Метод построения многомерной модели для поиска значений параметров процесса формовки

**Человек:** Объектом исследования являются геометрические модели процесса инкрементальной формовки деталей из листового материала. Предметом исследования является графическая модель для поиска оптимальных значений параметров процесса формовки на базе многомерной начертательной геометрии. Автором в статье рассмотрены основные оптимизирующие факторы и параметры процесса. Особое внимание уделяется задачам построения геометрических моделей определения оптимизирующих факторов (зона контакта, время обработки и качество поверхности получаемой детали) и оптимизации параметров (профиль и траектория движения формообразующего инструмента) для инкрементального формообразования. Методом исследования является способ построении графической оптимизационной модели процесса с использованием проекционного чертеж Радищева для многомерного пространства. Так же было применено математическое моделирование для проверки правильности полученных оптимальных параметров. Новизна исследования заключается в применении для многофакторной, многокомпонентной системы методов многомерной начертательной геометрии в исследовании процесса инкрементальной формовки с целью повышения качества изготавливаемых деталей. Основные выводы. С помощью графической оптимизационной модели на базе многомерной начертательной геометрии был получен диапазон значений параметров инкрементальной формовки для изделия прогнозируемого качества. Проведено моделирование процесса с полученными параметрами. Проведена инкрементальная формовка детали из листового металла конической формы. Полученные результаты соответствует заданным критериям качества.

**Key words:** инкрементальная формовка, послойное деформирование, листовая штамповка, чертеж Радищева, оптимизация, оптимизация параметров, оптимизирующие факторы, параметры процесса, многомерная геометрия, моделирование

=================================

**FastText\_KMeans\_Clean:** В данной работе при построении графической оптимизационной модели использовались два параметров процесса формовки (x 1 – радиус профиля рабочей части формообразующего инструмента Rt , x 2 – расстояние между витками траектории Δz движения инструмента), в зависимости от значений трех оптимизирующих факторов (y 1 - качество поверхности полученной инкрементальной формовкой детали, y 2 - машинное время процесса формовки, y 3 – усилие формования), которые геометрически представляют собой 3-поверхности, заданные 1-поверхностями уровня, описывающие зависимость между параметрами процесса формовки и оптимизирующими факторами. В общем виде математическую постановку задачи можно сформулировать следующим образом. Угол наклона стенки конуса составляет 60 градусов. На пересечении гиперповерхности y 2( x 1, x 2) и гиперплоскости оптимизирующего фактора y 2= y 2оптим, получим кривую оптимальных значений x 1 и x 2 по времени формовки. Рисунок 7 – оптимизация по деформирующему усилию. Рисунок 8 – Результат оптимизации. Применение графической многомерной модели и разработанных на ее основе алгоритмов решения задачи позволяет получать значения параметров процесса инкрементальной формовки детали из листового материала, при этом наглядно оценивать процесс формовки, оперативно устанавливать оптимальные режимы, параметры, а также прогнозировать характеристики исследуемого процесса.

**Key words part:** 0.7407407407407407

=================================

**FastText\_KMeans\_Raw/:** В данной работе при построении графической оптимизационной модели использовались два параметров процесса формовки (x 1 – радиус профиля рабочей части формообразующего инструмента Rt , x 2 – расстояние между витками траектории Δz движения инструмента), в зависимости от значений трех оптимизирующих факторов (y 1 - качество поверхности полученной инкрементальной формовкой детали, y 2 - машинное время процесса формовки, y 3 – усилие формования), которые геометрически представляют собой 3-поверхности, заданные 1-поверхностями уровня, описывающие зависимость между параметрами процесса формовки и оптимизирующими факторами. Решение задачи оптимизации. σs – напряжение текучести(σs = 170 МПа для листа АМцМ 1мм.);. На основе полученных проекций площадей для диапазона значений x 1 и x 2 и формулы (1) получим значениям деформирующего усилия по оси Z . Рисунок 9 – Результат оптимизации. Применение графической многомерной модели и разработанных на ее основе алгоритмов решения задачи позволяет получать значения параметров процесса инкрементальной формовки детали из листового материала, при этом наглядно оценивать процесс формовки, оперативно устанавливать оптимальные режимы, параметры, а также прогнозировать характеристики исследуемого процесса.

**Key words part:** 0.7407407407407407

=================================

**FastText\_PageRank\_Clean/:** Решению этой задачи посвящена настоящая статья. Угол наклона стенки конуса составляет 60 градусов. Материал заготовки АМцМ [4], толщиной 1 мм. Рисунок 1 – Постановка задачи. Решение задачи оптимизации. Рисунок 2 – Высота гребня. S – толщина стенки;. σs – напряжение текучести(σs = 170 МПа для листа АМцМ 1мм.);.

**Key words part:** 0.4074074074074074

=================================

**FastText\_PageRank\_Raw/:** Решению этой задачи посвящена настоящая статья. Угол наклона стенки конуса составляет 60 градусов. Материал заготовки АМцМ [4], толщиной 1 мм. Рисунок 1 – Постановка задачи. Решение задачи оптимизации. Рисунок 2 – Высота гребня. S – толщина стенки;. г. результат оптимизации.

**Key words part:** 0.4074074074074074

=================================

**Mixed\_ML\_TR/:** Все вышеперечисленные недостатки инкрементальной формовки некритичны при запуске процесса получения детали на станке ЧПУ с оптимальными параметрами. В данной работе при построении графической оптимизационной модели использовались два параметров процесса формовки (x 1 – радиус профиля рабочей части формообразующего инструмента Rt , x 2 – расстояние между витками траектории Δz движения инструмента), в зависимости от значений трех оптимизирующих факторов (y 1 - качество поверхности полученной инкрементальной формовкой детали, y 2 - машинное время процесса формовки, y 3 – усилие формования), которые геометрически представляют собой 3-поверхности, заданные 1-поверхностями уровня, описывающие зависимость между параметрами процесса формовки и оптимизирующими факторами. Значения компонентов, лежащие в полученной области, будут решением задачи по нахождению оптимальных значений параметров многофакторного процесса инкрементальной формовки. В частности, найдем оптимальные значения параметров инкрементальной формовки, форма профиля рабочей части инструмента Rt и расстояние между витками траектории Δz движения инструмента (рис. 1а), методом построения многомерной модели. а - параметры для оптимизации процесса, б – параметры детали. Стратегией формовки конуса выбрана послойная обработка. Применение графической многомерной модели и разработанных на ее основе алгоритмов решения задачи позволяет получать значения параметров процесса инкрементальной формовки детали из листового материала, при этом наглядно оценивать процесс формовки, оперативно устанавливать оптимальные режимы, параметры, а также прогнозировать характеристики исследуемого процесса.

**Key words part:** 0.7777777777777778

=================================

**MultiLingual\_KMeans/:** Все вышеперечисленные недостатки инкрементальной формовки некритичны при запуске процесса получения детали на станке ЧПУ с оптимальными параметрами. В частности, найдем оптимальные значения параметров инкрементальной формовки, форма профиля рабочей части инструмента Rt и расстояние между витками траектории Δz движения инструмента (рис. 1а), методом построения многомерной модели. а - параметры для оптимизации процесса, б – параметры детали. Стратегией формовки конуса выбрана послойная обработка.

**Key words part:** 0.6666666666666666

=================================

**Multilingual\_PageRank/:** Несмотря на преимущество, инкрементальная формовка имеет ряд недостатков, которые сдерживают применение данного процесса. Первый недостаток процесса накладывает на форму конечной детали и называется — "закон синуса" [25], согласно которому невозможно получить вертикальные стенки, так как толщина готовой детали будет стремиться к нулю. Математическое моделирование многофакторных процессов связано с выполнением большого объема вычислений и отсутствием наглядного представления об объекте исследования. Угол наклона стенки конуса составляет 60 градусов. Материал заготовки АМцМ [4], толщиной 1 мм. Рисунок 5 – Оптимизация по времени формовки. Наибольшее усилие формования приходиться на ось Z [21], оно на порядок выше, чем по направлениям X и Y . S – толщина стенки;.

**Key words part:** 0.5555555555555556

=================================

**RuBERT\_KMeans\_Without\_ST/:** В данной работе при построении графической оптимизационной модели использовались два параметров процесса формовки (x 1 – радиус профиля рабочей части формообразующего инструмента Rt , x 2 – расстояние между витками траектории Δz движения инструмента), в зависимости от значений трех оптимизирующих факторов (y 1 - качество поверхности полученной инкрементальной формовкой детали, y 2 - машинное время процесса формовки, y 3 – усилие формования), которые геометрически представляют собой 3-поверхности, заданные 1-поверхностями уровня, описывающие зависимость между параметрами процесса формовки и оптимизирующими факторами. По полученным значениям t , для диапазона значений x 1 и x 2 , построимгиперповерхность y 1( x 1, x 2) и гиперплоскость оптимизирующего фактора y 1= y 1оптим . Рисунок 8 – Результат оптимизации. Применение графической многомерной модели и разработанных на ее основе алгоритмов решения задачи позволяет получать значения параметров процесса инкрементальной формовки детали из листового материала, при этом наглядно оценивать процесс формовки, оперативно устанавливать оптимальные режимы, параметры, а также прогнозировать характеристики исследуемого процесса.

**Key words part:** 0.7407407407407407

=================================

**RuBERT\_KMeans\_With\_ST/:** Рабочий профиль может формообразующего инструмента может иметь различную геометрию, но лучше всех зарекомендовала себя сферическая форма [12]. Решению этой задачи посвящена настоящая статья. Для нахождения длины траектории составлена программа в Mathcad, в которой определяется количество витков траектории, а затем определяется горизонтальное и вертикальное перемещение в зависимости от значений x 1 и x 2 (рис. 4). Для определения геометрической площади контакта заготовки с формообразующем инструментом и проекции на ось Z (для различных значений Rt и Δz) используем моделирование с помощью CAD пакета Siemens NX, методика определения площади пятна контакта описана статье [13].

**Key words part:** 0.4074074074074074

=================================

**RUBERT\_page\_rank\_Without\_ST/:** Рабочий профиль может формообразующего инструмента может иметь различную геометрию, но лучше всех зарекомендовала себя сферическая форма [12]. Рисунок 1 – Постановка задачи. оптимизация по высоте гребня от следа формообразующего инструмента. Рисунок 5 – Оптимизация по времени формовки. Для ее изготовления была спроектирована и изготовлена оснастка.

**Key words part:** 0.4814814814814815

=================================

**RUBERT\_page\_rank\_With\_ST/:** Описание метода построения многомерной модели. Решение задачи оптимизации. г. результат оптимизации. Рисунок 8 – Результат оптимизации. Рисунок 9 – Результат оптимизации.

**Key words part:** 0.4444444444444444

=================================

**RUSBERT\_KMeans\_Without\_ST/:** Рабочий профиль может формообразующего инструмента может иметь различную геометрию, но лучше всех зарекомендовала себя сферическая форма [12]. В данной работе при построении графической оптимизационной модели использовались два параметров процесса формовки (x 1 – радиус профиля рабочей части формообразующего инструмента Rt , x 2 – расстояние между витками траектории Δz движения инструмента), в зависимости от значений трех оптимизирующих факторов (y 1 - качество поверхности полученной инкрементальной формовкой детали, y 2 - машинное время процесса формовки, y 3 – усилие формования), которые геометрически представляют собой 3-поверхности, заданные 1-поверхностями уровня, описывающие зависимость между параметрами процесса формовки и оптимизирующими факторами. На пересечении гиперповерхности y 3( x 1, x 2) и гиперплоскости оптимизирующего фактора y 3= y 3оптим, получим кривую оптимальных значений x 1 и x 2 по времени формовки. Так для заданной детали в виде конуса оптимальными параметрами формовки получились радиус инструмента Rt =10 мм. и шаг между витками Δz =3 мм.

**Key words part:** 0.6296296296296297

=================================

**RUSBERT\_KMeans\_With\_ST/:** Значения компонентов, лежащие в полученной области, будут решением задачи по нахождению оптимальных значений параметров многофакторного процесса инкрементальной формовки. На пересечении гиперповерхности y 2( x 1, x 2) и гиперплоскости оптимизирующего фактора y 2= y 2оптим, получим кривую оптимальных значений x 1 и x 2 по времени формовки. в. оптимизация по деформирующему усилию . Так для заданной детали в виде конуса оптимальными параметрами формовки получились радиус инструмента Rt =10 мм. и шаг между витками Δz =3 мм.

**Key words part:** 0.6666666666666666

=================================

**RUSBERT\_page\_rank\_Without\_ST/:** Рисунок 1 – Постановка задачи. Рисунок 2 – Высота гребня. S – толщина стенки;. F z- проекция площади контакта на ось Z (рис. 6). Рисунок 6 – Определение зоны контакта.

**Key words part:** 0.3333333333333333

=================================

**RUSBERT\_page\_rank\_With\_ST/:** Несмотря на преимущество, инкрементальная формовка имеет ряд недостатков, которые сдерживают применение данного процесса. Рисунок 1 – Постановка задачи. Рисунок 2 – Высота гребня. S – толщина стенки;. Рисунок 6 – Определение зоны контакта.

**Key words part:** 0.4444444444444444

=================================

**Simple\_PageRank/:** Авторы [17, 20, 24] выделяют два основных параметра оказывающих наибольшее влияние на процесс — форма профиля рабочей части инструмента Rt и расстояние между витками траектории Δz движения инструмента. В отечественных исследованиях авторами работ [5],[7] проводилась оптимизация параметров для процессов локального деформирования, схожих по принципу с инкрементальной формовкой, а именно для ротационной вытяжки. Все рассмотренные работы объединяет то, что при такой оптимизации не учитывается многогранность факторов данного процесса, а значит, оптимизация по одному фактору не дает объективной картины процесса, т.к. оптимальные значения параметров для одного фактора могут не соответствовать оптимальным значениям для другого фактора. В данной работе при построении графической оптимизационной модели использовались два параметров процесса формовки (x 1 – радиус профиля рабочей части формообразующего инструмента Rt , x 2 – расстояние между витками траектории Δz движения инструмента), в зависимости от значений трех оптимизирующих факторов (y 1 - качество поверхности полученной инкрементальной формовкой детали, y 2 - машинное время процесса формовки, y 3 – усилие формования), которые геометрически представляют собой 3-поверхности, заданные 1-поверхностями уровня, описывающие зависимость между параметрами процесса формовки и оптимизирующими факторами. Для нахождения длины траектории составлена программа в Mathcad, в которой определяется количество витков траектории, а затем определяется горизонтальное и вертикальное перемещение в зависимости от значений x 1 и x 2 (рис. 4). Методика моделирования процесса инкрементальной формовки описана в статье [1].

**Key words part:** 0.7407407407407407

=================================

**TextRank/:** Так в работе [23] были получены оптимальные значения параметров процесса с заданной толщиной готовой детали. В данной работе при построении графической оптимизационной модели использовались два параметров процесса формовки (x 1 – радиус профиля рабочей части формообразующего инструмента Rt , x 2 – расстояние между витками траектории Δz движения инструмента), в зависимости от значений трех оптимизирующих факторов (y 1 - качество поверхности полученной инкрементальной формовкой детали, y 2 - машинное время процесса формовки, y 3 – усилие формования), которые геометрически представляют собой 3-поверхности, заданные 1-поверхностями уровня, описывающие зависимость между параметрами процесса формовки и оптимизирующими факторами. Значения компонентов, лежащие в полученной области, будут решением задачи по нахождению оптимальных значений параметров многофакторного процесса инкрементальной формовки. В частности, найдем оптимальные значения параметров инкрементальной формовки, форма профиля рабочей части инструмента Rt и расстояние между витками траектории Δz движения инструмента (рис. 1а), методом построения многомерной модели. Нужно чтобы параметры процесса были подобны таким образом, чтобы высота гребня от формообразующего инструмента была не более 0,2 мм, чтобы поверхность детали удовлетворяла требованиям [8], при этом время формовки должно превышать 15 минут. Применение графической многомерной модели и разработанных на ее основе алгоритмов решения задачи позволяет получать значения параметров процесса инкрементальной формовки детали из листового материала, при этом наглядно оценивать процесс формовки, оперативно устанавливать оптимальные режимы, параметры, а также прогнозировать характеристики исследуемого процесса.

**Key words part:** 0.6666666666666666

=================================

**TF-IDF\_KMeans/:** Машинное время процесса инкрементальной формовки сопоставимо со временем необходимым при фрезеровании детали на станке с ЧПУ [6]. В частности, найдем оптимальные значения параметров инкрементальной формовки, форма профиля рабочей части инструмента Rt и расстояние между витками траектории Δz движения инструмента (рис. 1а), методом построения многомерной модели. а - параметры для оптимизации процесса, б – параметры детали. По полученным значениям t , для диапазона значений x 1 и x 2 , построимгиперповерхность y 1( x 1, x 2) и гиперплоскость оптимизирующего фактора y 1= y 1оптим . Рисунок 8 – Результат оптимизации. Математическое моделирование инкрементальной формовки. На рисунке 10б показано распределение толщины детали, которое соответствует закону синуса. Усилия на приводы станка с ЧПУ сопоставимы с расчетными значениями, порядка 3кН, и находятся в пределах рабочего диапазона оборудования.

**Key words part:** 0.7407407407407407

=================================

**Текст:** Инкрементальная листовая формовка — это новый процесс обработки материала давлением. Основным преимуществом инкрементальной формовки, в сравнении с традиционными процессами листовой штамповки, являются снижение затрат и времени на подготовку производства детали. Это преимущество делает данную технологию привлекательной для единичного и мелкосерийного производства [6].. Несмотря на преимущество, инкрементальная формовка имеет ряд недостатков, которые сдерживают применение данного процесса.. Первый недостаток процесса накладывает на форму конечной детали и называется — «закон синуса» [25], согласно которому невозможно получить вертикальные стенки, так как толщина готовой детали будет стремиться к нулю. Для данного процесса максимально допустимый угол стенки, который можно получить находиться в пределах 60 градусов. Согласно закону синуса при таком значении угла, толщина стенки уменьшается наполовину. Предельная величина зависит от пластичных свойств листового материала.. Второй недостаток процесса инкрементальной формовки связан с формообразующим инструментом. Рабочий профиль может формообразующего инструмента может иметь различную геометрию, но лучше всех зарекомендовала себя сферическая форма [12]. За счет локального приложения нагрузки формообразующим инструментом на заготовку, остается след в виде канавки на обрабатываемой поверхности [18]. Чем больше пятно контакта, тем отчетливее видны дефекты в виде гребней на детали. Радиус профиля рабочей части сферического формообразующего инструмента необходимо учитывать, что бы обрабатываемая часть поверхности готовой детали соответствовала стандартам качества штампуемых изделий из листа.. Третий недостаток процесса инкрементального формообразования — это время необходимое для получения из листовой заготовки готовой детали. Время подготовки производства и создания формообразующей оснастки для инкрементального формообразования намного меньше традиционных процессов листовой штамповки. Но машинное время инкрементальной формовки значительно больше остальных процессов обработки металлов давлением. Машинное время процесса инкрементальной формовки сопоставимо со временем необходимым при фрезеровании детали на станке с ЧПУ [6].. Все вышеперечисленные недостатки инкрементальной формовки некритичны при запуске процесса получения детали на станке ЧПУ с оптимальными параметрами.. Авторы [17, 20, 24] выделяют два основных параметра оказывающих наибольшее влияние на процесс — форма профиля рабочей части инструмента Rt и расстояние между витками траектории Δz движения инструмента.. В зарубежных и отечественных работах исследовался вопрос оптимизации основных параметров процесса формовки. Так в работе [23] были получены оптимальные значения параметров процесса с заданной толщиной готовой детали. В работах [15],[22] поиск оптимальных параметров проводился, чтобы получить поверхность детали с заданными предельными отклонениями от исходной геометрии. В работе [16] оптимизация проводилась по нагрузкам, приходящимся на приводы станка с ЧПУ, чтобы можно было использовать менее мощное оборудование. Так же в зарубежных исследованиях вопросом оптимизации параметров процесса инкрементальной формовки занимались авторы работ [19],[14]. В отечественных исследованиях авторами работ [5],[7] проводилась оптимизация параметров для процессов локального деформирования, схожих по принципу с инкрементальной формовкой, а именно для ротационной вытяжки.. Все рассмотренные работы объединяет то, что при такой оптимизации не учитывается многогранность факторов данного процесса, а значит, оптимизация по одному фактору не дает объективной картины процесса, т.к. оптимальные значения параметров для одного фактора могут не соответствовать оптимальным значениям для другого фактора. Чтобы учесть все моменты процесса инкрементальной формовки нужно оптимизировать параметры процесса сразу по нескольким факторам. Применение традиционного математического моделирования для оптимизации данного процесса осложняется в связи с необходимостью выявления закономерностей, учитывающее большое число факторов. Математическое моделирование многофакторных процессов связано с выполнением большого объема вычислений и отсутствием наглядного представления об объекте исследования.. Данную задачу, учитывающую множество независимых параметров и факторов, можно решить, с помощью многомерной начертательной геометрии, которая даст наглядную интерпретацию полученных результатов. При построении графической оптимизационной модели для решения многокомпонентной системы часто используют проекционный чертеж Радищева [9]. Данный метод можно применить и для оптимизации процесса инкрементального формообразования. Решению этой задачи посвящена настоящая статья.. Описание метода построения многомерной модели. В многомерной начертательной геометрии исходные данные и полученные результаты представляются в виде графической модели в форме линейных и нелинейных подпространств многомерного пространства и отношений между ними.. Возможности методов геометрического моделирования на основе применения чертежа Радищева с целью оптимизации рассмотрены в работах [2, 3, 10]. В работах сформулированы теоретические основы и рассмотрены задачи построения оптимизационных моделей и алгоритмы их решения.. Рассмотрим алгоритм построения области пересечения гиперповерхности с гиперплоскостью уровня, который реализуется следующим образом: гиперповерхность описывает зависимость оптимизирующих факторов от компонентов системы, а гиперплоскость задает требуемое значение оптимизирующего фактора.. В данной работе при построении графической оптимизационной модели использовались два параметров процесса формовки (x 1 – радиус профиля рабочей части формообразующего инструмента Rt , x 2 – расстояние между витками траектории Δz движения инструмента), в зависимости от значений трех оптимизирующих факторов (y 1 - качество поверхности полученной инкрементальной формовкой детали, y 2 - машинное время процесса формовки, y 3 – усилие формования), которые геометрически представляют собой 3-поверхности, заданные 1-поверхностями уровня, описывающие зависимость между параметрами процесса формовки и оптимизирующими факторами.. Пересечения гиперповерхности с гиперплоскостью уровня для каждого фактора процесса даст три кривые, которые образуют область оптимальных значений параметров. Значения компонентов, лежащие в полученной области, будут решением задачи по нахождению оптимальных значений параметров многофакторного процесса инкрементальной формовки.. Постановка задачи. В общем виде математическую постановку задачи можно сформулировать следующим образом. Компонентами системы являются параметры процесса формовки X={ x1,…, xn} и критерии качества Y={ y1,…, ym} . Каждому набору параметров X соответствуют числовые значения критериев Y . Каждому из Y можно задать значения y1\* и возможные величины отклонения Δ i от этих значений: | yi- yi\*|≤ Δ i .. Для заданных значений критериев Y\*={ y1\*,…, ym\*} требуется определить общую область значений параметров в многомерном пространстве En+m .. В частности, найдем оптимальные значения параметров инкрементальной формовки, форма профиля рабочей части инструмента Rt и расстояние между витками траектории Δz движения инструмента (рис. 1а), методом построения многомерной модели. Ограничим диапазон поиска значения оптимальных параметров для Rt от 6 до 15мм. (x1 ) и для Δz от 0,1 до 10 мм. (x2 ). Процесс формовки будем рассматривать для детали формой конуса (рис. 1б). Угол наклона стенки конуса составляет 60 градусов. Материал заготовки АМцМ [4], толщиной 1 мм.. . Рисунок 1 – Постановка задачи. а - параметры для оптимизации процесса, б – параметры детали. Для поиска оптимальных значений выберем три оптимизирующих фактора. Нужно чтобы параметры процесса были подобны таким образом, чтобы высота гребня от формообразующего инструмента была не более 0,2 мм, чтобы поверхность детали удовлетворяла требованиям [8], при этом время формовки должно превышать 15 минут. При формовании детали будет использоваться фрезерный станок с ЧПУ, которой сможет развить усилие деформирования не больше 3x10 кН.. Решение задачи оптимизации. а. оптимизация по высоте гребня от следа формообразующего инструмента.. После формообразования на поверхности детали от локального приложения нагрузки формообразующим инструментом остаются следы в виде гребней (рис. 2а).. . Рисунок 2 – Высота гребня. а – гребни от инструмента, б – расчет высоты гребня t. Высота гребней t зависит от радиуса профиля формообразующего инструмента Rt и шага между витками траектории Δz (рис. 2б) и ее можно определить из выражения:. . По полученным значениям t , для диапазона значений x 1 и x 2 , построимгиперповерхность y 1( x 1, x 2) и гиперплоскость оптимизирующего фактора y 1= y 1оптим . (рис. 3).. . Рисунок 3 – оптимизация по высоте гребня от следа формообразующего инструмента. На пересечении гиперповерхности y 1( x 1, x 2) и гиперплоскости оптимизирующего фактора y 1= y 1оптим, получим кривую оптимальных значений x 1 и x 2 по высоте гребня.. б. оптимизация по времени инкрементальной формовки.. Инкрементальная формовка проходит с постоянной скоростью перемещение инструмента. Оптимальная скорость перемещения инструмента для формовки заготовки из алюминиевых сплавов равна v обр. =1000 мм/мин [21]. Определяем время формовки по расстоянию, которое проходит формообразующий инструмент. Стратегией формовки конуса выбрана послойная обработка. Это значит, что траектория состоит из горизонтального и вертикального перемещения. Инструмент делает один полный оборот в горизонтальной плоскости, а затем внедряется в заготовку на величину Δz . Для нахождения длины траектории составлена программа в Mathcad, в которой определяется количество витков траектории, а затем определяется горизонтальное и вертикальное перемещение в зависимости от значений x 1 и x 2 (рис. 4). По полученным данным определяем время формовки t обр. в зависимости от значений x 1 и x 2 .. По полученным значениям t обр , для диапазона значений x 1 и x 2 , построимгиперповерхность y 2( x 1, x 2) и гиперплоскость оптимизирующего фактора y 2= y 2оптим . (рис. 5).. . Рисунок 4 - Определение количества витков и длины траектории формовки в MathCad. . Рисунок 5 – Оптимизация по времени формовки. На пересечении гиперповерхности y 2( x 1, x 2) и гиперплоскости оптимизирующего фактора y 2= y 2оптим, получим кривую оптимальных значений x 1 и x 2 по времени формовки.. в. оптимизация по деформирующему усилию .. Наибольшее усилие формования приходиться на ось Z [21], оно на порядок выше, чем по направлениям X и Y . Для расчета деформирующего усилия по направлению Z воспользуемся выражениями, приведенными в работе [11]:. , (1). где,. S – толщина стенки;. σs – напряжение текучести(σs = 170 МПа для листа АМцМ 1мм.);. F z- проекция площади контакта на ось Z (рис. 6). Для определения геометрической площади контакта заготовки с формообразующем инструментом и проекции на ось Z (для различных значений Rt и Δz) используем моделирование с помощью CAD пакета Siemens NX, методика определения площади пятна контакта описана статье [13].. . Рисунок 6 – Определение зоны контакта. На основе полученных проекций площадей для диапазона значений x 1 и x 2 и формулы (1) получим значениям деформирующего усилия по оси Z . Построимгиперповерхность y 3( x 1, x 2) и гиперплоскость оптимизирующего фактора y 3= y 3оптим . (рис. 7).. . Рисунок 7 – оптимизация по деформирующему усилию. На пересечении гиперповерхности y 3( x 1, x 2) и гиперплоскости оптимизирующего фактора y 3= y 3оптим, получим кривую оптимальных значений x 1 и x 2 по времени формовки.. г. результат оптимизации. При пересечении кривых с оптимальными значениями x1,x2 для факторов y1 , y2 , y3 получим зону, в которой выполняются заданные условия y1 = y1 оптим , y2 = y2 оптим и y3 = y3 оптим (рис. 8).. . Рисунок 8 – Результат оптимизации. Так для заданной детали в виде конуса оптимальными параметрами формовки получились радиус инструмента Rt =10 мм. и шаг между витками Δz =3 мм. С этими параметрами данный процесс укладывается в ограничения заданными оптимальными факторами ограничения.. Для подтверждения оптимальных параметров проведем математическое моделирование процесса с применением ПО PamStamp.. Математическое моделирование инкрементальной формовки. С помощью CAD пакета Siemens NX смоделирован конус, заготовка, формообразующий инструмент и опора (рис. 9а). С помощью CAM пакета Siemens NX получена управляющая программа (рис. 9б), которая понадобилась для математического моделирования в среде Pam-Stamp. Методика моделирования процесса инкрементальной формовки описана в статье [1].. . Рисунок 9 – Результат оптимизации. а - управляющая программа, б – расчетная модель. Результаты математического моделирования процесса представлены на рисунке 10. Отклонения полученной детали от первоначально заданной панели (рис.9.в), при данном способе формовки получились в пределах ±0,2мм (рис.10.а). На рисунке 10б показано распределение толщины детали, которое соответствует закону синуса. На рисунке 10в показано распределение деформаций готовой детали. Усилия на приводы станка с ЧПУ сопоставимы с расчетными значениями, порядка 3кН, и находятся в пределах рабочего диапазона оборудования.. . Рисунок 10 – Результат математического моделирования в PamStamp. а – отклонения, б – распределение толщины, в – деформации. Для ее изготовления была спроектирована и изготовлена оснастка. Инкрементальная формовка конуса производилась из заготовки материала АМцМ лист толщиной 1мм, а результаты представлены на рисунке 10. Результат формовки сходиться с результатом математического моделирования. Процесс проходил с полученными оптимальными параметрами.. . Рисунок 11 – Результат инкрементальной формовки конуса. Заключение. Применение графической многомерной модели и разработанных на ее основе алгоритмов решения задачи позволяет получать значения параметров процесса инкрементальной формовки детали из листового материала, при этом наглядно оценивать процесс формовки, оперативно устанавливать оптимальные режимы, параметры, а также прогнозировать характеристики исследуемого процесса.. Исследование процесса инкрементальной формовки как многофакторной, многокомпонентной системы методами многомерной начертательной геометрии помогут повысить качество и расширить номенклатуры выпускаемых изделий.