах охвата и средних длинах заготовки (см. рис.1.2,*а*).

Если сила растяжения с обоих концов профиля имеет значение P_0, а гибка совершается на угол $2\alpha_0$, то для обтяжного пуансона с радиусом кривизны $R_{\text{п}}$ сила растяжения в центральной зоне заготовки оценивается по формуле

$$P_\alpha(\alpha) = P_0 e^{-f\alpha},$$

где e – основание натурального логарифма; f – коэффициент трения пары поверхностей заготовка – пуансон.

Например, если $\alpha = \pi/2$ и $f = 0{,}2$, то $P_\alpha = 0{,}7P_0$. Чем больше угол гиба, тем существеннее по длине заготовки изменение силы растяжения. Вследствие этого реализация схемы И–Р является малоуправляемым процессом. Однако уменьшить степень влияния сил трения можно, применяя различные смазочные материалы,

а также используя специальные прокладки, обеспечивающие отсутствие сопротивления при относительном перемещении поверхностей профиля и пуансона.

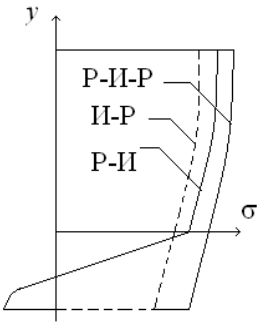


Рис. 1.6. Эпюры нормальных напряжений по высоте сечения при разных схемах сложного нагружения пластическим изгибом с растяжением

Схема сложного нагружения Р–И–Р является сочетанием первых двух схем сложного нагружения с различным сочетанием величин предварительного и дополнительного растяжения.

Так же, как и в случае сложного нагружения И–Р, при схеме Р–И–Р между деформирующейся заготовкой и пуансоном возникают силы трения, которые вносят элемент неуправляемости.

Как метод гибки-обтяжки профильных деталей за один переход эта схема широкого применения не получила в силу отсутствия до недавнего времени профилегибочных станков с ЧПУ, позволяющих обеспечить требуемые параметры формообразования с необходимой точностью.

1.4. Автоматизированный профилегибочный станок ПГР-6А

Высокие требования к качеству деталей ЛА, а также необходимость снижения технологической себестоимости их изготовления требуют применения объективных методов контроля за основными технологическими параметрами и автоматизации процессов. Глав-

ным технологическим параметром процессов гибки является деформированное состояние заготовки в процессе ее формообразования. Деформации определяют необходимое число переходов, точность и качество детали. Оптимальный технологический процесс должен обеспечивать необходимое (минимальное) число переходов с обеспечением требуемых деформаций во всех элементах заготовки и без превышения предельно допустимых деформаций в опасных сечениях. Реальное воспроизведение такого процесса возможно только на оборудовании, оснащенном средствами автоматизации. Все реальные процессы автоматизации можно объединить в три большие группы [1, 4, 14, 19, 22–24]:

- системы, в которых регулирование процесса основывается на данных непосредственного замера деформаций заготовки в опасных сечениях;

- системы с использованием принципов косвенного определения деформаций заготовки;

- системы программного управления гибочным оборудованием.

Применение оборудования с программным управлением является наиболее эффективным вариантом при автоматизации процесса гибки.

Профилегибочное оборудование (станки ПГР-6, ПГР-7 и др.) с ручным управлением не могут обеспечить необходимую точность гибки части номенклатуры деталей (деталей сложной формы) и, кроме того, требуют все более частой замены и ремонта изношенных механизмов и узлов. В связи с этим наметилась тенденция создания нового поколения профилегибочных станков, оснащенных средствами автоматизации процессов изгиба с растяжением, путем совершенствования конструкции станков и использования систем ЧПУ.

В настоящее время разработаны и внедрены в производство станки ПГР-6, ПГР-6АД, ПГР-7А с устройством числового программного управления 2Р32М, позволяющие автоматизировать процесс гибки. Станки оснащены датчиками линейных и угловых перемещений, приводы могут работать как по задаваемому давлению, так и по приращениям перемещений.

При работе станка ПРГ-6А (рис.1.7), например по схеме Р–И, концы изгибаемого профиля *3* зажимаются в зажимных патронах *4*, которые закреплены на штоках *5* растяжных гидроцилиндров *6*. Растяжные цилиндры шарнирно закреплены в каретках *7*, перемещающихся по направляющим (в зависимости от исходной длины заготовки) вдоль гибочных рычагов (крыльев) *8*. Гибочные рычаги находятся в исходном положении на одной оси, соединяющей центры их вращения (точки O_1). Затем включаются гидропривод растяжных гидроцилиндров и заготовка растягивается на определенную величину. Изгиб заготовки производится поворотом гибочных

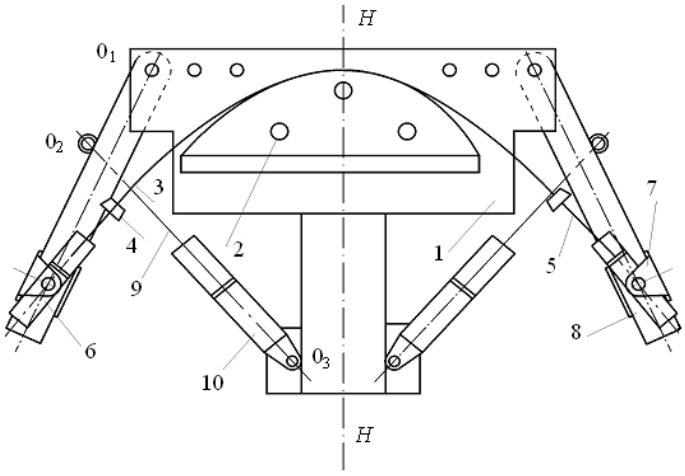


Рис. 1.7. Профилегибочный станок ПГР-6А с ЧПУ

рычагов относительно неподвижного стола *1*, на котором установлен и закреплен обтяжной (гибочный) пуансон *2* с помощью штоков *9* гибочных гидроцилиндров *10*, шарнирно соединенных с гибочными рычагами (точка O_2) и со станиной (точка O_3).

Информация об угловых и линейных перемещениях рабочих органов станка поступает в мини-ЭВМ через датчики обратной связи, датчики углов поворота растяжных цилиндров и гибочных рычагов, датчики перемещения штоков растяжных цилиндров. Сигналы с датчиков сравниваются с заданными в программе угловыми и линейными перемещениями.

Скорректированный в мини-ЭВМ сигнал подается на систему управления станка. Достоинством этого оборудования является возможность управления с высокой точностью величиной перемещения растяжных цилиндров и угловых перемещений гибочных рычагов (рис. 1.8).

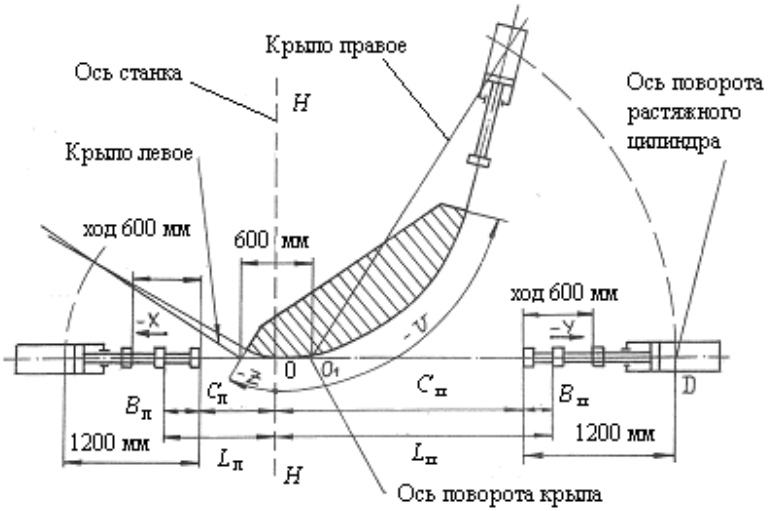


Рис. 1.8. Программируемые параметры к устройству ЧПУ станка ПГР-6А

В табл. 1.1 приведены технические данные и характеристики станка ПГР-6А. Режимы функционирования станка: выход в исходное положение; режим тестовых перемещений; отработка заданных приращений координат; режим "Обучение", в том числе и для симметричных деталей; режим "Автомат"; калибровка; рихтовка заготовок; гибка деталей с неоднозначной кривизной; программные преобразования массивов данных.

Таблица 1.1

Технические характеристики станка ПГР-6А	Значения параметров
Усилие растяжных цилиндров (регулируемое), кН	5-100
Расстояние между торцами патронов, мм: наименьшее (наибольшее), шаг	220/5600/110
Угол гибки детали (наибольший), град	180
Наибольший размер полки зажимаемого профиля, мм	50
Диаметр оправки (наименьший при 180 град), мм	600
Расстояние от стола до оси растяжных цилиндров, мм	150
Угол поворота крыла (наибольший), град	90
Угол поворота растяжного цилиндра (наибольший), град	30
Ход растяжных цилиндров (наибольший), мм	600
Скорость растяжения заготовки (наибольшая), м/мин	3
Управляющее устройство Программный носитель Количество программируемых координат	2Р32М п/л, ОЗУ 4
Дискретность отсчета программируемого перемещения, мм - угол изгиба детали, град - перемещение зажимного патрона, мм	 0,01 0,01
Длина заготовки, мм	500-5000
Время поворота крыла на 90 град (наибольшее), с	15
Габаритные размеры станка, мм	9310×7770×4760

Устройство ЧПУ 2Р32М относится к системам типа CNC и обеспечивает линейную и круговую интерполяцию дискретно заданных кривых. Техническая характеристика устройства ЧПУ дана в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Тип ЧПУ	CNC
Количество координат одновременно управляемых	4/3 линейная 4/2 круговая
Тип интерполяции	Линейная и круговая
Дискретность, мм	0,001 / 0,001
Ввод программы (код, п/лента, клав. пульт)	ISO
Объем памяти пользователя, Кбайт	6,5
Редактирование программы	есть
Язык программирования	ЯФП
Дисплей (монитор)	ИМГ-1-03
Подачи: рабочая, мм/мин	6÷6000
Коррекция: смещение " 0 "	Есть
Люфт по координате	Автоматическая компенсация
Подачи: % программы	10 % - 160 %
Процессор	МикроЭВМ
Потребная мощность, ВА	600

Управляющая программа кодируется в системе ISO и выводится в виде перфоленты. Отметим, что ЭВМ УЧПУ 2Р32М имеет достаточно отработанное и развитое программно-математическое обеспечение, допускающее возможность гибкого программирования функций обработки информации и управления, возможность сопряжения с внешними управляющими и вычислительными устройствами, выполнения функции диагностики.

Система управления станком ПГР-6А функционирует автоматически, причем оператор участвует в процессе работы только в

случае установления и снятия согнутого профиля, а также при управлении формообразованием в режиме "Обучение".

Управление станком может осуществляться как по жесткой, заранее заданной программе, так и адаптивно, с формированием управления в реальном времени в зависимости от результатов контроля текущего состояния изготавливаемой детали и значений параметров упругих деформаций узлов оборудования, измеряемых, например, с помощью дефометра. Результатом расчетов при аналитическом программировании является формирование программ перемещения рабочих органов в рабочем пространстве станка для обеспечения точности формообразования.

Формообразующим инструментом при гибке на станках ПГР и СПО являются гибочные пуансоны, спроектированные с учетом пружинения деформируемой заготовки при принятой схеме сложного нагружения. В зависимости от габаритов и механических свойств деформируемой заготовки обтяжные пуансоны могут быть металлическими (при формообразовании деталей из высокопрочных материалов) и неметаллическими (балинит, дельта-древесина) – для изделий из легких сплавов. Конструктивно они являются составными (рис. 1.9), включающими рабочую часть *1*, основание *2* и прокладку *3*, собранные на винтах и штифтах.

На точность деталей оказывает влияние правильная установка обтяжного пуансона на столе станка. Вершина пуансона должна лежать на оси растяжных цилиндров (в плане), а вспомогательная линия (или ось симметрии) совпадать с осью симметрии станка *НН* (см. рис. 1.7).

Для того, чтобы обеспечить при гибке свободный заход профиля в прорезь пуансона, его необходимо устанавливать на определенной высоте. Высота установки пуансона определяется сечением

профиля и видом обтяжки (одинарная или спаренная обтяжка двух профилей). Установка пуансона по высоте производится так, чтобы центр тяжести обтягиваемого профиля находился от поверхности станка на определенной высоте, что обеспечивает совмещение его с центром пневматического зажимного патрона.

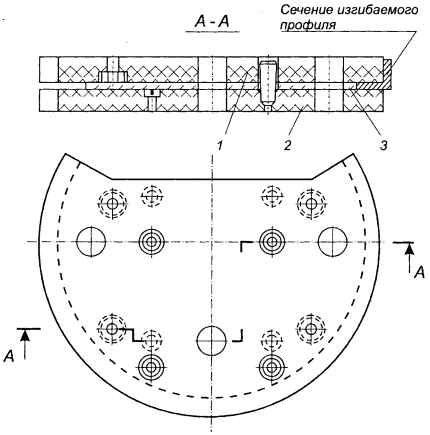


Рис. 1.9. Гибочный пуансон:
1 – рабочая часть, *2* – основание,
3 – прокладка

Точность изготовления профильных деталей обычно проверяют на универсальных контрольных плазах, которые представляют собой стол с отверстиями для установки и фиксации универсальных фиксаторов. Универсальные фиксаторы заранее устанавливаются на столе по шаблону готовой детали и крепятся болтами. Контур пуансонов следует выполнять по шаблону детали с учетом упругой отдачи. При изготовлении пуансонов для определения положения крепежных отверстий применяется специальный шаблон стола, на котором нанесены ось стола станка и сетка центров установочных и крепежных отверстий, имеющихся на столе станка.

Дополнительно выделим ряд условий нормального функционирования профилегибочного станка с ЧПУ. К используемым спосо-

бам начальной настройки станка можно отнести способы настройки по давлению, координатам и пределу текучести.

Применяемые локальные системы стабилизации:

- система стабилизации температуры рабочей жидкости;
- использование направляющих элементов кулачков патрона;
- использование доводочного устройства прикатки (для станков, оснащенных доводочным раскатным устройством);
- смазывание рабочей поверхности пуансона.

Устройства аварийной защиты и диагностики:

- автоматическое ограждение;
- диагностика неисправностей;
- диагностика рассогласования фактических и заданных перемещений.

Пульт индикации работает в режимах сообщения о выполняемых командах, выдачи геометрической информации, сообщении об отклонениях от нормального режима гибки.

Рассмотрим разновидность процесса сложного нагружения Р–И–Р. Это растяжение–изгиб–растяжение с дифференцированным по углу охвата приложением растягивающей силы (Р–И–Рд). Преимущество этого вида нагружения заключается в том, что на каждом из отдельных участков детали можно добиться гарантированных значений величины предварительного и дополнительного растяжения и таким образом уменьшить степень неуправляемости силой вторичного растяжения. В отличие от ранее рассмотренных схем сложного нагружения данный процесс требует более высокой точности при задании усилий формообразования и реализуется только на профилегибочных станках ПГР-6А, ПГР-6АД (с доводочным раскатным устройством).

В процессе производственной эксплуатации выявлены основные преимущества станка ПГР-6АД с ЧПУ по сравнению со станками ПГР с ручным управлением:

1) расширенные кинематические и силовые возможности задания координатных, линейных и угловых перемещений, сил и моментов;

2) возможность формирования различных законов управления по координатам и силам в различных комбинациях;

3) возможность выбора параметров различных законов управления с тем, чтобы обеспечивалась устойчивость процесса формообразования;

4) реализация автоматического задания деформации предварительного растяжения;

5) реализация наиболее точного для малых углов гибки режима изгиб-калибровка, а для больших углов – комбинированных режимов;

6) возможность оптимизации параметров напряженно-деформированного состояния внешнего слоя профиля путем раскатки роликом доводочного устройства для уменьшения остаточных деформаций пружинения;

7) оперативное использование средств измерения и автоматического введения коррекции;

8) инвариантность к изменениям размерно-механических параметров заготовок и обтяжного пуансона за счет использования контурного силового адаптивного управления в условиях полной или частичной неопределенности о параметрах процесса;

9) возможность увеличения диапазона припуска на операции предварительного формообразования фрезерованием или обсечки на штампе;

10) возможность компенсации ряда частных погрешностей изготовления и установки формообразующего контура обтяжного пуансона при гибке в реальном времени;

11) реализация автоматического режима калибровки по перемещению с заданной скоростью;

12) использование независимого от внешних устройств гидравлического зажима-разжима профиля в патронах;

13) автоматическая диагностика рабочих органов, средств контроля и управления, устройства ЧПУ, своевременное прекращение процесса при возникновении аварийных режимов;

14) автоматизация ряда вспомогательных операций, таких, как поднятие ограждения, разжатие патронов и освобождение заготовки, выход в исходное положение;

15) повышенная производительность.

Недостатки:

1) высокая стоимость, большое подготовительное время (на тестирование, подготовку управляющей программы);

2) требование высокой квалификации оператора и технолога;

3) сложность ремонта.

Отметим, что стандартное программное обеспечение УЧПУ предполагает программирование траекторий в явном виде [2, 4, 6, 8]. Однако существует другой способ программирования, при котором законы движения получаются как решения дифференциальных уравнений при определенных начальных условиях. Интегрирование дифференциальных уравнений осуществляется в реальном времени шаг за шагом. Таким образом, программная траектория не рассчитывается заранее, а определяется рекуррентно, в процессе самого движения.

В работах [14, 16, 18] приведены результаты классификации, описания и исследования различных видов управления процессом формообразования на станках ПГР с ЧПУ. Показано, что управление может осуществляться по перемещениям (обобщенным координатам), по силам или моментам (обобщенным силам), комбинированно. Определены оценки и ограничения ряда параметров процесса управления.

1.5. Задачи диагностики и контроля за состоянием процесса формообразования деталей на гибочно-растяжном оборудовании

Одной из важных задач применения систем контроля процесса гибки с растяжением является обеспечение требуемого уровня технологической надежности. Нарушение устойчивости процесса формообразования может привести к браку изготавливаемых деталей, а также к поломкам узлов профилегибочных станков ПГР.

Среди наиболее существенных и часто встречающихся причин нарушения нормального процесса формообразования выделим следующие:

- обрыв детали;
- утонение детали, превышающее допустимое;
- врезание кромок зажимного патрона в пуансон или в заграждение;
- недопустимо большие пластические деформации детали при работе с доводочным устройством;
- недопустимо большой износ или выгорание формообразующего контура пуансона;
- поломка пуансона;

- недопустимо большая погрешность углового положения детали в патроне;

- кручение детали при зажиме;

- кручение детали при гибке;

- отсутствие плавности хода гибочных цилиндров;

- перетягивание гидроцилиндрами друг друга;

- отсутствие прилегания заготовки к полке пуансона;

- режущее контактирование краев формообразуемого профиля и полки пуансона;

- несоответствие скоростей и линейных перемещений зажимных патронов и угловых перемещений крыльев.

К нарушениям собственно функционирования станка, не связанным с процессом формообразования, относят следующие отказы:

- рассогласование фактических и заданных координат (недопустимо большие погрешности отработки);

- протекание масла;

- неправильная установка кулачков в патроне; внезапное выключение гидропитания;

- погрешности выхода в исходное положение;

- падение давления в гидросистеме;

- вибрации при угловом перемещении крыльев.

К основным задачам диагностики состояния процесса формообразования относится:

- оперативное определение факта отклонения процесса формообразования от нормального режима;

- своевременный останов процесса;

- распознавание (идентификация) отклонения и сообщение оператору.

Своевременный останов дает положительный эффект в результате предотвращения аварийных ситуаций и вытекающих из них вторичных эффектов, например, ударного контактирования детали с элементами заграждения после обрыва профиля, попадания посторонних предметов и частиц между поверхностями профиля и обтяжного пуансона и других.

Профилегибочный станок ПГР-6АД с ЧПУ 2Р32М оснащен датчиками линейных и угловых перемещений, датчиками давления, средствами вычисления и обработки информации в реальном времени, имеются режимы технического останова и блокировки приводов, выдачи сигналов на средства индикации.

К числу специальных измерительных преобразователей можно отнести тензометрический винт-датчик, используемый в качестве постоянного винта крепления прижимной колонки.

В работе [14] предложены технические решения, которые направлены на обеспечение функциональной устойчивости и надежности процесса формообразования:

- микропроцессорное устройство диагностики аварийных режимов, реализованное на базе пристроенного средства измерения тензометрического типа;

- устройство регистрации присутствия оператора в рабочей зоне (на базе средств технического зрения, установленного над профилегибочным станком);

- устройство контроля утонения полки профиля на критически малых углах гибки (на базе СТЗ);

- устройство контроля проскальзывания внутреннего слоя профиля относительно контура пуансона (на базе контактирующих элементов дискового или игольчатого типа).

Использование указанных технических решений позволяет повысить надежность и безопасность работ при изготовлении особо ответственных деталей, а также при формообразовании на малых радиусах гибки.

Целями измерительных процедур, которые в общем случае определяются самим технологическим процессом, могут быть:

- проверка качества изготовления;
- оптимальное отрезание детали в соответствии с шаблоном;
- формирование коррекции уровня настройки оборудования;
- диагностика процесса гибки; коррекция обтяжных пуансонов (формирование программы доработки для фрезерного станка с ЧПУ);
- измерения на станке;
- координаты гибки по заданной силе (давлению) в режиме "Обучение";
- измерение силы (давления) в режиме "Автомат";
- возможная дополнительная информация (для проектирования);
- уход гидравлического нуля; контроль теплового поля нагреваемой детали (в случае гибки с нагревом);
- регулирование расстояния между центрами вращения гибочных крыльев.

Порядок, общие требования и другие параметры контроля, а также используемые средства измерений в авиационной промышленности устанавливаются при разработке технических требований на выпускаемое изделие. В процессе изготовления профильных деталей согласно техническим условиям на изготовление ЛА используют обычные стандартизированные средства измерения и контроля. Возможно применение автоматизированных средств кон-

троля как выходных параметров формообразования, так и различных возмущающих факторов.

Анализ классов точности или допустимых погрешностей применяемых средств измерения и контроля в сравнении с нормируемыми погрешностями формообразования показывает, что предельные погрешности средств измерения и контроля на один - два порядка меньше, чем допускаемые погрешности формообразования. Таким образом, запас точности измерений является вполне достаточным для обеспечения эффективности выходного контроля.

Принятие решений о каких-либо корректировках режимов гибки должно основываться на информации о состоянии системы станок–оснастка–деталь. В связи с этим встает вопрос об измерении текущих значений параметров формообразования и генерировании управляющих воздействий для названной технологической системы. Критериями годности детали являются показатели точности ее геометрических размеров и механические свойства. В конечном итоге и геометрия, и механические свойства детали зависят от созданных в ней деформаций. Поэтому контролировать в процессе формообразования следует именно их.

Контроль в смысле инспектирования предполагает измерение величин деформаций в наиболее опасных сечениях с целью выдерживания этих величин в пределах допускаемых для данного материала заготовки значений.

Контроль в смысле управления подразумевает действия, связанные с целенаправленным изменением режимов обработки за счет наложения на заготовку кинематических ограничений или дополнительных силовых воздействий [14, 16, 21–24].

К числу кинематических параметров относятся: длина дуги детали, кривизна контура, крутка, овальность, малка.

Силовые параметры – это усилие растяжения, изгибающий момент, поперечная сила и крутящий момент.

При назначении предельно допустимой величины деформации [ε] следует руководствоваться следующими критериями: отсутствие разрушений, устойчивость при нагружении, сохранение мелкозернистой структуры, качество поверхности и др. При этом каждому критерию соответствует своя величина [ε]. Наименьшая из них и будет являться предельно допустимой величиной деформации для данного материала [16].

Делая выбор между прямым и косвенным управлением процессом формообразования, следует учитывать такие факторы, как техническая достижимость, экономическая целесообразность, стабильность процесса при наличии возмущающих факторов, охват широкой номенклатуры деталей, простота технологической оснастки и ряд других факторов. В ряде случаев косвенное управление оказывается вполне оправданным (требуемая деформация растяжения при гибке профилей поддерживается за счет постоянства давления в гидроцилиндре). Однако при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать прямому методу управления процессом гибки.

В настоящее время формообразующее оборудование слабо оснащено системами программного управления, так как они весьма дороги и предъявляются повышенные требования к кинематическим механизмам и силовым приводам технологического оборудования. Субъективный характер управления отрицательно сказывается на качестве изготавливаемых деталей и затрудняет процесс сертификации. Поэтому приемлемым выходом из такой ситуации могут стать системы компьютерного контроля за процессами формообразования. Они являются промежуточным этапом на пути

к программному управлению и легко встраиваются в действующее производство, повышая его общий уровень и культуру. Эти системы предназначены для получения в режиме реального времени объективной информации о деформированном состоянии заготовки в процессе ее формообразования.

В работе [16] приведена система компьютерного контроля и прогнозирования деформаций при гибке профильных деталей на станках типа ПГР, которая позволяет оператору наиболее рационально вести процесс гибки.

Глава 2. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ГИБОЧНО-РАСТЯЖНОМ ОБОРУДОВАНИИ

2.1. Математическая модель и ее понятие

При использовании математических методов для анализа процессов пластического формообразования профильных деталей необходимо математическое описание этого процесса, что будем называть математической моделью. Сложный характер явлений, присущих пластическому формообразованию, требует построения сложных и достаточно точных математических моделей, учитывающих специфику нагружения заготовки при выбранной схеме формообразования и другие особенности рассматриваемых процессов. В дальнейшем для определенности под математической моделью технологического процесса условимся подразумевать приближенное описание этого процесса, позволяющее найти распределение скоростей, деформаций, температур, напряжений, рассчитать вероятность разрушения металла и определить оптимальные условия его деформирования.

В связи с достаточно полной разработкой методов решения задач обработки металлов давлением (ОМД) и накоплением большого количества алгоритмов и программ актуальным становится пе-

реход к следующей стадии разработки теории ОМД. Ее основой должна стать теория управления и оптимизации.

Применение методов теории управления системами с распределенными параметрами позволяет поставить задачу об оптимизации в некотором смысле (например, по производительности, точности геометрии, качеству поверхности и т.д.). При этом особую ценность представляют те разработки, где применяются алгоритмы динамического программирования, заключающиеся, в частности, в обратном рассмотрении *n*-шагового процесса, т.е. с его конца. Это позволяет, исходя из технических требований к качеству готовой продукции, пройти все этапы обработки заготовки в наиболее оптимальном режиме, а не методом проб и ошибок.

Процесс создания математической модели условно можно разделить на ряд основных этапов:

- построение математической модели;

- постановка, исследование и решение соответствующих вычислительных задач;

- проверка качества модели на практике и модификация модели.

Модель должна быть достаточно полной, для того чтобы оказаться полезной для изучения свойств исследуемого явления. В то же время она обязана быть достаточно простой, для того чтобы допускать возможность ее анализа существующими в математике средствами и ее реализации на ПЭВМ с помощью алгоритмов, которые при минимальных затратах машинного времени позволяли бы получать решение поставленной задачи с достаточной точностью. Из огромного числа характеристик явления и действующих на него факторов требуется выделить основные, определяющие, отбросив при этом второстепенные, несущественные.

В любом прикладном исследовании математическая модель – приближенное математическое описание, которое является ключом к успеху. Таким образом, надо уметь строить модели, т.е. описывать на языке математики те или другие процессы по возможности просто, уметь ограничиваться минимально необходимым числом параметров.

Проектирование и отладка технологии формообразования тонкостенных деталей из листов и профилей на гибочно-растяжном оборудовании достаточно трудоемкий процесс, осуществляемый квалифицированными специалистами с использованием дорогостоящего материала и оборудования. Причем, как правило, выбор наилучшего варианта ограничен небольшим числом экспериментов.

Математическое моделирование позволяет заменить натурные испытания более дешевым компьютерным моделированием. Для производственных условий необходимо использовать системы математического моделирования, сочетающие в себе надежность и оперативность.

В производственных условиях технолог, даже в ущерб точности, отдает предпочтение методам, которые позволяют ему в ограниченные сроки оценить различные варианты технологии и помогают принять наиболее эффективное решение. С этой целью (и удовлетворяя условиям производства) создаются системы математического моделирования процессов формообразования тонкостенных деталей на гибочно-растяжном оборудовании.

2.2. Информационные и статистические особенности формообразования профильных деталей

В процессе формообразования деталей на гибочно-растяжном оборудовании с ЧПУ приходится сталкиваться с рядом противоре-

чий при обеспечении требуемых конструкционных и технологических параметров (точность, производительность, экономичность и надежность). Сам процесс гибки можно квалифицировать как неустойчивый и трудно управляемый процесс. При изготовлении партии деталей, при переходе от одной партии к другой изменяются статистические выходные параметры результатов гибки (погрешности положения и формы поверхностей), параметры модели образования погрешности и модели управления, оценки целевой функции и локальных критериев процесса.

В общем случае формообразование профильных деталей гибкой с растяжением является сложным процессом совмещенного пластического деформирования, который в силу своей природы может быть представлен в виде детерминированно-стохастической модели с параметрами, изменяющимися в пространстве и времени [2, 14]. Природа объекта исследования проявляется в наложении стохастических составляющих возмущений на процесс собственно пластического деформирования.

На этапе составления математического описания выделяют основные элементы в объекте и устанавливают связи между ними, формализуют математическую модель, после чего выбирают наиболее эффективный метод решения, реализуемый в виде программы для ПЭВМ. Далее проводят оценку адекватности математической модели. Непосредственно для процесса пластического деформирования может быть предложено достаточно точное для конкретных условий математическое описание. Необходимо учитывать, что влияние стохастических факторов может привести к изменению параметров и структуры математической модели процесса формообразования, что вызывает потребность применения методов идентификации и адаптивного управления.

Определяющие процесс гибки с растяжением параметры, разделяют на три группы: входные, функциональные и выходные (управляемые). В свою очередь, входные параметры подразделяются на задаваемые, стабилизируемые, параметры контроля и управления, на контролируемые и неконтролируемые возмущающие.

К задаваемым параметрам относятся механические свойства материала заготовки, геометрия носителя информации (гибочного пуансона), ориентация профиля относительно пуансона, требования по точности и качеству, геометрические параметры станка ПГР, параметры наладки рабочих органов и другие.

К стабилизируемым параметрам относятся параметры локальных контуров стабилизации: температура рабочей жидкости, параметры коэффициента трения для применяемой смазки, задаваемое усилие раскатки, число проходов при использовании доводочного раскатного устройства.

К параметрам контроля и управления относятся давление в полостях растяжных самоустанавливающихся гидроцилиндров или на выходе соответствующих датчиков, измеряемые перемещения зажимных патронов, угол наклона касательной к формообразующему контуру обтяжного пуансона, величина калибрирующей деформации, скорости перемещения рабочих органов. Эти параметры допускают их непосредственное измерение или вычисление перед обработкой партии деталей, в процессе формообразования или ретроспективно.

К возмущающим параметрам относятся контролируемые и неконтролируемые возмущающие (влияющие) параметры (факторы), например, такие, как износ формообразующего контура обтяжного пуансона, люфт подшипников крыльев, изменения температуры заготовки, пуансона и окружающей среды, размерно-механические

параметры заготовки, погрешность установки обтяжного пуансона и другие.

В общем случае возмущающие параметры могут быть описаны совокупностью детерминированной, функциональной коррелированной и случайно некоррелированной составляющих. Систематическими возмущающими параметрами могут быть износ контура обтяжного пуансона, изменение его температуры при гибке с нагревом, падение давления на выходе датчиков. Случайными параметрами могут быть, например, вариации размеров поперечного сечения заготовки после предварительного фрезерования или обсечки на штампах, усилие фиксации пуансона в нулевой точке станка.

Процесс формообразования гибкой с растяжением достаточно полно может быть описан с использованием параметров относительного удлинения, напряжений и деформаций, упрочнения внешнего слоя профиля, а также параметров, относящихся к физико-механическому состоянию формообразуемого участка профиля. К последним можно отнести интегральные характеристики, такие, как энергию деформирования, глубину упрочнения, плотность структурных дислокаций.

К числу выходных параметров относятся показатели точности формообразования, качество поверхностного слоя, надежность, производительность и экономичность функционирования станка.

Детерминированно-стохастический процесс формообразования профильных деталей на станках ПГР может различаться по уровням априорной неопределенности.

К уровню полной априорной неопределенности относится состояние отсутствия информации о законах и численных значениях распределения исходных возмущающих факторов.

К уровню частичной неопределенности можно отнести состояние, в котором известны лишь законы распределения возмущающих факторов и имеется только приблизительная информация о качественной стороне процесса.

К уровню частичной определенности относится состояние процесса, при котором имеется информация о количественных соотношениях, описывающих законы изменения возмущающих факторов.

При полной априорной определенности имеется весь объем информации о статистических параметрах и законах распределения возмущающих факторов.

В производственных условиях при изготовлении профильных деталей на станках ПГР информация о процессе задается с помощью данных, имеющихся на плоскости контурного шаблона и в технологии изготовления, где указывается только вид оборудования, марка материала и размеры заготовки, даются некоторые рекомендации по выбору вылетов зажимных патронов. Только для особо ответственных профильных деталей указывают проценты относительных деформаций или номинальное давление в растяжных гидроцилиндрах.

Практически процесс гибки очередной партии заготовок производится в условиях полной или частичной неопределенности. В частности, при формообразовании сложных деталей на станках ПГР с ручным управлением важную роль играет мастерство, личный опыт и интуиция рабочего.

Вместе с тем изготовление деталей на станках ПГР с ЧПУ позволяет неограниченное число раз воспроизводить отлаженную управляющую программу формообразования по перемещениям, инвариантную к большой доле доминирующих возмущающих факторов.

Свойство слабой зависимости от влияния возмущений может быть усилено применением адаптивного комбинированного управления и выбором оптимальной последовательности приложения нагрузок.

2.3. Показатели качества и оптимизация процесса формообразования на профилегибочном станке

Одним из критериев качества функционирования является производительность, определяемая временем, затрачиваемым на процесс формообразования одной детали гибкой с растяжением (для станка ПГР-6А минимальное время формообразования в одном цикле составляет $T_{\min} = 15\text{с}$). Введем новый параметр – приведенное время, определяемое выражением $\overline{T} = T / T_{\min}$, где T – реальное время гибки с растяжением данной детали.

Условия процесса формообразования (такие, как переменный радиус кривизны формообразующего контура гибочного пуансона) опосредствованно, через управляющие параметры определяют оптимальное (по качеству) время формообразования конкретной детали. Для данной номенклатуры профиля и обтяжного пуансона с переменным радиусом кривизны объективно существует минимальное время гибки с растяжением, причем в силу априорной неопределенности процесса формообразования целесообразно использование адаптивных процедур. Критерий оптимизации по качеству можно формализовать в нескольких возможных видах и относить как к конкретной детали, так и к партии деталей. В последнем случае можно применить математическое ожидание и дисперсию отклонений контуров деталей от эталонов – контурных шаблонов в выбранной системе отклонений. При формализации крите-

рия для конкретной детали можно использовать наибольшее отклонение радиуса кривизны детали от номинального радиуса и другие параметры. Возможна формализация критерия качества по отношению к другим погрешностям формы, таким, как гофрообразование, закручивание, утонение, серповидность.

В качестве непараметрического технологического критерия можно использовать критерий минимального времени ручной доводки для партии деталей. При его формализации для недопустимых результатов "недогиба-перегиба" для соответствующих ориентаций профиля отклонения реального контура от контурного шаблона должны приводиться с масштабирующими коэффициентами, учитывающими временные затраты на ручную доводку. Это приводит к условию обеспечения дисперсии отклонений на заданном уровне и к некоторому изменению математического ожидания на постоянную величину, со знаком, учитывающим ориентацию профиля по отношению к пуансону.

В качестве обобщенного критерия процесса формообразования на профилегибочном станке ПГР может быть использована целевая функция процесса формообразования, имеющая вид квадратичной формы [2, 14]:

$$U = a_1\overline{T}^2 + a_2\overline{K}^2 + a_3\overline{D}^2,$$

где a_1, a_2, a_3 – приоритетные коэффициенты целевой функции; $\overline{K}$ – приведенный параметр качества; $\overline{D}$ – приведенный параметр ручной доводки.

Как отмечалось ранее, для устройства ЧПУ составляется управляющая программа, реализующая формообразование с максимальной вероятностью достижения заданного качества изделия. На управляющую программу накладывают ограничения, одни из которых детерминированы (например, ограничения, связанные

с возможностью оборудования), а другие носят вероятностный характер. Следовательно, управляющая программа удовлетворяет некоторым условиям, выраженным в виде неравенств, определяющих область допустимых функций управления U. Пусть некоторый управляемый технологический процесс обработки металлов давлением характеризуется n параметрами $\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_n$, связанными между собой функциональной зависимостью и однозначно определяемыми через m функций управления $U_1(t),U_2(t),\cdots,U_m(t)$ (t – время). Функции управления определяют программу деформирования, которая ограничена появлением некоторых признаков брака. Для заданной программы деформирования условие появления k-го признака брака можно представить [18] в виде функциональной зависимости $f_k\left(\lambda_1^*,\lambda_2^*,\cdots,\lambda_n^*\right)=C_k$ ($\lambda_1^*,\lambda_2^*,\cdots,\lambda_n^*$ – предельные технологические параметры; C_k – константы), а условие невозникновения этого признака – в виде зависимости $f_k\left(\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_n\right)<C_k$.

При холодном деформировании фактор времени не играет существенной роли, поэтому его можно исключить, представив функции управления в виде $U_2(U_1),U_3(U_1),\cdots,U_{m-1}(U_1)$.

Рассмотрим процесс гибки как объект управления. Входные параметры процесса условно разделим на неуправляемые (их нельзя изменить в процессе деформирования) и управляемые (целенаправленно изменяемые по ходу процесса).

К неуправляемым параметрам относятся механические характеристики материала заготовки, геометрические размеры заготовки и пуансона, условия трения, исходное положение заготовки относительно пуансона и некоторые другие. Эти параметры задаются, как было отмечено ранее, с некоторой степенью точности.

Управляемыми параметрами являются параметры оборудования, задающие положение и изменение положения краев заготовки относительно пуансона в процессе формообразования.

К выходным параметрам относятся геометрические и физико-механические характеристики детали и связанные с ними распределенные параметры, такие как остаточные деформации. Полученное поле деформаций определяет качество детали, поскольку от величины деформаций зависит вероятность появления таких признаков, как разрыв заготовки, недопустимое пружинение и другое.

Процесс гибки как объект управления в общем случае характеризуется тем, что выходные параметры определяются всей предысторией деформирования. Они связаны с параметрами управления сложной функциональной зависимостью, обладающей свойством нестационарности, т.е. изменяющей структуру функционала по ходу процесса. При гибке профильных деталей оптимальной будем считать такую управляющую программу, которая обеспечивает устойчивый процесс деформирования при определенных условиях (например, минимизация величины среднеквадратичного отклонения профиля от заданных размеров).

2.4. Математическое моделирование геометрических форм профильной детали

Автоматизация проектирования технологии и оснастки для изготовления профильных деталей методами пластического формообразования требует определенного математического описания геометрических форм рассматриваемых деталей. Необходимость такого моделирования обусловлена тем, что с этими моделями работают практически все основные модули САПР ТПО ЗШП: математический аппарат выбора или синтеза маршрутного технологи-

ческого процесса; конкретные математические модели технологических процессов; математический аппарат проектирования технологической оснастки.

Геометрические формы тонкостенных деталей (профили, листы) характеризуются следующими общими признаками: частичной и полной криволинейностью внешнего (внутреннего) контура или поверхности детали; частичным или полным сопряжением поверхности или контура детали с теоретическим обводом агрегата ЛА; переменностью параметров радиальных и меридиональных сечений деталей. В результате этого при разработке математической модели возникает необходимость математического описания криволинейного контура (поверхности) и геометрических параметров меридиональных (поперечных в случае профилей) сечений деталей. Здесь возможны два способа построения математической модели геометрических форм деталей [1, 2, 21, 22].

1) Решение задачи о математическом задании поверхности детали с последующим независимым решением задачи представления геометрических параметров сечения детали в виде условной развертки на плоскость, перпендикулярную плоскости изгиба, с целью описания переменных геометрических параметров сечений;

2) Совместное описание геометрических параметров поверхности (контура) и соответствующих поперечных сечений детали.

При построении математической модели детали всегда предполагается создание формализованного языка описания геометрии детали. При этом различают внешние и внутренние языки систем автоматизированного проектирования. В САПР ТПО ЗШП математические модели детали формируются в результате работы двух модулей: модуля согласования входной информации и модуля аппроксимации поперечных сечений.

Модуль согласования решает следующие основные задачи:

- анализ вида задания контура детали;

- определение параметров функционально заданной кривой;

- двухокружная аппроксимация функционально заданной кривой.

Модуль аппроксимации сечений решает задачи:

- ступенчатая аппроксимация плавно изменяющихся характеристик поперечного сечения;

- аппроксимация геометрии детали набором участков с постоянным радиусом и сечением на длине каждого участка.

Необходимость единой окружной аппроксимации криволинейных контуров и ступенчатой аппроксимации сечений обловлена тем, что во-первых, математический аппарат проектирования процессов пластического изгиба оперирует понятием кривизны контура [15, 16]; во-вторых, основная технологическая задача не решается в явном виде; в-третьих, для определения параметров формообразующей оснастки и заготовки деталей необходимо представление криволинейного контура в виде набора дуг окружностей определенного радиуса и длины. Решения, поставленных выше задач, дано в работах [1, 2, 21, 22].

2.5. Постановка основной технологической задачи

Основная технологическая задача (ОТЗ) по определению параметров технологического процесса, оснастки и заготовки при формообразовании профильных деталей методами гибки ставится следующим образом. Известна геометрия детали, которая может быть задана чертежом, плазом или математической моделью, т. е. известны функциональные зависимости, однозначно определяющие изменение радиуса кривизны и параметров поперечного сечения

детали по ее длине. Известны также характеристики механических свойств материала детали. Необходимо определить геометрические параметры инструмента, силовые параметры процесса, программируемые параметры к устройству ЧПУ и также размеры заготовки, чтобы при заданных допустимых величинах деформации получить в результате формообразования геометрию детали, равную заданной. Решение ОТЗ можно разделить на следующие этапы.

1) Анализ геометрии детали и выбор приемлемого процесса формообразования.

2) Анализ механики процесса пластического формообразования и выбор основных гипотез и допущений.

3) Определение напряженно-деформированного состояния заготовки детали.

4) Определение кривизны изогнутого элемента заготовки.

5) Выбор оборудования, определение силовых параметров процесса и геометрии инструмента.

6) Определение геометрических параметров заготовки детали.

7) Расчет программируемых параметров к устройству ЧПУ.

8) Анализ точности процесса.

Решение ОТЗ в данной постановке чрезвычайно важно, так как дает возможность создать стандартный пакет программ для каждого способа формообразования и класса деталей. Для использования такого пакета программ достаточно задать для ПЭВМ требуемую геометрию детали, точность формообразования характеристики механических свойств материала. Тогда на выходе системы будем иметь искомые силовые параметры процесса, геометрию инструмента и заготовки детали, программируемые параметры, причем пакет прикладных программ может функционировать локально, как системный модуль, или же в составе САПР ТПО ЗШП.

2.6. Методика математического моделирования процессов пластического формообразования

Процесс разработки математической модели процесса пластического формообразования достаточно сложен и трудоемок, поэтому целесообразно определить суть и алгоритм этапов ее создания. В общем случае разработка математической модели технологических процессов пластического формообразования профильных деталей в виде системно ориентированных модулей САПР ТПО ЗШП осуществляется по следующему алгоритму [2, 4].

На первом этапе проводится анализ геометрических особенностей детали, подлежащей формообразованию, существующих способов ее изготовления, методов расчета и т.д. В результате определяется наиболее приемлемый способ формообразования.

На втором этапе анализируется механика процесса, выбираются основные гипотезы и ограничения, осуществляется постановка задачи. Определяются исходные выходные данные.

На третьем этапе проводится теоретическое исследование процесса. Осуществляется выбор и обоснование метода решения поставленной задачи, доказательство однозначности и сходимости решения. Третий этап заканчивается разработкой методики расчета параметров процесса, геометрии оснастки и заготовки деталей.

На четвертом этапе путем эксперимента в лабораторных и производственных условиях удостоверяется правильность принятых допущений и определяется степень адекватности теоретических (расчетных) и экспериментальных (практических) результатов. В случае неуспешного исхода следует вернуться ко второму этапу и ввести соответствующие коррективы в ранее принятые гипотезы и ограничения. При необходимости следует скорректировать методику расчета.

Содержание пятого этапа заключается в обобщении теоретического решения методики расчета, распространении его на определенный круг объектов исследования (это могут быть виды материалов, типы поперечных сечений детали т.д.). Данный этап заканчивается формализацией задачи и разработанной модели процесса в виде алгоритма программ для ПЭВМ.

На шестом этапе по разработанному алгоритму составляется программа или комплекс программ на одном из алгоритмических языков высокого уровня. При этом программы сразу же ориентируются на работу в составе САПР, поэтому структурно они организуются в виде системного модуля. На этом этапе осуществляется увязка информационных связей по входу и выходу между программными единицами системного модуля с соответствующими модулями САПР.

Целью седьмого этапа являются опытно-промышленные испытания системного модуля, а соответственно и математической модели исследуемого процесса в производственных условиях. В ходе испытаний осуществляется корректировка, уточнение при необходимости отдельных программных единиц модуля, окончательная отладка модуля.

На заключительном восьмом этапе разрабатывается вся необходимая техническая документация по эксплуатации системного модуля. Проводится окончательная стыковка модуля с САПР.

2.7. Формализация задачи, разработка блок-схемы и алгоритмов

На основе алгоритмов системных модулей и их отдельных программных единиц при исследовании процессов пластического из-

гиба профильных деталей ЛА лежит решение ОТЗ в той или иной постановке.

При решении ОТЗ в самом общем случае необходимо использовать замкнутую систему уравнений механики сплошной среды [11, 16] и важным моментом является выбор метода сведения поставленной задачи к системе линейных (в лучшем случае) или нелинейных алгебраических уравнений. Выбор метода решения во многом зависит от исходных гипотез, требуемой точности нахождения искомых параметров. В большинстве случаев, в силу исходной нелинейности задачи как физической, так и геометрической, при решении ОТЗ не удается получить явное решение. Поэтому используются численные методы решения (метод последовательных приближений, метод Ньютона и др.).

Непременным условием при решении ОТЗ выбранным методом является обоснование единственности и сходимости решения. Решение поставленной задачи завершается ее формальным описанием, которое представляет собой логически стройную запись последовательности этапов решения в виде расчетных математических выражений с установлением однозначных связей на каждом из этапов. При формализации решение разбивается на ряд подзадач, определяются входные и выходные параметры, накладываются ограничения на решения подзадач и всей задачи в целом.

Формализация задачи дает возможность представить разрабатываемую математическую модель в виде алгоритма для ПЭВМ.

Под алгоритмом понимается точное предписание по выполнению некоторого вычислительного процесса, который через конечное число шагов приводит к решению поставленной задачи либо к выводу о невозможности решения.

Графический алгоритм представляется в виде схемы, отражающей основные операции процесса обработки данных и программирования. Схемы алгоритмов выполняются в соответствии с ГОСТ 19.003-80.

В зависимости от принятой технологии программирования схемы могут выполняться по-разному, например, в виде общепринятых блок-схем, в виде стилизированных рекурсивных диаграмм и т.д.

2.8. Основные принципы разработки управляющих программ формообразования

Использование программного управления позволяет оптимизировать программу нагружения, обеспечить точность и стабильность процесса формообразования. Разработка компьютерных систем формирования управляющих программ для гибочно-растяжного оборудования позволяет до опытных работ смоделировать процесс гибки, оценить вероятность возникновения технологических отказов, согласовать управляющую программу с кинематическими и силовыми возможностями конкретного оборудования и оптимизировать ее по выбранному критерию с учетом всех ограничений. Чем больше независимых управляемых координат имеет профилегибочный станок, тем легче реализовать оптимальную программу нагружения. Для управления процессом формообразования деталей необходима математическая модель, описывающая геометрию детали, материал заготовки, механику формообразования и кинематику исполнительных органов станка (рис. 2.1).

В качестве критерия оптимизации в ряде случаев используют принцип минимума энергии формоизменения, что приводит к некоторой экономии энергии. Однако в авиационной промышленности более актуальны проблемы, связанные с качеством получаемых

деталей. Поэтому возможности программного управления процессом формообразования следует использовать для управления качеством детали.

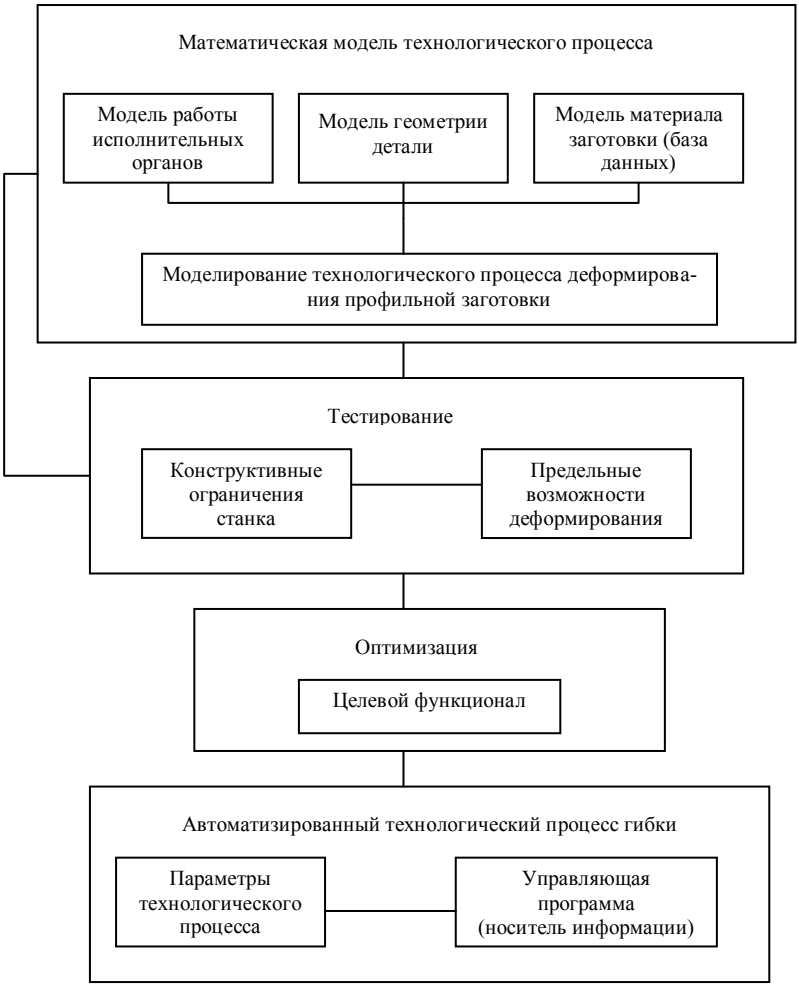


Рис. 2.1. Укрупненная блок-схема моделирования процесса гибки

В связи с этим оптимизацию управления целесообразно выполнять следующим образом [1, 2, 18]. Вначале необходимо выявить возможные при выполнении данной операции признаки брака и определить доминирующий (наиболее трудно устранимый и часто встречающийся) из них.

Программу управления следует рассчитывать таким образом, чтобы вероятность появления доминирующего признака была минимальной, вероятность появления части признаков не превышала заданной величины, а остальные признаки брака не возникали. Кроме того, надо учитывать ограничения, связанные с возможностями технологического оборудования.

При формообразовании профильных деталей возможно возникновение следующих технологических отказов деформационного типа:

- потеря устойчивости в форме образования утонений или складок (гофр) на внутренней сжатой стороне профиля при недостаточном растяжении заготовки;

- разрыв наружных волокон при недопустимо большой степени растяжения заготовки;

- большое пружинение заготовки; недопустимые размеры зерна на поверхности;

- недопустимо большое смещение границ перехода от одних размеров поперечного сечения профиля к другим (для заготовок переменного сечения) и др.

Модель включает блок математического описания сопротивления упругому и пластическому деформированию материала заготовки. Поскольку характеристики имеют статистический разброс данных, то они должны представляться в виде математического ожидания и сопровождаться среднеквадратичными отклонениями

величин. В системе должны быть предусмотрены постоянное пополнение банка данных новыми характеристиками и их статистическая обработка.

Тестирование процесса позволяет оценить вероятность появления этих признаков брака. Если деталь нельзя получить за один переход, процесс деформирования разбивается на минимально необходимое число переходов с рекомендациями по режимам промежуточных операций термообработки. При разбиении используется принцип равновероятности возникновения технологических отказов на каждом переходе с максимальным использованием пластических свойств материала.

Численный анализ пружинения показывает, что с увеличением степени растяжения материала влияние статистического разброса параметров аппроксимации кривой течения материала на разброс пружинения асимптотически уменьшается. При этом уменьшается и сама величина пружинения.

Следовательно, для получения оптимальной управляющей программы процесс деформирования заготовки следует вести на пределе возможности материала. Для этого необходимо на каждом шаге управления процессом гибки обеспечить максимально возможное растяжение заготовки, но при этом следить за тем, чтобы величина деформаций заготовки не достигала критических значений. Таким образом, процессом формообразования управляют по текущему напряженно-деформированному состоянию.

С целью управления процессом гибки, обеспечивающим наиболее благоприятные условия деформирования, необходимо монотонное нагружение всей заготовки в целом. Шаг управления считается оптимальным, если текущее растяжение минимально необходимое. Точность определения оптимального шага управления

зависит от совершенства принятой модели процесса, точности задания исходных данных (геометрии пуансона, характеристик материала заготовки). Поэтому заготовку необходимо растягивать с некоторым запасом степени растяжения. Величина его определяет степень оптимизации управления. Уменьшение запаса растяжения (дальнейшая оптимизация управления) возможно при использовании адаптивной модели процесса, предусматривающей наличие обратной связи.

Управление процессом формообразования должно быть согласовано с кинематическими и силовыми возможностями конкретного оборудования. Математическая модель, описывающая кинематику профилегибочного станка ПГР с ЧПУ, приведена в работах [2, 8, 25]. Технологические возможности оборудования, в свою очередь, накладывают определенные ограничения на решение задачи оптимального управления процессом гибки. В результате автоматизированная подготовка управляющих программ должна проводиться на основе синтеза математических моделей процесса формообразования, геометрии получаемой детали, материала заготовки и работы исполнительных органов гибочно-растяжного оборудования. В процессе моделирования формообразования проводится тестирование, т.е. оценка вероятности возникновения того или иного признака брака в заготовке и согласование необходимых движений с возможностями конкретного оборудования. Программа оптимизируется на основе принятого для данной операции критерия.

Система состоит из комплекса программных модулей:

- расчета и аппроксимации геометрии детали с одновременным тестированием правильности подготовки исходной геометрии;

- расчета напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе формообразования; подготовки и оптимизации управляющей программы;

- корректировки гибочного пуансона на величину пружинения;

- управления рабочими органами профилегибочных станков.

Управляющая программа кодируется в системе ISO и выводится в виде перфоленты или другого вида программоносителя.

Работа с системой позволяет:

- на стадии разработки технологии проверить возможность получения детали путем моделирования технологической операции на ПЭВМ;

- сократить, а в ряде случаев полностью исключить, экспериментальную отладку управляющих программ;

- расширить технологические возможности операции гибки;

- проверить до изготовления правильность проектирования обтяжных пуансонов;

- рассчитать оптимальные размеры заготовки;

- обоснованно выбрать минимально необходимое число переходов;

- оценить вероятность возникновения технологических отказов в процессе гибки;

- сертифицировать технологический процесс.

Такую систему можно использовать как на стадии проектирования профилегибочных станков, так и на этапе разработки технологического процесса и на этапе производства.

На основе разработанных математических моделей процессов гибки реализуются программные средства в виде программно-методических комплексов (ПМК) автоматизации технологической подготовки ЗШП [1, 3, 20–22].

При автоматизации технологической подготовки производства исследуемых процессов в этих работах выделяются пять основных задач, представляющих собой проектные операции. Для выполнения каждой проектной операции в составе ПМК технологической подготовки производства выделяются следующие подсистемы:

- подсистема построения геометрической модели детали;
- подсистема построения геометрической модели профиля;
- подсистема моделирования технологического процесса гибки профильной детали;
- подсистема построения геометрической модели оснастки и подсистема автоматизированного программирования станка ПГР.

Состав, взаимосвязь и общая последовательность работы подсистем ПМК в процессе проектирования технологического процесса можно представить в виде структурно-функциональной схемы. Так как каждая подсистема выполняет законченную функцию, то все они реализуются в виде отдельных законченных программных модулей. Каждая подсистема может быть заменена другой реализацией соответствующей проектной операции либо использована в составе других автоматизированных систем, в которых реализуются перечисленные проектные операции.

Таким образом, динамическая информационная модель технологического процесса представляет собой совокупность всех данных, формируемых подсистемами ПМК при проектировании отдельного технологического процесса. Такое объединение данных формирует полное информационное описание проектируемого технологического процесса. Процесс проектирования может быть приостановлен по окончании работы любой из подсистем и продолжен с любого этапа при измененных параметрах, при этом данные, уже имеющиеся в динамической модели технологического

процесса, могут использоваться, если они не противоречат измененным параметрам проектирования.

Для описания процессов технологической подготовки производства (ТПП) и сценария проектирования оснастки используются идеи методологии функционального моделирования IDEF (ICAM Definition). Методология IDEF-моделирования широко применяется в информационно развитых странах в качестве одной из частей информационной технологии CALS [1, 4, 6–8, 17].

На рис. 2.2 приведена укрупненная схема автоматизированного проектирования процесса изготовления профильных деталей на гибочно-растяжном оборудовании с ЧПУ (станки ПГР и СПО).

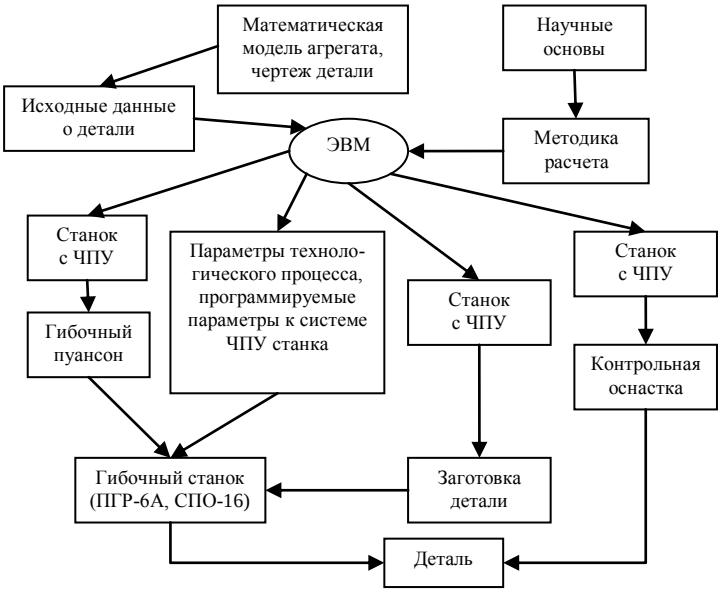


Рис. 2.2. Схема автоматизированного проектирования процесса гибки

Этап ТПП тесно связан с этапом проектирования изделия.

Практика показывает, что предприятия подходят к созданию своих интегрированных информационных систем, предназначенных для комплексного решения задач автоматизации конструирования, инженерного анализа и ТПП, по-разному.

Часто на рабочих местах устанавливаются программные среды различных фирм-разработчиков. В этих условиях вопросы организации обмена информации становятся актуальными. Известно, что обмен без потерь информацией достигается при наличии единой базы данных для различных подсистем. Этим выгодно отличаются комплексные системы сквозного проектирования и подготовки производства верхнего уровня. В тех случаях, когда на рабочих местах устанавливаются программные среды различных фирм, организация обмена информацией ложится на самих пользователей. Поэтому важно, чтобы для этих программ были разработаны соответствующие интерфейсы с необходимой полнотой реализации форматов. Для решения проблем качества конкурентоспособности вновь разрабатываемой качественно новой продукции необходимо использовать систему компьютерной поддержки на всех этапах ее жизненного цикла (внедрение CALS-технологий).

Отставание уровня автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП) от систем автоматизированного проектирования конструкторских работ (САПР КР) объясняется несколькими объективными причинами. Наиболее существенная из них заключается в том, что САПР КР в отличие от АСТПП универсальны. Конструкторские системы могут применяться без существенной адаптации практически на любом предприятии. Для них характерны широкий рынок сбыта, возможность

продажи «под ключ». Поэтому фирмы-разработчики программного обеспечения в области САПР проявляют наибольший интерес именно к этому типу систем. АСТПП, напротив, специализированны и зависят от характера производства, вида выпускаемой продукции, серийности их выпуска. Кроме того, прикладное программное обеспечение АСТПП неоднородно по назначению. Оно формируется из набора продуктов, каждый из которых обеспечивает разработку отдельного вида технологических процессов.

В существующих автоматизированных системах сквозного проектирования и ТПП наиболее часто и полно реализованы в основном только различные виды механообработки, сборки конструкций, потому что основные операции данных процессов хорошо формализованы и прекрасно моделируются графическими твердотельными образами. Вследствие этого системы их технологического проектирования органически интегрируются с конструкторскими САПР. Автоматизированные системы для проектирования технологий ОМД не могут базироваться на подобных принципах, так как должны учитывать особенности и закономерности процессов нагрева, кристаллизации, пластического формоизменения и других явлений, существенным образом влияющих на формирование требуемого уровня качества продукции.

Внедряемые на предприятиях авиационной промышленности АСТПП основываются на системном подходе к разрабатываемым технологиям. Этот подход требует построения сложных математических моделей, адекватно отражающих сущность проектируемых процессов. Разрабатываемое программное обеспечение позволяет осуществить автоматизацию задач ТПП, связанных с проектированием и изготовлением оснастки, на основе единой информационной среды и использования сетевых информационных технологий.

Данное обстоятельство будет не только способствовать расширению возможностей, используемых на предприятиях CAD/CAM систем, таких как Unigraphics, Pro/ENGINEER, SolidEdge, T-Flex, CADDS5 и др., но и будет приводить к существенному уменьшению сроков конструкторской и технологической подготовки производства, снижать издержки при производстве и эксплуатации сложной наукоемкой продукции.

Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИБКИ ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ГИБОЧНО-РАСТЯЖНОМ ОБОРУДОВАНИИ С ЧПУ

3.1. Методика расчета технологических параметров процесса гибки и геометрии оснастки

Моделирование процесса гибки криволинейных профильных деталей на станках ПГР проведем на примере сложного нагружения Р–И (условие P=const обеспечивается постоянством давления в растяжных цилиндрах).

Создание математической модели физического процесса формообразования основывается на решении ОТЗ и включает анализ напряженно-деформированного состояния (НДС), нахождения момента внутренних сил, анализ изменения кривизны вследствие пружинения и определение кривизны изгиба с учетом пружинения по заданной остаточной кривизне детали.

При теоретическом решении поставленной задачи используются следующие гипотезы и ограничения [2, 9, 15, 16].

1. Рассматривается линейное напряженное и объемное деформированное состояние.

2. Диаграмма упрочнения $\sigma - \varepsilon$ подчиняется линейно-степенной зависимости:

$$\sigma = K\varepsilon^n \text{ при } \varepsilon > \varepsilon_p ; \quad \sigma = E\varepsilon \text{ при } 0 \le \varepsilon \le \varepsilon_p , \qquad (3.1)$$

где E – модуль упругости материала; $\varepsilon_р, \sigma_р$ – точка перехода линейной участка $\sigma - \varepsilon$ кривой упрочнения в степенную; $\varepsilon_р = (K/E)^{1/(1-n)}$; $\sigma_р = E\varepsilon_р$; K, n – константы упрочнения, которые определяются через механические характеристики материала; $n = \lg(\sigma_в / \sigma_{0,2}) / \lg(\varepsilon_в / \varepsilon_{0,2})$; $K = \sigma_в / \varepsilon_в^n$; $(\sigma_в, \varepsilon_в)$ – координаты предела прочности; $(\sigma_{0,2}, \varepsilon_{0,2})$ – координаты точки условного предела текучести, соответствующего остаточной деформации 0,2%. Точность линейно-степенной аппроксимации $\sigma - \varepsilon$ сопоставима с точностью определения механических констант материала, что совершенно достаточно для практики расчетов.

Для упрощения решения можно использовать более простую линейно-полигональную зависимость $\sigma - \varepsilon$, имеющую вид [16]:

$$\sigma = E\varepsilon \text{ при } 0 \le \varepsilon \le \varepsilon_р; \quad \sigma = B\varepsilon + C \text{ при } \varepsilon > \varepsilon_р, \tag{3.2}$$

где $B = \dfrac{\sigma_в - \sigma_{0,2}}{\varepsilon_в - \varepsilon_{0,2}}$; $C = \sigma_{0,2} - B\varepsilon_{0,2}$; $\varepsilon_р = \dfrac{C}{E - B}$; $\sigma_р = E\varepsilon_р$.

Для повышения точности аппроксимации вместо точки $(\sigma_в, \varepsilon_в)$ можно выбирать точку $(\sigma_м, \varepsilon_м)$, соответствующую максимальной деформации при данной схеме нагружения. Решения, найденные с использованием зависимости (3.2), можно в дальнейшем применять в качестве начального приближения при решении задачи формообразования в общей постановке.

3. Материал считается изотропным, т.е. механические свойства во всех направлениях одинаковы.

4. Материал заготовки считается несжимаемым (справедлива гипотеза постоянства объема), в соответствии с этим коэффициент Пуассона μ принимается равным 0,5.

5. На всех этапах сложного нагружения работает гипотеза плоских сечений, согласно которой относительная деформация произвольного волокна ε есть линейная функция его расстояния y от нейтрального слоя, т.е. для изгиба с растяжением $\varepsilon = \varepsilon_0 + \kappa_0 y$, где κ_0 – кривизна нейтрального слоя.

6. Рассматриваются материалы, одинаково работающие на растяжение и сжатие (практически все конструкционные сплавы).

7. При знакопеременном нагружении считается, что кривая обратного нагружения идентична кривой первоначального нагружения, т.е. пренебрегаем влиянием эффекта Баушингера на величину предела текучести материала при обратном нагружении.

8. Деформирование и упругое восстановление частей детали с постоянным сечением считается независимым.

Задачей исследуемого процесса является получение остаточных деформаций, при которых геометрия гнутого профиля соответствует (с минимальными погрешностями) номинальному контуру. Для схемы Р–И необходимо найти максимально допустимую деформацию предварительного растяжения $\varepsilon_0^{\max}$, обеспечивающую устойчивое формообразование (рис. 3.1).

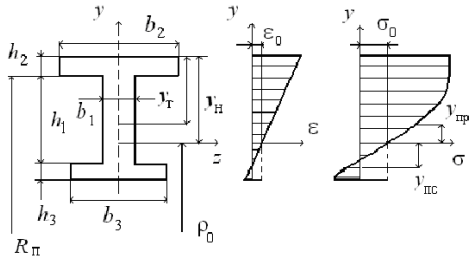


Рис. 3.1. Эпюры деформаций и напряжений при схеме Р–И профиля комплексной формы поперечного сечения

Для участка профиля комплексной формы поперечного сечения при известных и постоянных по длине участка размерах попереч-

ного сечения и остаточном радиусе кривизны $\tilde{\kappa}_0$ решается основная технологическая задача.

Каждый участок профиля подвергается растяжению силой *P*, создающей по всему сечению однородную деформацию растяжения ε_0, а затем производится изгиб до необходимой кривизны κ_0 моментом M при сохранении силы *P*. Изгиб вызывает поворот сечения относительно оси, определяемой ординатой $y_н$ и не проходящей через центр тяжести ($y_т$). Эта ось принимается за координатную. В активной стадии нагружения напряжения по высоте сечения определяются следующими зависимостями (при $y > 0$ напряжения определяются по суммарным деформациям, а при $y < 0$ – через активные составляющие):

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \kappa_0 y)^n \text{ при } y \ge 0,\ \varepsilon_0 > \varepsilon_р \text{ и при } y \ge y_{пр},\ \varepsilon_0 \le \varepsilon_р;$$
$$\sigma = E(\varepsilon_0 + \kappa_0 y) \text{ при } 0 \le y \le y_{пр}, \text{ если } \varepsilon_0 \le \varepsilon_р; \qquad (3.3)$$
$$\sigma = \sigma_0 + \kappa_0 y E \text{ при } -y_{пс} \le y \le 0;\ \sigma = K(\sigma_0 / E + \kappa_0 y)^n \text{ при } y < -y_{пс}.$$

Здесь $\kappa_0 = 1/\rho_0$ – кривизна слоя, проходящего через ось поворота сечения в активной стадии нагружения; $y_{пр} = (\varepsilon_р - \varepsilon_0)/\kappa_0$ и $y_{пс} = (\sigma_р + \sigma_0)/E\kappa_0$ – ординаты, определяющие границы упругих и пластических зон в растянутых и сжатых волокнах соответственно; ε_0 – деформация предварительного растяжения; σ_0 – напряжение предварительного растяжения, определяемое по формулам (3.1); $\sigma_0 = K\varepsilon_0^n$, если $\varepsilon_0 > \varepsilon_р$ и $\sigma_0 = E\varepsilon_0$, если $\varepsilon_0 \le \varepsilon_р$.

Из рассмотрения механики упругопластического деформирования профильной детали для определения максимальной величины

деформации растяжения $\varepsilon_0^{\max}$, величин ρ_0 и $y_н$ имеем следующую систему нелинейных уравнений общего вида:

$$f_1(\rho_0, y_н, \varepsilon_0) = P - \int_{(F)} \sigma dF = 0; \tag{3.4}$$

$$f_2(\rho_0, y_н, \varepsilon_0) = 1/\tilde{\rho}_0 - 1/\rho_0 + M/[EI - M(y_н - y_т)] = 0; \tag{3.5}$$

$$f_3(\rho_0, y_н, \varepsilon_0) = \varepsilon_0 + y_н/\rho_0 - \varepsilon_{доп} = 0, \tag{3.6}$$

где $\varepsilon_{доп}$ – предельно допустимая деформация; $\varepsilon_{доп} = (0{,}8...0{,}9)\varepsilon_в$; $\tilde{\rho}_0$ – остаточный радиус кривизны; F– площадь поперечного сечения участка профиля; I – момент инерции сечения; M – изгибающий момент, являющийся функцией геометрии сечения, кривизны в активной стадии нагружения и характера нагружения; $P = \sigma_0 F$.

Для профиля комплексной формы поперечного сечения имеем:

$$F = b_1h_1 + b_2h_2 + b_3h_3;$$

$$y_т = \left[b_3h_3\left(\frac{h_3}{2} + h_1 + h_2\right) + b_1h_1\left(\frac{h_1}{2} + h_2\right) + b_2\frac{h_2^2}{2}\right] \Big/ F;$$

$$I = \left\{ b_2\left[y_т^3 - (y_т - h_2)^3\right] + b_1\left[(y_т - h_2)^3 + (h_1 + h_2 - y_т)^3\right] + \right.$$

$$\left. + b_3\left[(h_1 + h_2 + h_3 - y_т)^3 + (h_1 + h_2 - y_т)^3\right]\right\} \Big/ 3.$$

В зависимости от значения ε_0, ρ_0 и размеров профиля имеем более 20 возможных случаев положения ординат $y_н$, $y_{пр}$ и $y_{пс}$. Решение ОТЗ, полученное для профиля комплексной формы, применимо и для других деталей из профилей, имеющих сечение, симметричное в плоскости изгиба. Профиль таврового сечения при изгибе ребром внутрь получается из комплексной формы при

$b_3 = h_3 = 0$. Для профиля таврового сечения при изгибе ребром наружу имеем $b_2 = h_2 = 0$. Тогда соответствующие типовые интегралы в системе (3.4) – (3.6) будут тождественно равны нулю.

Уравнение (3.4), выражающее условие равенства внешних и внутренних сил, позволяет найти координату $y_н$ и в развернутой форме с учетом знаков для случая $\varepsilon_0 < \varepsilon_р$, $y_{пр} < y_н - h_2$, $y_{пс} < h_1 + h_2 - y_н$, указанного на рис.3.1, имеет вид:

$$\sigma_0 F = b_1 \int_0^{y_{пр}} E(\varepsilon_0 + \kappa_0 y)dy + b_1 \int_{y_{пр}}^{y_н - h_2} K(\varepsilon_0 + \kappa_0 y)^n dy +$$

$$+ b_2 \int_{y_н - h_2}^{y_н} K(\varepsilon_0 + \kappa_0 y)^n dy + Eb_1 \int_{-y_{пс}}^{0} (\sigma_0 / E + \kappa_0 y)dy -$$

$$- b_1 \int_{y_{пс}}^{h_1 + h_2 - y_н} K(\kappa_0 y - \sigma_0 / E)^n dy - b_3 \int_{h_1 + h_2 - y_н}^{h_1 + h_2 + h_3 - y_н} K(\kappa_0 y - \sigma_0 / E)^n dy.$$

Соответственно уравнение для определения момента внутренних сил запишется следующим образом:

$$M = \int_{(F)} (\sigma - \sigma_0) y dF = b_2 \int_{y_н - h_2}^{y_н} \left[K(\varepsilon_0 + \kappa_0 y)^n - \sigma_0\right] y dy +$$

$$+ b_1 \int_{y_{пр}}^{y_н - h_2} \left[K(\varepsilon_0 + \kappa_0 y)^n - \sigma_0\right] y dy + Eb_1 \int_0^{y_{пр}} \kappa_0 y^2 dy + Eb_1 \int_{-y_{пс}}^{0} \kappa_0 y^2 dy +$$

$$+ b_1 \int_{y_{пс}}^{h_1 + h_2 - y_н} \left[K(\kappa_0 y - \sigma_0 / E)^n + \sigma_0\right] y dy + b_3 \int_{h_1 + h_2 - y_н}^{h_1 + h_2 + h_3 - y_н} \left[K(\kappa_0 y - \sigma_0 / E)^n + \sigma_0\right] y dy.$$

Уравнение (3.5) позволяет найти остаточную кривизну детали $\tilde{\kappa}_0$ и рассчитывается на основании теоремы А.А. Илюшина

о разгрузке. Уравнение (3.6) выражает условие, при котором результирующая деформация в наиболее нагруженном волокне не должна превышать предельно-допустимой величины $\varepsilon_{\text{доп}}$. В нашем случае типовые интегралы имеют вид:

$$\sigma_0 F = Eb_1\kappa_0\left(\eta y_{\text{пр}} + y_{\text{пр}}^2/2\right) + \frac{Kb_1\kappa_0^n}{n+1}\left[\left(\eta + y_{\text{н}} - h_2\right)^{n+1} - \left(\eta + y_{\text{пр}}\right)^{n+1}\right] +$$

$$+ \frac{Kb_2\kappa_0^n}{n+1}\left[\left(\eta + y_{\text{н}}\right)^{n+1} - \left(\eta + y_{\text{н}} - h_2\right)^{n+1}\right] + Eb_1\kappa_0\left(\eta_y y_{\text{пс}} - y_{\text{пс}}^2/2\right) -$$

$$- \frac{Kb_1\kappa_0^n}{n+1}\left[\left(h_1 + h_2 - y_{\text{н}} - \eta_y\right)^{n+1} - \left(y_{\text{пс}} - \eta_y\right)^{n+1}\right] -$$

$$- \frac{Kb_3\kappa_0^n}{n+1}\left[\left(h_1 + h_2 + h_3 - y_{\text{н}} - \eta_y\right)^{n+1} - \left(h_1 + h_2 + y_{\text{н}} - \eta_y\right)^{n+1}\right];$$

$$M = Kb_2\kappa_0^n\left[\frac{\left(y_{\text{н}} + \eta\right)^{n+2} - \left(y_{\text{н}} - h_2 + \eta\right)^{n+2}}{n+2} - \right.$$

$$\left. - \eta\frac{\left(y_{\text{н}} + \eta\right)^{n+1} - \left(y_{\text{н}} - h_2 + \eta\right)^{n+1}}{n+1}\right] -$$

$$- \frac{b_2\sigma_0\left[y_{\text{н}}^2 - \left(y_{\text{н}} - h_2\right)^2\right]}{2} + Kb_1\kappa_0^n\left[\frac{\left(y_{\text{н}} - h_2 + \eta\right)^{n+2} - \left(y_{\text{пр}} + \eta\right)^{n+2}}{n+2} - \right.$$

$$\left. - \eta\frac{\left(y_{\text{н}} - h_2 + \eta\right)^{n+1} - \left(y_{\text{пр}} + \eta\right)^{n+1}}{n+1}\right] - \frac{b_1\sigma_0\left[\left(y_{\text{н}} - h_2\right)^2 - y_{\text{пр}}^2\right]}{2} +$$

$$+ \frac{b_1 E\kappa_0\left(y_{\text{пр}}^3 + y_{\text{пс}}^3\right)}{3} + Kb_1\kappa_0^n\left[\frac{\left(h_1 + h_2 - y_{\text{н}} - \eta_y\right)^{n+2} - \left(y_{\text{пс}} - \eta_y\right)^{n+2}}{n+2} + \right.$$

$$\left. + \eta_y\frac{\left(h_1 + h_2 - y_{\text{н}} - \eta_y\right)^{n+1} - \left(y_{\text{пс}} - \eta_y\right)^{n+1}}{n+1}\right] + \frac{b_1\sigma_0\left[\left(h_1 + h_2 - y_{\text{н}}\right)^2 - y_{\text{пс}}^2\right]}{2} +$$

$$+ Kb_3\kappa_0^n\left[\frac{\left(h_1+h_2+h_3-y_{\text{н}}-\eta_y\right)^{n+2}-\left(h_1+h_2-y_{\text{н}}-\eta_y\right)^{n+2}}{n+2}+\right.$$

$$\left.+\eta_y\frac{\left(h_1+h_2+h_3-y_{\text{н}}-\eta_y\right)^{n+1}-\left(h_1+h_2-y_{\text{н}}-\eta_y\right)^{n+1}}{n+1}\right]+$$

$$+\frac{b_3\sigma_0\left[\left(h_1+h_2+h_3-y_{\text{н}}\right)^2-\left(h_1+h_2-y_{\text{н}}\right)^2\right]}{2},$$

где $\eta=\varepsilon_0\rho_0$, $\eta_y=\sigma_0\rho_0/E$.

В векторной форме система (3.4) – (3.6) записывается в виде

$$\bar{x}=\varphi(\bar{x}), \tag{3.7}$$

где $\varphi(\bar{x})=\bar{x}+\lambda f(\bar{x})$; λ – неособенная матрица; $x_1=y_{\text{н}}$, $x_2=\rho_0$, $x_3=\varepsilon_0$ – искомые корни. Система (3.7) решается на ПЭВМ численно с помощью метода итераций. Для обеспечения сходимости процесса итерации параметр λ выбирается так, чтобы $\varphi'(\bar{x}^{(0)})=E_1+\lambda f'(\bar{x}^{(0)})=0$, E_1 – единичная матрица. Отсюда, если матрица $f'(\bar{x}^{(0)})$ – неособенная, $\lambda=-\left[f'(\bar{x}^{(0)})\right]^{-1}$. В случае, если $\det f'(\bar{x}^{(0)})=0$, выбирается другое начальное приближение $\bar{x}^{(0)}$.

В методе итерации уравнение (3.5) преобразуется к виду

$$\rho_{0[k+1]}=\tilde{\rho}_0\left[1-\frac{1}{\left(EI/M-\rho_{\text{т}}\right)/\rho_{0[k]}+1}\right]. \tag{3.8}$$

Здесь $\tilde{\rho}_0$ – остаточный радиус кривизны детали по оси поворота сечений; $\tilde{\rho}_0=\tilde{\rho}_{\text{дет}}^{\text{нар}}-y_{\text{н}}$; $\tilde{\rho}_{\text{дет}}^{\text{нар}}$ – остаточный радиус кривизны детали по наружному слою или $\tilde{\rho}_0=\tilde{\rho}_{\text{дет}}^{\text{внут}}+h-y_{\text{н}}$, если $\tilde{\rho}_{\text{дет}}^{\text{внут}}$ – остаточный радиус кривизны детали по внутреннему слою; $\rho_{0[k]}$ – k-е

приближение метода итераций; $\rho_т$ – радиус кривизны слоя, проходящего через центр тяжести сечения; $\rho_т = \rho_{0[k]} + y_н - y_т$.

В первом приближении принимается $\rho_{0[1]} = \tilde{\rho}_0$, $y_{н[1]} = y_Т, \varepsilon_{0[1]} = \varepsilon_р$. Процесс последовательных приближений проводится до тех пор, пока не выполнится условие достижения требуемой точности: $\left|x_{i[k+1]} - x_{i[k]}\right| \le \Delta_i x_i$, где Δ_i – выраженная в долях вычисляемого параметра допустимая погрешность вычисления; $i = 1, 2, 3$. Для инженерных расчетов достаточно принять $\Delta_i = 0{,}05$.

При формообразовании профильных деталей переменного сечения величина $\varepsilon_0^{\max}$ задается для наиболее слабого сечения, остальные сечения по отношению к нему будут недорастянутыми. Из системы (3.7) для нескольких слабых участков профиля (минимальной жесткости и малых радиусов кривизны) находятся деформации предварительного растяжения $\varepsilon_{0i}^{\max}$ и выбирается минимальная из них ε_{0k} для *k*-го участка. По известной величине ε_{0k} определяется усилие растяжения по формуле

$$P = K\varepsilon_{0k}^n F_k \text{ при } \varepsilon_{0k} > \varepsilon_р, \; P = E\varepsilon_{0k} F_k \text{ при } \varepsilon_{0k} \le \varepsilon_р.$$

Для других участков детали деформация растяжения ε_{0i} вычисляется следующим образом:

$$\varepsilon_{0i} = \left(\sigma_{0i} / K\right)^{1/n} \text{ при } \sigma_{0i} > \sigma_р; \; \varepsilon_{0i} = \sigma_{0i} / E \text{ при } \sigma_{0i} \le \sigma_р,$$

где $\sigma_{0i} = P / F_i$.

Искомые параметры для каждого *i*-го участка профиля, ордината $y_{нi}$ и активный радиус кривизны ρ_{0i} определяются из совместного решения первых двух уравнений системы (3.7) при известном значении ε_{0i}.

Зная величины $\rho_{0i}, y_{ні}, \varepsilon_{0i}$, определим геометрию гибочного пуансона и размеры заготовки, которые обеспечивают получение детали с отклонениями размеров от номинала, укладывающихся в допуск. Радиус кривизны гибочного пуансона $R_{пі}$ для *i*-го участка равен $R_{пі} = \rho_{0i} + y_{ні} - h_{2i}$. Длина участка контура гибочного пуансона $L_{пі}$ и длина участка заготовки профиля $L_{загі}$ определяются с учетом изменения длины и кривизны деформированного элемента после разгрузки по формулам:

$$L_{пі} = L_{детi} / (1 + \varepsilon_i'); \quad L_{загі} = L_{детi} / (1 + \varepsilon_i')(1 + \varepsilon_i),$$

где $\varepsilon_i' = -P / EF_i - My' / EJ_i$; $\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} + y / \rho_{0i}$; $y' = y_{тi}$; $y = y_{ні}$;

$L_{детi}$ – длина *i*-го участка детали; $y_{тi}$ – ордината центра тяжести сечения на *i*-м участке.

Полная длина контура гибочного пуансона и длина заготовки вычисляются по формулам:

$$L_{п} = \sum_{i=1}^{m} L_{пі}; \quad L_{заг} = \sum_{i=1}^{m} L_{загi} + 2\Delta_1 + 2\Delta_2,$$

где Δ_1 – односторонний припуск между зажимным патроном растяжного цилиндра и краем гибочного пуансона; $\Delta_1 \approx 0{,}012..0{,}05$ м; Δ_2 – односторонний припуск, необходимый для зажима заготовки в зажимном патроне растяжного цилиндра; m – количество дискретных участков с постоянным радиусом кривизны и поперечным сечением.

Приведенные формулы решают ОТЗ при проектировании и расчете параметров технологического процесса и формообразующей оснастки.

Математическая модель процесса автоматизированной гибки деталей из профилей по схеме сложного нагружения Р–И на станках ПГР реализуется на ПЭВМ в виде пакета прикладных программ.

Последовательность расчета технологических параметров должна быть следующей:

- аппроксимация геометрии внешнего контура детали, заданного функционально или дискретно набором дуг окружностей;
- аппроксимация профиля переменного по длине сечения и кривизны участками с постоянным сечением и кривизной;
- определение участков детали с максимальным радиусом и минимальным по площади (критическим) сечением;
- определение максимально возможной деформации предварительного растяжения и усилия растяжения;
- определение деформаций предварительного растяжения, положения оси поворота сечения, активного радиуса кривизны для каждого участка детали с постоянным сечением и кривизной;
- определение линейных размеров заготовки и расчет геометрических параметров гибочного пуансона с учетом пружинения;
- получение управляющей программы для обработки контура гибочного пуансона на станке с ЧПУ.

Исходными данными для решения задачи являются:

- геометрия контура детали;
- геометрия поперечных сечений;
- механические свойства материала.

Маршрутно-операционный технологический процесс разрабатывается на основе имеющегося на предприятии типового оборудования и оснастки для изготовления деталей из профилей, директивных технологических процессов. Схема разработки техпроцесса представлена на рис. 3.2.

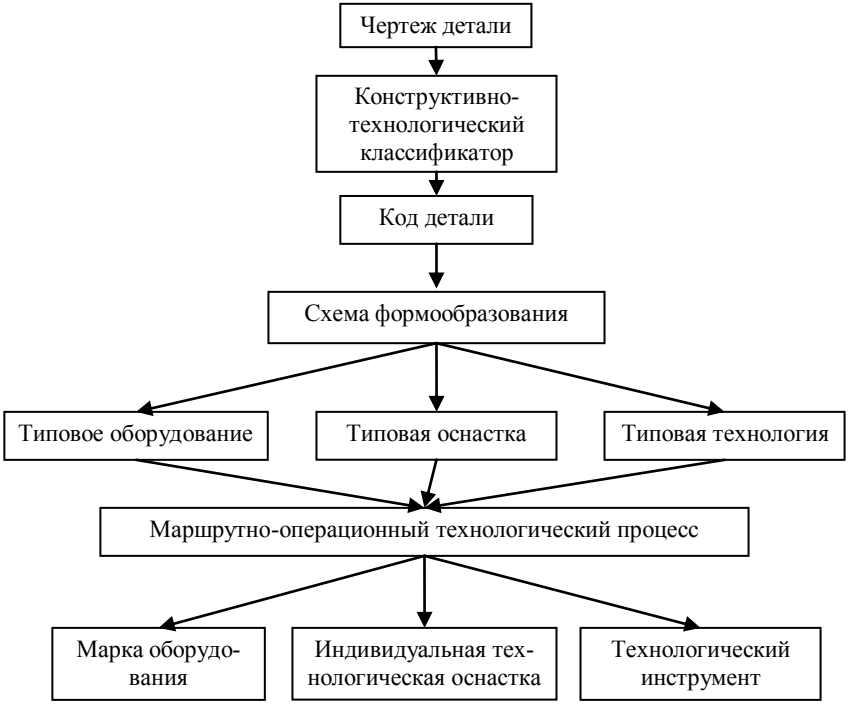


Рис. 3.2. Схема разработки технологического процесса

На основе анализа чертежа профильной детали по конструктивно-технологическому классификатору определяется код детали. По коду детали устанавливается схема процесса, типовое оборудование, оснастка и технология. Далее по геометрическим параметрам поперечного сечения профильной детали, механическим свойствам материала разрабатывается маршрутно-операционный технологический процесс, определяется марка оборудования; при необходимости проектируется и индивидуальная технологическая оснастка, определяется инструмент.

3.2. Методика выбора гибочно-растяжного оборудования

Исходными данными для правильного выбора типа и соответствующей модели оборудования при проектировании технологических процессов изготовления деталей из листов и профилей являются следующие факторы:

- конструкция детали, ее формы и размеры;
- физико-механические свойства материала заготовки детали;
- точность обработки и шероховатость поверхностей детали;
- потребная мощность (усилия) для формообразования;
- программа выпуска.

Вначале по конструктивно-технологическим признакам детали определяют метод формообразования, на основе которого выбирают тип оборудования. Затем рассчитывают потребные усилия, необходимые для пластического деформирования, в зависимости от характера выполняемой операции, геометрических параметров заготовки и детали, физико-механических свойств применяемого материала, условий трения между заготовкой и рабочими элементами технологической оснастки.

По расчетным усилиям (для станков типа ПГР и СПО усилие растяжения должно быть $P \le 0{,}9P_{\text{ст}}$, $P_{\text{ст}}$ – паспортное усилие станка) выбирают конкретную модель данного типа оборудования, анализируя его технические параметры.

Конкретное оборудование для гибки с растяжением профильных деталей приведено в табл. 3.1 и 3.2.

При разработке технологического процесса необходимо учитывать масштабы производства. Чем больше программа выпуска деталей, тем более высокой должна быть степень механизации и автоматизации технологического процесса, тем более сложные при

способления, механизмы и специализированное оборудование должны быть применены для повышения производственных технико-экономических показателей.

Таблица 3.1

Параметры станка	Тип станка		
	ПГР-6	ПГР-7	ПГР-8
Усилие растяжения, Н	9×10^4	25×10^4	6×10^5
Длина заготовки, м			
наибольшая	5,5	6,0	9,0
наименьшая	1,0	1,0	2,0
Наибольший угол изгиба, град	180	220	220
Припуск на зажим в патроне, м	0,05	0,07	0,09-0,1
Габаритные размеры, м			
длина	4,4	8,42	12,95
ширина	7,1	7,1	15,53
высота	1,4	1,4	1,6
Скорость растяжения заготовки, м/мин	0,18	0,16	0,14
Наибольшее давление в гидросистеме, МПа	6,5	12	12
Суммарная мощность электродвигателей, кВт	24	61,7	80,5

Таблица 3.2

Основные параметры	Модели станков	
	СПО-16	СПО-40
Усилие растяжения заготовки регулируемое, бесступенчатое, кН	3…160	50…400
Усилие прижима ролика к оправке регулируемое, кН	3…50	10…100
Усилие оправки к столу, кН	200	400
Длина заготовки, м		
наибольшая	3,5	6,0
наименьшая	0,8	1,0
Наибольший угол изгиба, град	270	270
Размеры рабочей поверхности стола, м	2,5	2,5

Продолжение табл. 3.2

Основные параметры	Модели	станков
	СПО-16	СПО-40
Наибольший крутящий момент поворота стола, кН·м	300	400
Набольший ход каретки растяжения, м	4,0	6,0
Продольный ход каретки прижимного ролика, м	2,2	2,7
Наибольший ход поперечного суппорта каретки растяжения, м	0,5	0,8
Наибольшее давление в гидросистеме, МПа	16	20
Скорость поворота стола регулируемая, мин$^{-1}$	0,1…0,3	0,1…0,5
Общая потребляемая мощность, кВт	42	67

3.3. Упрощенный расчет технологических параметров

Дадим иное, менее строгое, но более удобное для практического использования решение на примере гибки детали прямоугольной формы $\left(b_2 = h_2 = b_3 = h_3 = 0;\ b_1 = b,\ \ h_1 = h,\ \ F = bh;\ \ I = bh^3/12\right)$ с использованием линейно-полигональной аппроксимации кривой упрочнения.

Выпишем возможные случаи для нахождения координаты $y_{\text{н}}$ и изгибающего момента M. Согласно выражениям (3.2) имеем $\sigma_0 = B\varepsilon_0 + C$ при $\varepsilon_0 > \varepsilon_{\text{р}}$ и $\sigma_0 = E\varepsilon_0$, если $\varepsilon_0 \le \varepsilon_{\text{р}}$.

Случай 1. Пусть $\varepsilon_0 > \varepsilon_{\text{р}}$, $y_{\text{пс}} \ge h - y_{\text{н}}$, $y_{\text{пс}} = \dfrac{\sigma_{\text{р}} + \sigma_0}{E\kappa_0}$,

тогда получим $y_{\text{н}} = \dfrac{h(E \pm \sqrt{EB})}{E - B}$ (выбирается знак “+”),

$M = \dfrac{(b\kappa_0)\left[By_{\text{н}}^3 + E(h - y_{\text{н}})^3\right]}{3}$.

Этот случай выполняется только при условии, когда

$$\rho_0 \geq \rho_{0[\min]}^{(1)} = \frac{hE\left(\sqrt{EB} - B\right)}{(\sigma_0 + \sigma_p)(E - B)}. \qquad (3.9)$$

Случай 2. Пусть $\varepsilon_0 > \varepsilon_p$, $y_{пс} < h - y_н$, тогда имеем

$$y_н = \frac{(h - y_{пс})\left[\sigma_0(1 - B/E) + C\right] + (\kappa_0/2)\left[y_{пс}^2(E - B) + Bh^2\right]}{\sigma_0(1 - B/E) + B\kappa_0 h + C};$$

$$M = b\left\{\frac{\kappa_0\left[Ey_{пс}^3 + B\left((h - y_н)^3 - y_{пс}^3 + y_н^3\right)\right]}{3} + \right.$$

$$\left. + \frac{\left(\sigma_0(1 - B/E) + C\right)\left((h - y_н)^2 - y_{пс}^2\right)}{2}\right\}.$$

Случай 3. Пусть $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_p$, $y_{пс} \geq h - y_н$, $y_{пр} < y_н$, $y_{пр} = \dfrac{\varepsilon_p - \varepsilon_0}{\kappa_0}$, $y_{пс} = \dfrac{\varepsilon_p + \varepsilon_0}{\kappa_0}$, тогда получим

$$y_н = \frac{C\rho_0 + Eh}{E - B} - \varepsilon_0\rho_0 \pm$$

$$\pm\sqrt{\left(\varepsilon_0\rho_0 - \frac{C\rho_0 + Eh}{E - B}\right)^2 - 2\rho_0 y_{пр}\left(\varepsilon_p - \varepsilon_0\right) + y_{пр}^2 - \frac{Eh^2}{E - B}},$$

(выбирается знак “–”),

$$M = b\left\{\frac{\left[C - (E - B)\varepsilon_0\right]\left(y_н^2 - y_{пр}^2\right)}{2} + \frac{\kappa_0\left[B\left(y_н^3 - y_{пр}^3\right) + E\left(y_{пр}^3 + (h - y_н)^3\right)\right]}{3}\right\}.$$

Этот случай выполняется только при условии, когда $\rho_0 \geq \rho_{0[\min]}^{(3)}$, т.е.

$$\rho_0 - \frac{1}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)}\left[h + \varepsilon_0\rho_0 - \frac{C\rho_0 + Eh}{E - B} \quad +\right.$$

$$+\sqrt{\left(\varepsilon_0\rho_0-\frac{C_{\rho 0}+Eh}{E-B}\right)^2-2\rho_0 y_{\text{пр}}\left(\varepsilon_{\text{р}}-\varepsilon_0\right)+y_{\text{пр}}^2-\frac{Eh^2}{E-B}}\Bigg]\geq 0. \quad (3.10)$$

Случай 4. Пусть $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_{\text{р}}$, $y_{\text{пс}} < h - y_{\text{н}}$, $y_{\text{пр}} < y_{\text{н}}$, тогда имеем

$$y_{\text{н}} = \frac{\varepsilon_0(E-B)(h-2\varepsilon_{\text{р}}\rho_0)+C(h-2\varepsilon_0\rho_0)+Bh^2/(2\rho_0)+2(E-B)\varepsilon_{\text{р}}\varepsilon_0\rho_0}{B\kappa_0 h+2C},$$

$$M = b\Bigg\{\frac{\left[C-(E-B)\varepsilon_0\right]\left(y_{\text{н}}^2-y_{\text{пр}}^2\right)+\left[C+(E-B)\varepsilon_0\right]\left[(h-y_{\text{н}})^2-y_{\text{пс}}^2\right]}{2}+$$

$$+\frac{\kappa_0\left[(E-B)\left(y_{\text{пр}}^3+y_{\text{пс}}^3\right)+B\left(y_{\text{н}}^3+(h-y_{\text{н}})^3\right)\right]}{3}\Bigg\}.$$

При нахождении величины $y_{\text{н}}$ необходимо учитывать условия (3.9) и (3.10). Например, если $\varepsilon_0 > \varepsilon_{\text{р}}$, то при выполнении условия (3.9) имеем случай 1, если нет – случай 2. Если $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_{\text{р}}$, то при выполнении условия (3.10) имеем случай 3, если нет – случай 4.

3.4. Разработка управляющей программы формообразовании на станке ПГР-6А

В процессе гибки на станке ПГР-6А управление движением рабочих органов осуществляется системой ЧПУ, которая обеспечивает перемещение зажимных патронов растяжных цилиндров по заданной траектории в зависимости от угла изгиба заготовки.

Рассмотрим задачу расчета траектории движения зажимных патронов при огибании профильной заготовкой контура гибочного

пуансона [2, 3, 25]. При рассмотрении процесса огибания профильную заготовку заменим гибкой нерастяжимой нитью (предполагается, что изгибная жесткость заготовки пренебрежимо мала), которой соответствует продольная ось профиля, являющаяся нейтральной линией.

Исходными параметрами для кинематического расчета являются:

- контур гибочного пуансона, аппроксимируемый дугами окружностей;

- силовые параметры процесса деформирования, т.е. $\{\rho_i, \Delta\alpha_i\}_{i=1}^{n}$, где $\rho_i, \Delta\alpha_i$ – радиус кривизны по оси поворота сечения и центральный угол на *i*-м участке; *n*– количество участков постоянной кривизны на одной части (правой или левой) гибочного пуансона;

- начальная длина одной части (правой или левой) профильной заготовки $L_{\text{нач}} = \sum_{i=1}^{n} L_{\text{заг}.i} + \Delta_1$.

После зажима заготовки в патронах она подвергается предварительному растяжению силой *P* (рассматривается схема сложного нагружения Р–И) и длина ее увеличивается на величину ΔL (рис. 3.3):

$$\Delta L = \varepsilon_0 \left(\sum_{i=1}^{n} L_{\text{заг}i} + \Delta_1 \right) \text{ – для профиля постоянного сечения;}$$

$$\Delta L = \sum_{i=1}^{n} \left(\varepsilon_{0i} L_{\text{заг}.i} \right) + \varepsilon_{0n} \Delta_1 \text{ – для профиля переменного сечения,}$$

где ε_{0i} – деформация растяжения на *i*-м участке, создаваемая усилием растяжения; $L_{\text{заг}i}$ – первоначальная длина *i*-го участка заго-

товки постоянного сечения. Все исходные данные для программирования определяются из решения основной технологической задачи (см. разд. 3.1).

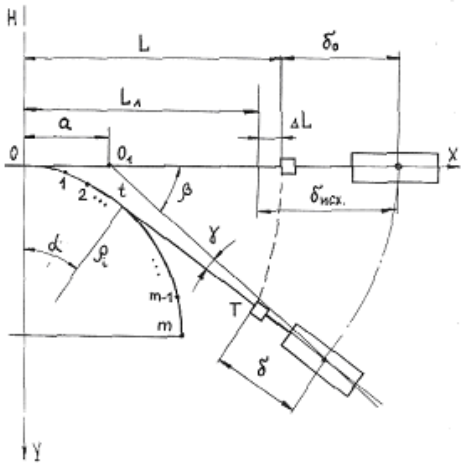


Рис. 3.3. Кинематика процесса изгиба с растяжением

В процессе изгиба ось поворота растяжного цилиндра движется в горизонтальной плоскости по дуге окружности с центром в точке 0_1 оси поворота гибочного рычага, а шток растяжного цилиндра направлен по касательной tT к контуру гибочного пуансона в месте схода профиля. Изгиб нити выполняется без растяжения и зажимной патрон описывает эвольвенту кривой участка контура (рис. 3.3).

Из геометрических соотношений получим уравнения, определяющие перемещения зажимного патрона (конца участка заготовки длиной L) в системе координат $X0Y$ станка, за которую принимаются касательная и нормаль к контуру гибочного пуансона в точке касания его прямолинейной заготовкой, растянутой в зажимных

патронах растяжных цилиндров (точка 0 – вершина гибочного пуансона):

$$X_T = A_1 + \rho_i \sin\alpha + (L - S_t)\cos\alpha;$$

$$Y_T = \rho_1 + A_2 - \rho_i \cos\alpha + (L - S_t)\sin\alpha,$$

где S_t – длина кривой участка 0t контура гибочного пуансона;

$$A_1 = \sum_{j=1}^{i-1}(\rho_j - \rho_{j+1})\sin\left(\sum_{k=1}^{j}\Delta\alpha_k\right);\quad A_2 = \sum_{j=1}^{i-1}(\rho_{j+1} - \rho_j)\cos\left(\sum_{k=1}^{j}\Delta\alpha_k\right);$$

$$S_t = \sum_{j=1}^{i-1}(\rho_j \Delta\alpha_j) + \rho_i\left(\alpha - \sum_{j=1}^{i-1}\Delta\alpha_j\right);\quad \rho_i = \rho_t.$$

Смещение штока растяжного цилиндра δ вычисляется по формуле

$$\delta = (L + \delta_0 - a)\cos\gamma - [Y_T \sin\alpha + (X_T - a)\cos\alpha], \qquad (3.11)$$

где β – угол поворота гибочного рычага, соответствующий заданному углу α; параметр a – расстояние от линии симметрии станка $H - H$ до оси поворота гибочного рычага; δ_0 – расстояние от оси поворота растяжного цилиндра до торца зажимного патрона перед началом изгиба; X_T, Y_T – координаты положения зажимного патрона в процессе изгиба в неподвижной системе координат $X0Y$. Из геометрических соотношений получим

$$\beta = \alpha + \gamma;\quad \gamma = \arcsin\left[\frac{Y_T \cos\alpha - (X_T - a)\sin\alpha}{L + \delta_0 - a}\right].$$

Здесь γ – угол поворота растяжного цилиндра относительно гибочного рычага.

На станке ПГР-6А используется специальная система координат (см. рис. 1.7). Нулем станка (точка 0) является пересечение

осей зажимных патронов в исходном положении с осью симметрии станка. Перемещения из нуля станка отсчитываются в минус, к нулю – в плюс.

Задавая угол $\alpha_i = i\Delta\alpha,$ $\Delta\alpha = \alpha_{\text{п}} / m,$ где $\alpha_{\text{п}} = \sum_{j=1}^{n} \Delta\alpha_j;$

$\alpha_{\text{п}}$ – полный угол изгиба одной из половин детали; $i = \overline{1,m};$ m – количество программируемых точек для управляющей программы, найдем по формуле (3.11) требуемые (программные) перемещения торца зажимного патрона: $\delta_i = f(\alpha)$. Функция $\Delta\delta_i = \delta_i - \delta'_{i-1}$ (δ_i – текущее смещение, соответствующее углу α_i; δ_{i-1} – предыдущее смещение, соответствующее углу α_{i-1}) задает кривую для программоносителя. Данный расчет необходимо провести как для правого, так и для левого зажимного патрона ввиду того, что поворот гибочных рычагов осуществляется независимо друг от друга.

Управляющая программа составляется таким образом, чтобы правая и левая части траектории были заданы одинаковым количеством интервалов, причем для несимметричных в плане деталей $m \le 60,$ для симметричных $m \le 30.$

В зависимости от формы контура гибочного пуансона, его размеров, величины асимметрии, положения оси поворота растяжного цилиндра на гибочном рычаге в различных частях траектории функция может принимать значения различных знаков ("втягивание" или "травление" штока растяжного цилиндра). Положение кареток растяжных цилиндров на гибочных рычагах, определяемые величиной $L_{\text{нач}} + \delta_{\text{нач}} = L + \delta_0$ выбирается таким, чтобы смещение δ торцов зажимных патронов в процессе гибки находилось в пределах максимального хода штока растяжного цилиндра, а угол γ

не превышал максимально допустимого угла, т.е. в процессе гибки необходимо выполнение условий:

$$\delta_{min} \le \delta \le \delta_{max};\ |\gamma| \le |\gamma_{max}|;\ \beta \le 90^{\circ}, \qquad (3.12)$$

где δ_{min}, δ_{max} – минимально возможное и максимально возможное перемещения штока растяжного цилиндра; γ_{max} – максимально допустимый угол.

Исходное положение торца зажимного патрона $\delta_{нач}$ зависит от первоначальной длины заготовки и изменяется в пределах: $a_1 \le \delta_{нач} \le a_2$, где $a_1 \ge \delta_{min} + \Delta L;\ a_2 \le \delta_{max}$.

Каретки растяжных цилиндров располагаются на гибочных рычагах в определенных положениях, определяемых величиной *c*, которой соответствует расстояние от торца зажимного патрона, выдвинутого в крайнее положение до оси симметрии станка.

Для станка ПГР-6А величину *c* следует выбирать из следующего ряда: 0,11; 0,22; …2,09; 2,11м. Кроме того, $\delta_{min} = 0{,}61$м; $\delta_{max} = 1{,}21$м; $\gamma_{max} = \pm 30^{\circ}$.

Значение величины *c* вычисляется по формуле:

$$c = \delta_{нач} + L_{нач} - \delta_{max},$$

где $\delta_{нач} = \delta_0 + \Delta L$.

Допустимое значение $\delta_{нач}$, при котором в процессе гибки выполняются условия (3.12), выбирается из диапазона: $a_{1д} \le \delta_{нач} \le a_{2д}$, где $a_{1д} \ge a_1,\ a_{2д} \le a_2$.

Исходное положение торца зажимного патрона *B* от выдвинутого в крайнее положение находим по формуле:

$$B = \delta_{max} - \delta_{нач}.$$

При реализации таких схем сложного нагружения, как И–Р, Р–И–Р, расчет программируемых параметров производится по изложенной методике с учетом особенностей этих схем.

В работах [2, 11, 25] приведена методика формирования управляющей программы к системе ЧПУ профилегибочного станка ПГР-6А с учетом геометрической нелинейности неотформованного участка заготовки *tT*. Учет геометрической нелинейности процесса формообразования позволяет повысить точность изготовления деталей.

В работе [5] исследована кинематика процесса формообразования профильных деталей на станках СПО и изложена методика расчета программируемых параметров для формирования управляющей программы к устройству ЧПУ станка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация технологической подготовки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности / В.И. Меркулов, В.П. Соколов, С.И. Феоктистов и др. М.: Изд-во ЭКОМ, 2001. 320 с.

2. *Бодунов Н.М., Дружинин Г.В., Закиров И.М., Раздайбедин А.А.* Методика проектирования процессов гибки профилей на оборудовании с ЧПУ: Учеб. пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 92 с.

3. *Бодунов Н.М.* Некоторые задачи автоматизированного проектирования процессов гибки деталей из профилей на станках ПГР с ЧПУ / Инновационные технологии в проектировании, производстве и испытаниях изделий машиностроения. Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2004. С.53–56.

4. *Бодунов Н.*М., *Закиров И.М., Ружичка К.* Задачи автоматизированного проектирования процессов гибки-прокатки деталей на роликовых профилегибочных машинах с ЧПУ / Инновационные технологии в проектировании, производстве и испытаниях изделий машиностроения. Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2004. С.57–63.

5. *Бодунов Н.М., Горбунов В.А., Дружинин Г.В.* Расчет кинематики профилегибочного станка СПО с программным управлением / Казан. авиац. ин-т. Казань, 1989. 7 с. Деп. в ВНИИТЭМР 30.11.89. №322-мш89.

6. *Бодунов Н.М.* Автоматизированное проектирование процессов гибки деталей из профилей на станках ПГР с ЧПУ // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Авиакосмические технологии и оборудование». Казань, 2004. С.124–129.

7. *Бодунов Н.М.* Инновационные принципы построения и организации автоматизированной системы подготовки производства тонкостенных деталей авиатехники // Труды Междунар. науч.-метод. конф. «Инновационное образование в техническом университете». Казань, 2004. С.621–624.

8. *Бодунов Н.М., Закиров И.М.* Имитационное моделирование процессов гибки тонкостенных деталей //Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества». М.: Изд-во МГТУ ГА. 2003. С.148–149.

9. *Борисов В.Г.* Процессы изготовления тонкостенных деталей самолетов методами пластического формообразования: Учеб. пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2004. 236 с.

10. *Вдовин С.И.* Методы расчета и проектирования на ЭВМ процессов штамповки листовых и профильных заготовок. М.: Машиностроение, 1988. 160 с.

11. *Дружинин Г.В., Закиров И.М., Бодунов Н.М.* Базисные функции в приближенных решениях краевых задач. Казань: ФЭН, 2000. 376 с.

12. *Ершов В.И., Глазков В.И., Каширин М.Ф.* Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1990. 312 с.

13. *Катков В.Ф.* Оборудование и средства автоматизации и механизации заготовительно-штамповочных цехов. М.: Машиностроение, 1985. 384 с.

14. *Кочетков А.В., Бржозовский Б.М., Челпанов И.Б.* Формообразование сложнопрофильных деталей на технологических роботах гибки с растяжением. Саратов: Изд-во СГТУ, 1996. 192 с.

15. *Лысов М.И., Закиров И.М.* Пластическое формообразование тонкостенных деталей авиатехники. М.: Машиностроение, 1983. 176 с.

16. *Лысов М.И., Сосов Н.В.* Формообразование деталей гибкой. М.: Машиностроение, 2001. 388 с.

17. *Норенков И.П., Кузьмик П.К.* Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. М.: Изд-во МГТУ, 2002. 320 с.

18. *Одинг С.С., Лопасов С.А., Скрыльников В.В. и др.* Синтез управляющих программ формообразования деталей из листа, профиля и многослойных панелей на гибочно-растяжном оборудовании с программным управлением // Кузнечно-штамповочное производство. 1993. № 9. С.9 – 12.

19. *Попов Е.А., Ковалев В.Г. Шубин И.Н.* Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МГТУ, 2003. 480 с.

20. *Раздайбедин А.А., Дружинин Г.В., Бодунов Н.М.* Автоматизация технологического проектирования в системе управления базами данных Microsoft Access: Учеб. пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 60 с.

21. Современные технологии авиастроения / Под ред. А.Г.Братухина, Ю.Л.Иванова. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.

22. *Феоктистов С.И.* Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности. Владивосток: Дальнаука, 2001. 183 с.

23. *Серебреницкий П.П., Схиртладзе А.Г.* Программирование для автоматизированного оборудования. М.: Высшая школа, 2003. 592 с.

24. *Ярковец А.И.* Основы механизации и автоматизации технологических процессов в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1991. 224 с.

25. *Bodunov N.M., Zakirov I.M., Ruzicka K.* Increasing the accuracy for parts of profiles production on PGR machines with program control and LGME machines // Proc. 7-th Intern. conf. on Technologia'2001. Vol.1 / Slovak University of Technology. Bratislava, 2001. P. 248–252.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение ……..…….. 3
1. Теоретические основы процесса гибки……..... 6
1.1. Классификация криволинейных профильных деталей 6
1.2. Анализ возможных схем процессов гибки с растяжением ……..…….. 8
1.3. Особенности процессов гибки при простом и сложном нагружении ……..…….. 16
1.4. Автоматизированный профилегибочный станок ПГР-6А …….. 19
1.5. Задачи диагностики и контроля за состоянием процесса формообразования деталей на гибочно-растяжном оборудовании ……..……... 30
2. Основы проектирования процессов пластического формообразования профильных деталей на гибочно-растяжном оборудовании ……...……... 37
2.1 Математическая модель и ее понятие …….……..……. 37
2.2. Информационные и статистические особенности формообразования профильных деталей ……..…. 39
2.3. Показатели качества и оптимизация процесса формообразования на профилегибочном станке ……..…..... 44
2.4. Математическое моделирование геометрических форм профильной детали ……...…… 47
2.5. Постановка основной технологической задачи …..... 49
2.6. Методика математического моделирования процессов пластического формообразования ……..……. 51

2.7. Формализация задачи, разработка блок-схемы и алгоритмов ……... 52
2.8. Основные принципы разработки управляющих программ формообразования …….. 54
3. Моделирование процесса гибки профильных деталей на гибочно-растяжном оборудовании с ЧПУ ……..…… 65
3.1. Методика расчета технологических параметров процесса гибки и геометрии оснастки ……..……..…. 65
3.2. Методика выбора гибочно-растяжного оборудования ……...……. 77
3.3. Упрощенный расчет технологических параметров …. 79
3.4. Разработка управляющей программы формообразовании на станке ПГР-6А ……... 81
Список литературы ……. 88

БОДУНОВ Николай Михайлович
ДРУЖИНИН Георгий Владимирович
РАЗДАЙБЕДИН Анатолий Александрович

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОБОРУДОВАНИИ С ЧПУ

Учебное пособие

Ответственный за выпуск О.П.Хабибуллина
Технический редактор С.В.Фокеева

Подписано в печать 12,12.08

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 57,5. Усл. печ. л. 5,34. Усл. кр.-отт. 5,34. Усл.-изд. л. 5,27.
Тираж 200. Заказ В 145 /л239

Издательство Казанского государственного университета
Типография Издательства Казанского государственного университета
420111, Казань, К.Маркса, 10