

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

(наименование)

15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств

(код и наименование направления подготовки)

Технология машиностроения

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Совершенствование проектирования технологического процесса с
использованием искусственного интеллекта

Обучающийся

А.И. Почекуев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, доцент Д.А. Расторгуев

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультанты

канд. экон. наук, доцент Е.Г. Смышляева

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

канд. физ.-мат. наук, доцент Д.А. Романов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Аннотация

В выпускной работе рассмотрены методы оптимизации процессов механической обработки с помощью генетических алгоритмов. Были написаны программы для оптимизации режимов резания и траектории режущего инструмента.

Первый раздел работы посвящен детали, её технологичности, условиям нагружения, а также краткой теории работы генетических алгоритмов.

Вторая часть работы представляет технологическую часть работы. Были описаны методы обработки поверхностей детали, маршрут обработки, приведены используемые в базовом технологическом процессе средства технологического оснащения. Также были приведены исходные режимы резания для оптимизируемых операций и основное время для них.

В третий раздел входит установка ограничений для режимов резания у выбранных операций. Для каждой операции была сформирована система из шести ограничений. Помимо ограничений в разделе обзревается функция приспособленности, по которой будет работать программа для оптимизации режимов резания. Также обзревается сами программы и процесс работы с ними по окончанию которого были получены оптимизированные данные.

Безопасность жизнедеятельности и охрана труда представлены в четвёртом разделе. Рассмотрены опасные и вредные производственные факторы, а также вопросы пожарной, техногенной и экологической безопасности. К рассмотренным факторам были предложены меры противодействия.

Экономическая эффективность была рассчитана в последнем, пятом разделе. Расчёт производился на основании основного времени, сокращённого по сравнению с базовым технологическим процессом за счёт оптимизации режимов резания. В расчёте были учтены: заработная плата станочника, расходы на электроэнергию, техническую воду, СОЖ и смазку.

Abstract

The methods of optimization of machining processes with the help of genetic algorithms are considered in the graduate work. Programs were written to optimize cutting modes and cutting tool trajectory.

The first section of the work is devoted to the part, its manufacturability, loading conditions, as well as a brief theory of operation of genetic algorithms.

The second part of the work presents the technological part of the work. There were described the methods of machining the surfaces of the part, the route of machining, the technological equipment used in the basic technological process were given. Also were given the initial cutting modes for the optimized operations and the basic time for them.

The third section includes the setting of limits for cutting modes for the selected operations. A system of six constraints was formed for each operation. In addition to the constraints, the section describes the adaptation function on which the program will operate to optimize the cutting modes. The programs themselves and the process of working with them at the end of which the optimized data were obtained are also described.

Life safety and labor protection are presented in the fourth section. Hazardous and harmful production factors, as well as fire, technogenic and ecological safety issues are considered. Countermeasures were proposed for the considered factors.

Economic efficiency was calculated in the last, fifth section. The calculation was made on the basis of the basic time reduced in comparison with the basic technological process due to optimization of cutting modes. The calculation took into account: machine operator's salary, electricity, technical water, coolant and lubricant costs.

Содержание

Введение.....	7
1 Анализ исходных данных.....	8
1.1 Анализ служебного назначения детали	8
1.1.2 Анализ материала детали	10
1.1.3 Классификация поверхностей по служебному назначению.....	11
1.1.4 Анализ технологичности.....	11
1.2 Принцип работы и области применения генетических алгоритмов.....	14
1.2.1 Устройство генетических алгоритмов	14
1.2.1.1 Функция приспособленности и начальная популяция.....	14
1.2.1.2 Оператор отбора.....	15
1.2.1.3 Оператор скрещивания.....	15
1.2.1.4 Оператор мутации.....	15
1.2.2 Актуальность генетических алгоритмов в машиностроении.....	16
2 Технологическая часть	17
2.1 Тип производства	17
2.2 Проектирование заготовки.....	17
2.3 Технологические базы	18
2.4 Методы обработки поверхностей.....	19
2.5 Технологический маршрут обработки детали	20
2.6 Выбор средств технологического оснащения.....	21
2.7 Исходные режимы резания	22
2.8 Основное время	24
3 Оптимизация.....	26
3.1 Определение ограничений	26
3.1.1 Формулы ограничений	26
3.1.1.1 Расчёт ограничений для операции 035	31
3.1.1.2 Расчёт ограничений для операции 060	33
3.1.1.3 Расчёт ограничений для операции 065	34

3.1.1.4	Расчёт ограничений для операции 070	34
3.1.1.5	Расчёт ограничений для операции 100, 105	35
3.1.1.6	Расчёт ограничений для операции 110, 115, 135	35
3.1.1.7	Расчёт ограничений для операции 140, 145	35
3.2	Определение целевой функции	36
3.3	Оптимизация режимов резания	38
3.3.1	Программа для оптимизации режимов резания.....	38
3.3.2	Исходные данные.....	38
3.3.3	Определение оптимальных параметров ген. алгоритма	39
3.3.4	Оптимизация режимов резания	46
3.3.5	Сравнение полученных режимов резания с базовыми	46
3.3.5.1	Операция 035	47
3.3.5.2	Операция 060	48
3.3.5.3	Операция 065	48
3.3.5.4	Операция 070	49
3.3.5.5	Операции 100, 105, 110, 115.....	49
3.3.5.6	Операция 135	51
3.3.5.7	Операция 140, 145.....	51
3.3.6	Итоговый результат	52
3.4	Оптимизация траектории инструмента	53
3.4.1	Исходные данные.....	53
3.4.2	Программа для оптимизации траектории инструмента.....	54
3.4.3	Процесс оптимизации траектории инструмента	54
3.4.4	Результат работы алгоритма	59
4	Безопасность и охрана труда.....	61
4.1	Опасные и вредные производственный факторы.....	61
4.2	Меры безопасности.....	62
4.3	Пожарная и техногенная безопасность.....	63
4.4	Экологическая безопасность.....	63
5	Экономическая эффективность работы	65

Заключение	67
Список используемой литературы	68
Приложение А Программа для оптимизации режимов резания	71
Приложение Б Программа для оптимизации траектории инструмента	73

Введение

В современном производстве эффективность, качество и конкурентоспособность продукции неразрывно связаны с процессом проектирования технологических операций. Этот важный подготовительный этап производственного цикла является ключевым для обеспечения заданных параметров точности и качественных показателей деталей машин, а также технико-экономических показателей технологических процессов. Проектирование технологических операций охватывает широкий спектр деятельности, начиная от выбора оптимальной структуры операций и подбора необходимого оборудования, и заканчивая нормированием времени выполнения каждой операции.

В общем случае процесс проектирования технологических операций можно разбить на несколько основных пунктов:

- Выбор средств технологического оснащения
- Нахождение операционных размеров и припусков
- Расчёт режимов резания
- Нормирование технологических операций

Одним из перспективных на сегодняшний день направлений развития методов проектирования технологических процессов, является использование различных алгоритмов оптимизации, алгоритмов основанных на использовании методов машинного обучения, нейронных сетей.

Данная тема актуальна, поскольку цифровые технологии в машиностроении, равно как и в любой другой отрасли, существенно упрощают рабочий процесс и являются одними из самых бурно развивающихся направлений в 21-ом веке.

Целью данной работы является проектирование технологического процесса для детали типа плита с применением генетических алгоритмов для оптимизации режимов резания и траектории движения инструмента.

1 Анализ исходных данных

1.1 Анализ служебного назначения детали

1.1.1 Назначение детали

Деталь имеет форм-фактор плиты. Используется в качестве пресс-формы. Общий вид детали представлен на рисунке 1.

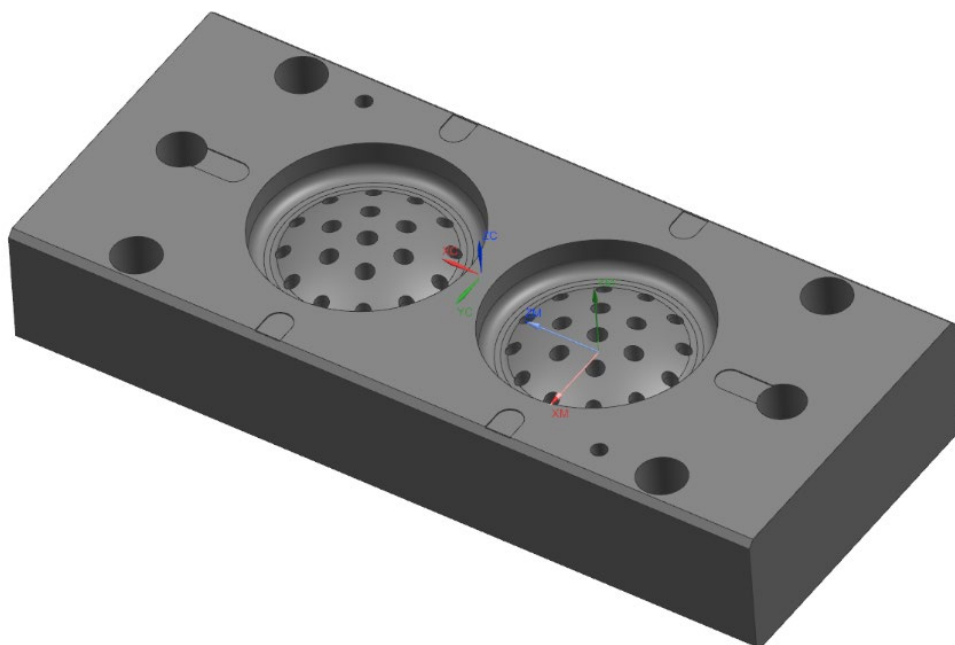


Рисунок 1 - Общий вид на деталь

Был проведён анализ условий работы детали. При помощи CAE-модуля программного обеспечения Siemens NX, была проведена симуляция нагружения, в ходе которой деталь поддавалась рабочим нагрузкам. Нагрузкам были подданы формообразующая поверхность пресс-формы. К ней было приложено давление в 200 МПа, как давление впрыска развиваемое термопластавтоматом модели Plastron UJ/120. К верхней поверхности была приложена сила в 1200 кН, соответствующая усилию смыкания термопластавтомата. В качестве ограничений на боковые и нижние поверхности пресс-формы были установлены заделки.

Общая схема нагружения представлена на рисунке 2.

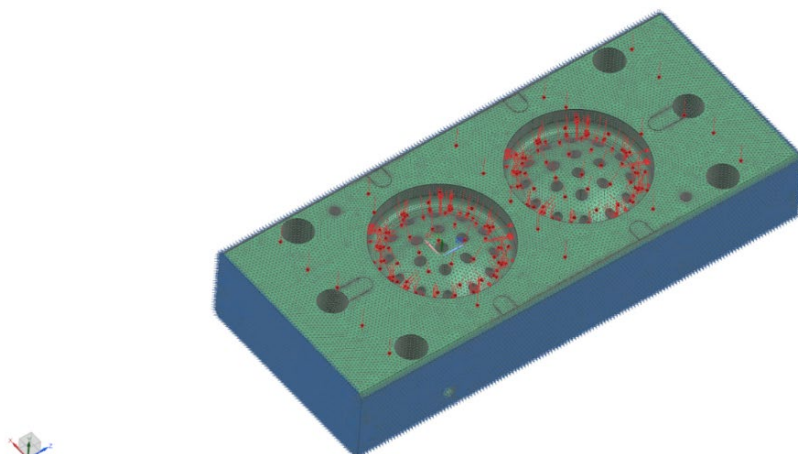


Рисунок 2 – Схема нагружения пресс-формы

Здесь, красными стрелками обозначены приложенные силы, синей штриховкой обозначено место под заделку. На рисунках 3, 4 приведены диаграммы для напряжений и перемещений возникающих в детали.

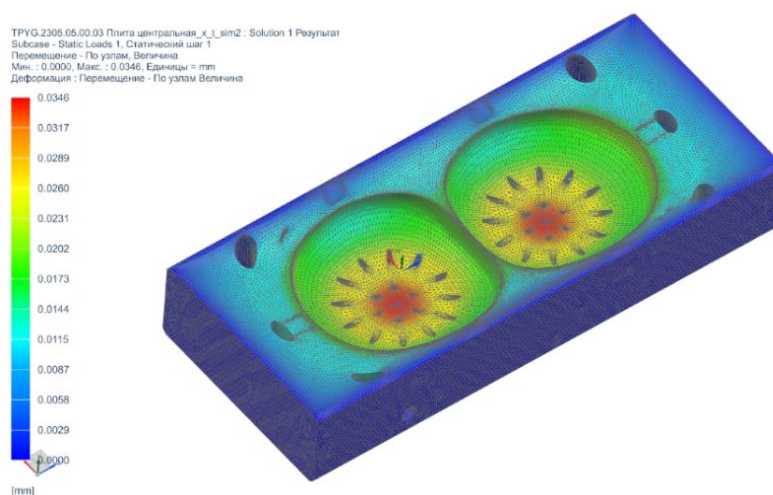


Рисунок 3 – Перемещения при заданных нагрузках

На рисунке 3 показано значение перемещений при заданных нагрузках. Для наглядности, степень деформации была усилена. Согласно диаграмме,

пиковые значения перемещений приходятся на центральную часть формообразующей поверхности пресс-формы и составляют 0,0346 мм.

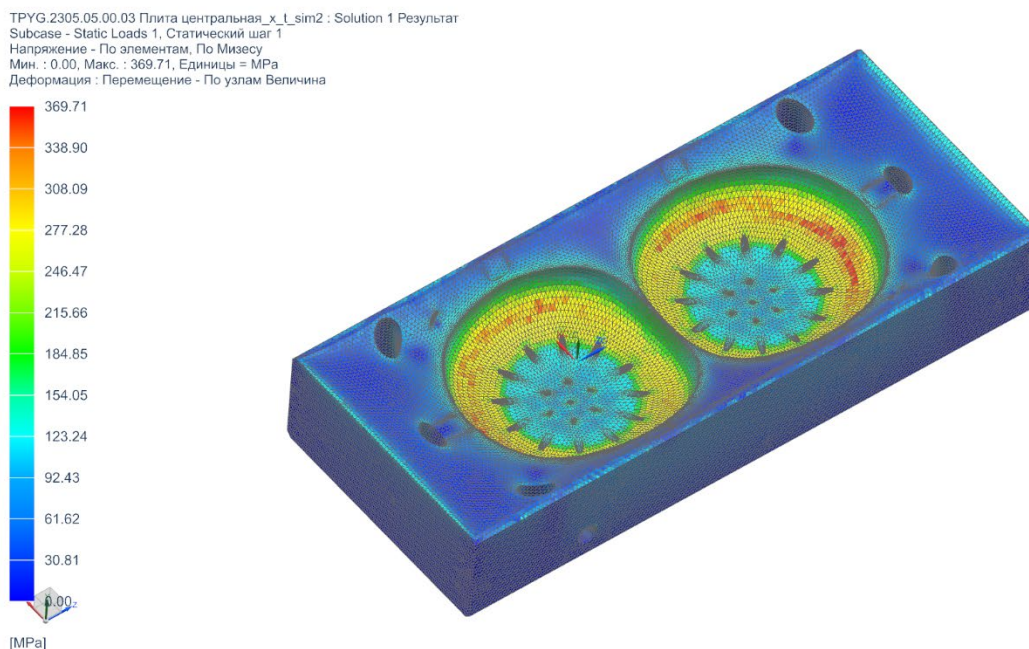


Рисунок 4 – Напряжения при заданных нагрузках

На рисунке 4 показано распределение напряжений по Мизесу. Согласно диаграмме, пиковые напряжения приходятся на формообразующую поверхность и составляют примерно 370 МПа. Исходя из того, что предел текучести для Стали 40Х составляет 470 Мпа, можно заключить, что в данных условиях нагружения запас прочности составляет 100 Мпа [12].

В общем случае деталь при работе испытывает деформацию сжатия.

1.1.2 Анализ материала детали

Материал детали – сталь 40Х. Химический состав стали приведён в таблице 1 [14].

Твёрдость детали после термообработки 38 HRC.

Механические свойства стали 40Х в зависимости от температуры отпуска приведены в таблице 2 [14].

Таблица 1 – Химический состав стали 40X

Хим. элемент	Углерод (C), %	Кремний (Si), %	Марганец (Mn), %	Никель (Ni), %	Сера (S), %	Фосфор (P), %	Хром (Cr), %	Медь (Cu), %
Содержание	0,36-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	до 0,3	до 0,035	до 0,035	0,8-1,1	До 0,3

Таблица 2 – Механические свойства стали 40X в зависимости от температуры отпуска

Температура отпуска, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %	КСУ, кДж/м ²	Твёрдость, НВ
200	1560	1760	8	35	29	552
300	1390	1610	8	35	20	498
400	1180	1320	9	40	49	417
500	910	1150	11	49	69	326
600	720	860	14	60	147	265

В приведённой выше таблице ближайшим по твёрдости к 38 HRC вариантом является вариант при температуре отпуска в 500 °C.

1.1.3 Классификация поверхностей по служебному назначению

Проведём классификацию поверхностей [2] по служебному назначению по рисунку 5.

Исполнительные поверхности: 42, 43, 44, 45, 25

Поверхности, ориентирующие данную деталь в узле: 23, 27, 28, 29, 30, 36, 37, 38, 39, 40, 41

Вспомогательные поверхности, определяющие положение других деталей присоединяемых к рассматриваемой: 1, 2, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 21, 22, 46, 47.

Свободные поверхности: остальные поверхности.

1.1.4 Анализ технологичности

Для проведения анализа технологичности необходимо найти следующие коэффициенты: коэффициент использования материала,

коэффициент унификации, коэффициент точности, коэффициент шероховатости.

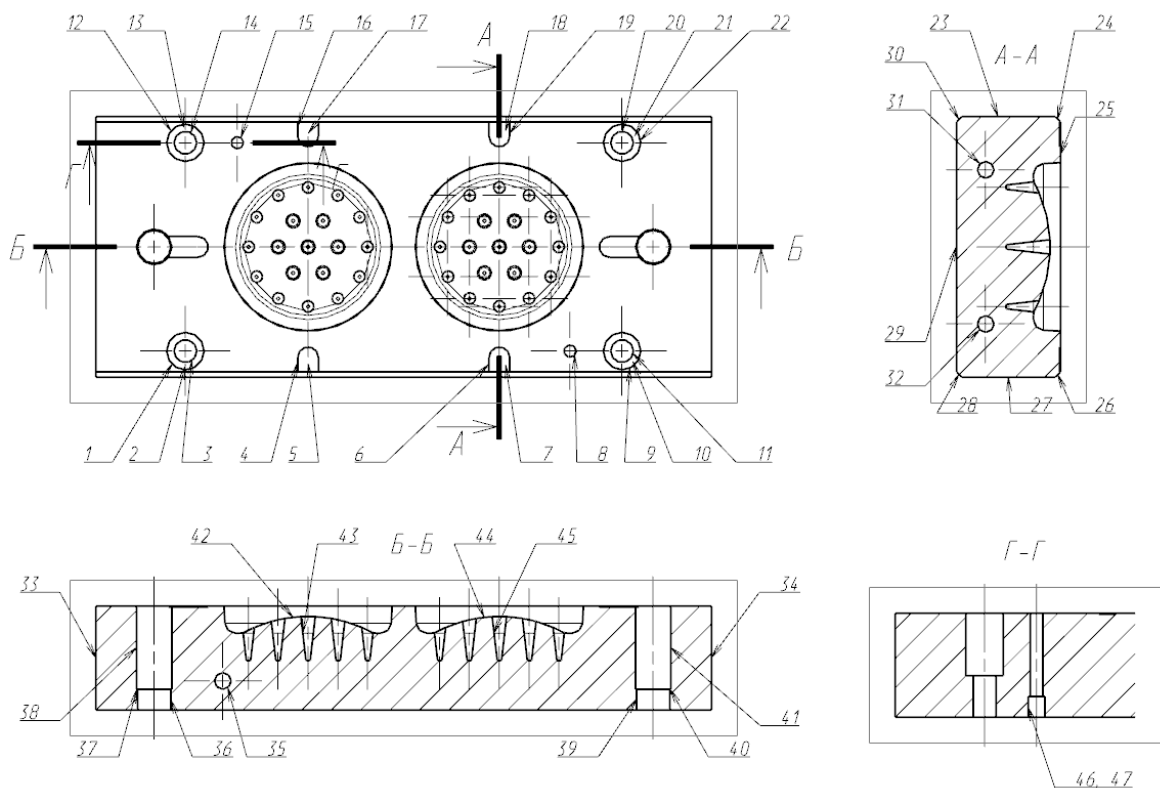


Рисунок 5 – Нумерация поверхностей

Коэффициент использования материала рассчитывается по формуле 1:

$$K_{\text{и.м.}} = \frac{m_{\text{дет}}}{m_{\text{заг}}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{дет}}$ – масса детали, кг;

$m_{\text{заг}}$ – масса заготовки, кг.

Исходя из того, что масса детали составляет 12,89 кг., а масса заготовки 14,75 кг. Исходя из этого коэффициент использования материала:

$$K_{\text{и.м.}} = \frac{12,89}{14,75} = 0,87.$$

Коэффициент унификации рассчитывается по формуле 2, как отношение количества унифицированных поверхностей к общему их количеству.

$$K_{y.} = \frac{n_{y.п.}}{n_{п.}} \quad (2)$$

где $n_{y.п.}$ – количество унифицированных поверхностей;

$n_{п.}$ – количество поверхностей.

Подставив в формулу значения:

$$K_{y.} = \frac{39}{79} = 0,49.$$

Коэффициент точности находится по формуле 3:

$$K_{т.} = 1 - \left(\frac{1}{IT_{ср.}} \right) \quad (3)$$

где $IT_{ср.}$ – среднее арифметическое значение качества.

$$K_{т.} = 1 - \left(\frac{1}{7} \right) = 0,85.$$

Коэффициент шероховатости обратно пропорционален среднему значению шероховатости и определяется по формуле 4:

$$K_{ш.} = \frac{1}{Ra_{ср.}} \quad (4)$$

где $Ra_{ср.}$ – среднее арифметическое значение шероховатости.

$$K_{ш.} = \frac{1}{3,2} = 0,3125.$$

Исходя из полученных данных, можно заключить, что деталь технологична.

1.2 Принцип работы и области применения генетических алгоритмов

1.2.1 Устройство генетических алгоритмов

Генетические алгоритмы – это одна из разновидностей поискового алгоритма, свойства работы которого, основываются на принципах эволюции в природе. Основанные на имитации процессов естественного отбора, данные алгоритмы могут использоваться для решения задач по поиску, оптимизации и обучению. Базовую структуру генетического алгоритма можно представить в виде схемы (рисунок 6) [21].



Рисунок 6 – Базовая структура генетического алгоритма

1.2.1.1 Функция приспособленности и начальная популяция

Для начала работы необходимо задать целевую функцию (функцию приспособленности) и начальную популяцию, которая состоит из случайным образом выбранных потенциальных решений. При этом каждое из решений

представляется в виде хромосомы, формат которой должен соответствовать зависящим от задачи нормам. К примеру, хромосома может быть представлена в виде двоичной строки определённой длины. После, для каждой хромосомы вычисляется функция приспособленности. Это делается для начальной популяции, а затем для каждого нового поколения после применения соответствующих операторов.

1.2.1.2 Оператор отбора

Целью оператора отбора является выбор хромосом с лучшей приспособленностью. Отбор выполняется в начале каждой итерации цикла генетического алгоритма. При этом, отбор носит вероятностный характер, вероятность отбора индивидуума зависит от его уровня приспособленности, чем он выше, тем выше шанс отобраться. Таким образом, вероятность пройти отбор для менее приспособленных хромосом полностью не исключается. Процесс отбора может быть представлен в виде различных стратегий, например:

- Отбор пропорционально приспособленности
- Стохастическая универсальная выборка
- Ранжированный отбор
- Турнирный отбор

1.2.1.3 Оператор скрещивания

Целью оператора скрещивания является комбинирование двух родительских хромосом для порождения потомственных. Как и в случае с процессом отбора, для скрещивания может применяться большое количество вариаций, гибкость генетических алгоритмов позволяет создавать совершенно новые методы под конкретные задачи.

1.2.1.4 Оператор мутации

Мутация является последним оператором в цепочке процессов создания нового поколения. Принцип её работы заключается в случайном изменении гена хромосомы с целью повышения разнообразия популяции (стимуляция поиска решений в неисследованных областях). Данный

оператор не обязателен и используется крайне редко, поскольку может понизить качество индивидуума, к которому применён.

1.2.2 Актуальность генетических алгоритмов в машиностроении

Генетический алгоритм может применяться как в задачах со сложным математическим представлением, так и без математического представления вовсе. Возможность выполнения глобальной оптимизации, распараллеливания, распределённой обработки и пригодность к непрерывному обучению формируют из генетических алгоритмов многогранный инструмент для широкого спектра задач в машиностроении.

Выводы по разделу:

В ходе работы был проведён общий анализ исходных данных, в частности анализ условий нагружения детали, технико-физических свойств её материала, технологичности. Проведена классификация поверхностей и их нумерация, для удобства работы с дальнейшими разделами работы. Был описан базовый принцип работы генетического алгоритма, для

2 Технологическая часть

Далее приведены данные по заводскому технологическому процессу, на основании которых будет проводиться дальнейшая оптимизация.

2.1 Тип производства

Заданный по техническому заданию тип производства – мелкосерийный. Мелкосерийный тип производства характеризуется:

- Малым объёмом выпуска одинаковых изделий;
- Широкой номенклатурой выпускаемых изделий;
- Универсальным оборудованием;
- Высоким значением коэффициента закрепления операций.

2.2 Проектирование заготовки

Исходя из эскиза детали, оптимальным решением будет использовать в качестве заготовки лист, поскольку именно при данной конфигурации достигается максимальное значение коэффициента использования материала [3]. Согласно ГОСТ 19903-2015 [13], типовые размеры проката, изготавливаемого в листах приведены в таблице 3:

Таблица 3 – Размеры проката, изготавливаемого в листах

Наименование параметра	Значения номинальных размеров, мм.
Толщина	0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; 0,63; 0,65; 0,70; 0,75; 0,80; 0,90; 1,00; 1,20; 1,30; 1,40; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,0; 3,2; 3,5; 3,8; 3,9; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0; 9,5; 10,0; 10,5; 11,0; 11,5; 12,0; 12,5; 13,0; 13,5; 14,0; 14,5; 15,0; 15,5; 16,0; 16,5; 17,0; 17,5; 18,0; 18,5; 19,0; 19,5; 20,0; 20,5; 21,0; 21,5; 22,0; 22,5; 23,0; 23,5; 24,0; 24,5; 25,0; 25,5; 26,0; 27,0; 28,0; 29,0; 30,0; 31,0; 32,0; 34,0; 36,0; 38,0; 40,0; 42,0; 45,0; 48,0; 50,0; 52,0; 55,0; 58,0; 60,0; 62,0; 65,0; 68,0; 70,0; 72,0; 75,0;

Продолжение таблицы 3

Наименование параметра	Значения номинальных размеров, мм.
Толщина	78,0; 80,0; 82,0; 85,0; 87,0; 90,0; 92,0; 95,0; 100,0; 105,0; 110,0; 115,0; 120,0; 125,0; 130,0; 135,0; 140,0; 145,0; 150,0; 155,0; 160,0
Ширина	500; 510; 600; 650; 670; 700; 710; 750; 800; 850; 900; 950; 1000; 1100; 1250; 1400; 1420; 1500; 1600; 1700; 1800; 1900; 2000; 2100; 2200; 2300; 2400; 2500; 2600; 2700; 2800; 2900; 3000; 3200; 3400; 3600; 3800; 4000; 4200; 4400
Длина	710; 1200; 1400; 1420; 1500; 1600; 1700; 1800; 1900; 2000; 2200; 2500; 2800; 3000; 3200; 3400; 3500; 3600; 4000; 4500; 5000; 5500; 6000; 6500; 7000; 7500; 8000; 8200; 8500; 9000; 10000; 11000; 12000

В таблице, ближайшими подходящими под размеры заготовки параметрами являются 710 мм. в длину, 500 мм. в ширину и 62 мм. в толщину. На заготовительной стадии из листа вырезают часть с упомянутыми размерами. После чего заготовка проходит черновое фрезерование, в ходе которого её размеры доводятся до 127x298x52 мм, и шлифование для подготовки установочных плоскостей.

2.3 Технологические базы

Для фиксации детали используется магнитная плита (рис 7). Это позволяет проводить обработку со всех сторон за исключением опорной. Тем не менее в случае с данной заготовкой базировать деталь по торцевым поверхностям нельзя, поскольку возникающий с силами резания опрокидывающий момент может стать причиной возникновения погрешностей при обработке. Поэтому оптимальным вариантом будет использовать для базирования поверхности 25 и 25. Поскольку обработку детали можно разбить на две стадии, до термообработки и после, то полный цикл обработки будет состоять из 4 установов, в ходе которых базы 25 и 29 будут чередоваться.

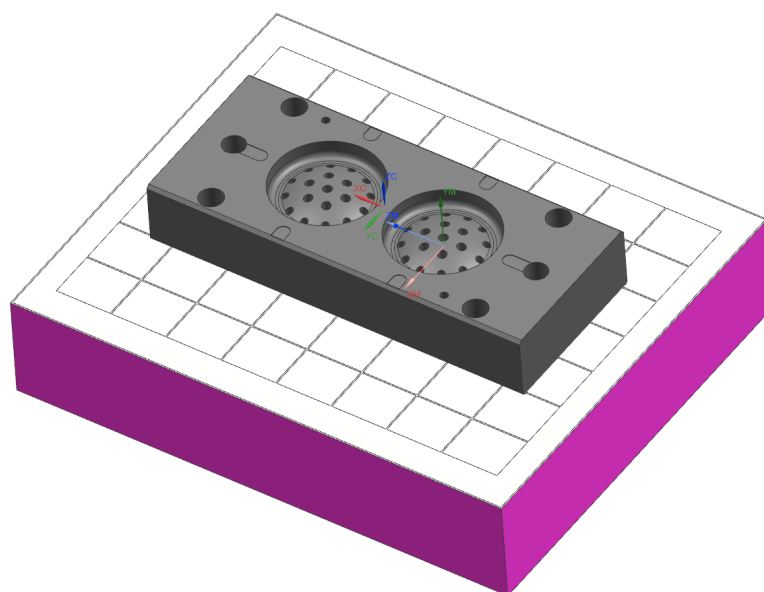


Рисунок 7 – Деталь на магнитной плите

Для совмещения локальной системы координат детали с системой координат станка использовались специальные индикаторы.

2.4 Методы обработки поверхностей

Далее, в таблице 4 приведены заводские методы обработки поверхностей.

Таблица 4 – Методы обработки поверхностей

Поверхность обработки	IT	Ra	Технологический маршрут
1, 2, 3, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 20, 21, 22	7	6,3	Центровка+Сверление+Фрезерование чистовое
4, 5, 6, 7, 16, 17, 18, 19	8	6,3	Черновое фрезерование + Чистовое фрезерование
8, 15	9	6,3	Центровка+Сверление
46, 47	7	1,25	Центровка+Сверление+Чистовое фрезерование
24, 26, 28, 30	10	6,3	Фрезерование получистовое

Продолжение таблицы 4

Поверхность обработки	IT	Ra	Технологический маршрут
36, 37, 38, 39, 40, 41	7	1,25	Центровка+Сверление+Фрезерование получистовое+Фрезерование чистовое
42, 44	6	0,32	Фрезерование черновое, фрезерование получистовое, фрезерование чистовое, фрезерование финишное
43, 45	6	0,32	Центровка, сверление, фрезерование чистовое, фрезерование финишное

2.5 Технологический маршрут обработки детали

Выбранный маршрут обработки детали представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Маршрут обработки детали

Операция	Поверхность база	Обрабатываемая поверхность	IT	Ra
000 Заготовительная	-	-	-	-
005 Фрезерование черновое	25	23, 27, 29, 33, 34	10	12,5
010 Фрезерование черновое	29	25	10	12,5
015 Шлифование	25	29	8	3,2
020 Шлифование	29	25	8	3,2
025 Центрование	25		-	-
030 Сверление	25	3, 11, 14, 20, 38, 41	12	12,5
035 Фрезерование получистовое	25	36, 39	9	6,3
040 Фрезерование получистовое	25	28, 30	10	6,3
045 Центрование	29	1, 8, 9, 12, 15, 22	-	-
050 Сверление	29	1, 8, 9, 12, 15, 22, 38, 41	12	12,5
055 Фрезерование черновое	29	42, 44	12	12,5
060 Фрезерование получистовое	29	42, 44	10	6,3
065 Фрезерование получистовое	29	1, 9, 12, 22, 38, 41	10	6,3
070 Фрезерование черновое	29	4, 5, 6, 7, 16, 17, 18, 19	12	12,5
075 Фрезерование получистовое	29	24, 26	10	6,3
080 Слесарная	25	46, 47	-	-
085 Термическая	-	-	-	-
090 Шлифование чистовое	25	23, 27, 29, 33, 34	6	1,25
095 Шлифование чистовое	25	29	6	0,8
100 Фрезерование чистовое	25	36, 39	8	3,2

Продолжение таблицы 5

Операция	Поверхность база	Обрабатываемая поверхность	IT	Ra
105 Фрезерование финишное	25	36, 39	7	1,25
110 Фрезерование чистовое	29	46, 47	8	3,2
115 Фрезерование финишное	29	46, 47	7	1,25
120 Центрование	29	43, 45	-	-
125 Сверление	29	43, 45	12	12,5
130 Сверление чистовое	29	43, 45	9	6,3
135 Фрезерование чистовое	29	4, 5, 6, 7, 16, 17, 18, 19	8	6,3
140 Фрезерование чистовое	29	42, 44	8	3,2
145 Фрезерование финишное	29	42, 44	6	1,25
150 Слесарная (полировальная)	29	42, 44	6	0,32

2.6 Выбор средств технологического оснащения

Далее, в таблице 6, приведены выбранные средства технологического оснащения [25].

Таблица 6 – Выбор оборудования и тех. оснастки

Операция	Станок	Технологическая оснастка		
		Приспособление	Режущий инструмент	Мерительный инструмент
005, 010	Фрезерный универсальный 676	Тиски фрезерные	Корпусная фреза, D = 100 мм., z = 7. T15K6	Штангенциркуль
015, 020	Плоскошлифовальный ОШ-400АФ2	Магнитный стол	Шлифовальный круг	Угломер
025-075, 100-145	Taisun Seiki Quick Mill-1020L	Магнитная плита	Сверло P6M5 ГОСТ 10902-77, D = 12 мм.; Сверло P6M5 ГОСТ 10902-77, D = 13 мм.; Сверло P6M5 ГОСТ 10902-77, D = 11 мм.; Сверло P6M5 ГОСТ 10902-77, D = 6 мм.;	Нутромер микрометрический цифровой, штангенциркуль

Продолжение таблицы 6

Операция	Станок	Технологическая оснастка		
		Приспособлени е	Режущий инструмент	Мерительный инструмент
025-075, 100-145	Taisun Seiki Quick Mill-1020L	Магнитная плита	Фреза монолитная YG-1 G8A37100 D = 10 мм. z = 4; Фреза корпусная D = 20 мм., z = 3; Фреза монолитная YG-1 GMF56160 D = 16 мм. z = 4;	
025-075, 100-145	Taisun Seiki Quick Mill-1020L	Магнитная плита	Фреза монолитная YG-1 G8A37060 D = 6 мм. z = 4; Сверло D = 1.8 мм., L = 20 мм.; Фреза D = 2 мм., L = 26 мм. B = 6.58°; Фреза монолитная YG-1 G8D62100 D = 10 мм. z = 4;	Нутромер микрометрически й цифровой, штангенциркуль
090, 095	Плоскошлифовальн ый ОШ-400АФ2	Магнитный стол, шлифовальные тиски	Шлифовальны й круг	Микрометр

Они используются в технологии изготовления корпусов любого типа.

2.7 Исходные режимы резания

Далее, представлены режимы резания [1], [5], [6], [8] для ряда фрезерных операций. Остальные операции не затрагиваются, поскольку оптимизация режимов резания проводится только для ряда фрезерных..

Таблица 7 – Заводские режимы резания

Операция	Инструмент	Скорость резания	Подача на зуб	Частота вращения шпинделя	Глубина резания, мм.	Ширина фрезерования, мм.
035	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 d, D = 10 мм., z = 4	285	0,111	9072	0.3	7.5
060	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 GMF56160, D = 16 мм., z = 4	126	0.08	2507	0.3	1.6
065	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 GMF56160, D = 16 мм., z = 4	90	0.04	1790	0.3	12
070	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 * D = 6 мм. z = 4	90	0.03	4775	0.3	4.5
100	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 G8A37100, D = 10 мм., z = 4	195	0.051	6207	0.3	7.5
105	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 G8A37100, D = 10 мм., z = 4	195	0.0483	6207	0.5	7.5
110	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 G8A37060 D = 6 мм. z = 4	60	0.03	3183	0.3	4.5
115	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 G8A37060 D = 6 мм. z = 4	179	0.034	9496	0.3	4.5

Продолжение таблицы 7

Операция	Инструмент	Скорость резания	Подача на зуб	Частота вращения шпинделя	Глубина резания, мм.	Ширина фрезерования, мм.
135	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 G8A37060 D = 6 мм. z = 4	179	0.034	9496	0.3	4.5
140	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 G8D62100 D = 10 мм., z = 4, R = 5 мм.	285	0.111	9072	0.3	2
145	Фреза монолитная твердосплавная YG-1 G8D62100 D = 10 мм., z = 4, R = 5 мм.	285	0.111	9072	0.1	2

В подавляющем большинстве, режимы резания выбирались согласно рекомендациям из каталогов производителя

2.8 Основное время

Поскольку основное время является косвенным показателем производительности, которая, на стадии оптимизации режимов резания, будет представлена одним из основных параметров целевой функции, в таблице 8 приведено время для каждой фрезерной операции из таблицы 5.

Таблица 8 - Основное время для фрезерных операций

Номер операции	Основное время
035	23 сек.
060	5 мин. 22 сек.
065	13 мин. 59 сек.
070	1 мин. 52 сек.

Продолжение таблицы 8

Номер операции	Основное время
100	1 мин. 14 сек.
105	50 сек.
110	1 мин. 10 сек.
115	24 сек.
135	1 мин. 9 сек.
140	22 мин. 49 сек.
145	57 мин. 4 сек.

Основное время для каждой из операций было автоматически рассчитано исходя из режимов резания при написании управляющей программы в прикладном ПО Siemens NX.

Самыми продолжительными, а значит имеющими больший вес с точки зрения оптимизации являются операции 140 и 145.

Выводы по разделу:

В разделе была представлена базовая технология изготовления детали. Был оглашён тип производства, спроектирована заготовка, приведены установочные базы и методы обработки поверхностей. Кроме того, были представлены маршрут обработки поверхностей, средства технологического оснащения и исходные режимы резания с основным временем для каждой операции. Они понадобятся при оптимизации режимов резания и оценки результатов работы алгоритма оптимизации.

3 Оптимизация

3.1 Определение ограничений

3.1.1 Формулы ограничений

Оптимизация режимов резания с использованием генетических алгоритмов невозможна без определения технических ограничений процесса фрезерования. Ограничения [11] тесно связаны с параметрами режущего инструмента, поэтому для каждой фрезы ограничения рассчитываются отдельно.

Первое ограничение, устанавливает зависимость скорости резания от ряда технологических параметров. Скорость резания для фрезерной обработки находится по формуле 5 [10]:

$$v = \frac{C_v \cdot D^q \cdot K_v}{T^m \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^u \cdot z^p} \quad (5)$$

где C_v – постоянный коэффициент;

D – диаметр фрезы, мм;

K_v – коэффициент поправочный для скорости резания;

T – стойкость фрезы, мин.;

m – параметр относительной стойкости;

t – глубина резания, мм.;

s_z – подача, мм/зуб.;

z – число зубьев фрезы;

B – ширина фрезерования, мм.;

q, m, x, y, u, p – показатели степеней, берутся из таблиц.

При этом, общий поправочный коэффициент K_v рассчитывается формуле 6 [10]:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv} \quad (6)$$

где K_{mv} – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала;

K_{pv} – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки;

K_{iv} – коэффициент, учитывающий материал инструмента.

Вместе с этим, скорость резания также можно определить с помощью формулы 7:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}. \quad (7)$$

Подставив в формулу 7 формулу 5, получим:

$$\frac{C_v \cdot D^q \cdot K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv}}{T^m \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^u \cdot z^p} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}.$$

Выделив в левую часть искомые данные, получим формулу 8 для первого технического ограничения:

$$n \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^u \leq \frac{318,471 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv}}{T^m \cdot z^p} \quad (8)$$

Следующее ограничение связано с эффективной мощностью резания и мощностью привода главного движения станка. Для нахождения ограничения введём формулу 9 нахождения эффективной мощности резания при фрезеровании [10]:

$$N_e = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60} \quad (9)$$

где P_z – сила резания, Н.

Формула 10 для нахождения главной, окружной составляющей силы резания при фрезеровании [10]:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^n \cdot z \cdot K_{\text{мп}}}{D^q \cdot n^w} \quad (10)$$

Подставив формулы 7 и 10 в 9, получим формулу 11:

$$N_e = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^n \cdot z \cdot K_{\text{мп}} \cdot \pi \cdot D^{1-q} \cdot n^{1-w}}{1020 \cdot 60 \cdot 1000} \quad (11)$$

Поскольку эффективная мощность резания не должна превышать мощность привода главного движения станка, ограничение будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^n \cdot z \cdot K_{\text{мп}} \cdot \pi \cdot D^{1-q} \cdot n^{1-w}}{1020 \cdot 60 \cdot 1000} \leq N_H \eta \quad (12)$$

где N_H – мощность двигателя главного привода станка, кВт.;

η – коэффициент полезного действия кинематической цепи;

Решая неравенство относительно искомых элементов, получим формулу 13:

$$n^{1-w} \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^n \leq \frac{61,2 \cdot 10^5 \cdot N_H \cdot \eta}{C_p \cdot z \cdot K_{\text{мп}} \cdot \pi \cdot D^{1-q}} \quad (13)$$

Следующее ограничение связано с минимальной и максимальной допустимой частотой вращения шпинделя и представлено формулой 14:

$$n_{\text{ст. min}} \leq n \leq n_{\text{ст. max}} \quad (14)$$

С помощью формулы 15, введём ограничение, описывающее связь подачи и скорости резания с пределом прочности механизма подачи станка.

$$P_s \leq P_{s,\text{доп}}. \quad (15)$$

В общем случае, при фрезеровании, сила подачи определяется по окружной силе резания, по приведённой далее формуле 16:

$$P_s = K'_s \cdot P_z. \quad (16)$$

Или, разложив P_z , будет получена формула 17:

$$P_s = K'_s \cdot \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{\text{мп}} \quad (17)$$

Подставив формулу 17 в 15, и, решив полученное уравнение относительно подачи, получим формулу ограничения 18:

$$\frac{s^{yz} \cdot t^x \cdot B^n}{n^w} \leq \frac{P_{s,\text{доп}} \cdot D^q}{K'_s \cdot 10 \cdot C_p \cdot z}. \quad (18)$$

Следующее ограничение, выраженное формулой 19 устанавливает максимальную и минимальную подачу, допускаемую кинематикой станка:

$$s_{\text{ст.мин}} \leq s \leq s_{\text{ст.макс}}. \quad (19)$$

При помощи формулы 20 выведем подачу на зуб:

$$s = s_z \cdot z \cdot n. \quad (20)$$

Решим уравнение относительно искомым данным:

$$s_z \cdot n = \frac{s}{z}.$$

Формула ограничения принимает вид согласно формуле 21:

$$\frac{s_{ст.мин}}{z} \leq s_z \cdot n \leq \frac{s_{ст.мак}}{z}. \quad (21)$$

Финальное ограничение касается подачи на зуб и основывается на рекомендациях производителя фрез. Ограничение основывается на данных из каталога производителя и представлено формулой 22.

$$s_{пр.мин} \leq s \leq s_{пр.мак}. \quad (22)$$

Ограничение по глубине резания также задаётся исходя из рекомендаций производителя и описывается формулой 23:

$$t_{пр.мин} \leq t \leq t_{пр.мак}. \quad (23)$$

Финальное ограничение по ширине фрезерования согласно рекомендациям производителя:

$$B_{пр.мин} \leq B \leq B_{пр.мак}. \quad (24)$$

Из полученных ограничений формируется следующая система:

$$\left\{ \begin{array}{l} n \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^u \leq \frac{318,471 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot K_{mv} \cdot K_{пв} \cdot K_{ив}}{T^m \cdot z^p} \\ n^{1-w} \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^n \leq \frac{61,2 \cdot 10^5 \cdot N_H \cdot \eta}{C_p \cdot z \cdot K_{мп} \cdot \pi \cdot D^{1-q}} \\ \frac{n_{ст.мин} \leq n \leq n_{ст.маx}}{s_z^y \cdot t^x \cdot B^n} \leq \frac{P_{с.доп} \cdot D^q}{K'_s \cdot 10 \cdot C_p \cdot z} \\ \frac{S_{ст.мин}}{z} \leq s_z \cdot n \leq \frac{S_{ст.маx}}{z} \\ S_{z пр.мин} \leq s_z \leq S_{z пр.маx} \\ t_{пр.мин} \leq t \leq t_{пр.маx} \\ B_{пр.мин} \leq B \leq B_{пр.маx} \end{array} \right.$$

Подставляя в систему соответствующие данные, найдём ограничения для выбранных операций.

3.1.1.1 Расчёт ограничений для операции 035

Рассчитаем первое ограничение для операции. Коэффициенты и показатели степени определяются табличным методом.

$$n \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^u \leq \frac{318,471 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot K_{mv} \cdot K_{пв} \cdot K_{ив}}{T^m \cdot z^p}.$$

При этом $C_v = 443$, $D = 10$ мм., $q = 0,17$, $K_{mv} = 0,657$, $K_{пв} = 1$, $K_{ив} = 1,4$, $T = 30$ мин., $m = 0,33$, $x = 0,38$, $y = 0,28$, $u = -0,05$, $z = 4$, $p = 0,1$.

$$n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq \frac{318,471 \cdot 443 \cdot 10^{-0,83} \cdot 0,657 \cdot 1 \cdot 1,4}{30^{0,33} \cdot 4^{0,1}}.$$

$$n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq 5438,899.$$

Следующее ограничение:

$$n^{1-w} \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^n \leq \frac{61,2 \cdot 10^5 \cdot N_H \cdot \eta}{C_p \cdot z \cdot K_{мп} \cdot \pi \cdot D^{1-q}}.$$

Согласно паспортным данным станка $N_H = 11$ кВт., $\eta = 0,95$. Значения остальных коэффициентов: $C_p = 101$, $x = 0,88$; $y = 0,75$, $w = 0$, $u = 1$, $K_{мп} = 0,869$; $q = 0,87$.

$$n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq \frac{61,2 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 0,95}{101 \cdot 4 \cdot 0,869 \cdot 3,14 \cdot 10^{1-0,87}}.$$

$$n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 43006,779.$$

Ограничение по частоте вращения шпинделя:

$$n_{ст.мин} \leq n \leq n_{ст.мах}.$$

где согласно паспортным данным станка $n_{ст.мин} = 12,5 \frac{об}{мин}$, $n_{ст.мах} =$
 $= 12000 \frac{об}{мин}$.

Исходя из этого:

$$12,5 \leq n \leq 12000.$$

Ограничение, связанное с пределом прочности механизма подачи станка:

$$\frac{s^{yz} \cdot t^x \cdot B^n}{n^w} \leq \frac{P_{с,доп} \cdot D^q}{K'_s \cdot 10 \cdot C_p \cdot z}.$$

При этом, значения недостающих коэффициентов: $K'_s = 0,8$, допустимая нагрузка на механизмы подачи станка согласно паспорту: $P_{с,доп} = 4000 \text{ Н}$.

$$\frac{s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1}{n^0} \leq \frac{4000 \cdot 10^{0,87}}{0,8 \cdot 10 \cdot 101 \cdot 4}.$$

$$s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 9,175.$$

Ограничение по максимальной и минимальной подачам станка:

$$\frac{s_{ст.мин}}{z} \leq s_z \cdot n \leq \frac{s_{ст.мах}}{z}.$$

$$\frac{1}{4} \leq s_z \cdot n \leq \frac{20000}{4}.$$

$$0,25 \leq s_z \cdot n \leq 5000.$$

Ограничения по подаче на зуб, глубине резания и ширине фрезерования согласно каталогу производителя:

$$0,04 \leq s_z \leq 0,06.$$

$$7,5 \leq t \leq 10.$$

$$0,02 \leq B \leq 0,03.$$

Итого, система ограничений для операции 035:

$$\left\{ \begin{array}{l} n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq 5438,899 \\ n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 43006,779 \\ 12,5 \leq n \leq 12000 \\ s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 9,175 \\ 0,25 \leq s_z \cdot n \leq 5000 \\ 0,04 \leq s_z \leq 0,06 \\ 7,5 \leq t \leq 10 \\ 0,02 \leq B \leq 0,03 \end{array} \right.$$

3.1.1.2 Расчёт ограничений для операции 060

Аналогичным образом проведём расчёт ограничений для операции 060.

$$n \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^u \leq \frac{318,471 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot K_{mv} \cdot K_{пв} \cdot K_{ив}}{T^{m \cdot z^p}} .$$

Необходимые для расчётов значения: $C_v = 443$, $D = 16$ мм., $q = 0,17$, $K_{mv} = 0,657$, $K_{пв} = 1$, $K_{ив} = 1,4$, $T = 60$ мин., $m = 0,33$, $x = 0,38$, $y = 0,28$, $u = -0,05$, $z = 4$, $p = 0,1$.

$$n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq \frac{318,471 \cdot 443 \cdot 16^{-0,83} \cdot 0,657 \cdot 1 \cdot 1,4}{60^{0,33 \cdot 4^{0,1}}} .$$

$$n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq 2929,217 .$$

Ограничение по мощности привода главного движения станка:

$$n^{1-w} \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^n \leq \frac{61,2 \cdot 10^5 \cdot N_H \cdot \eta}{C_p \cdot z \cdot K_{мп} \cdot \pi \cdot D^{1-q}} .$$

Учитывая то, что $C_p = 101$, получим:

$$n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq \frac{61,2 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 0,95}{101 \cdot 4 \cdot 0,869 \cdot 3,14 \cdot 16^{1-0,17}} .$$

$$n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 40457,713 .$$

Ограничение по прочности механизма подачи станка:

$$\frac{s^{yz} \cdot t^x \cdot B^n}{n^w} \leq \frac{P_{s,доп} \cdot D^q}{K'_s \cdot 10 \cdot C_p \cdot z} .$$

$$\frac{s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1}{n^0} \leq \frac{4000 \cdot 16^{0,87}}{0,8 \cdot 10 \cdot 101 \cdot 4} .$$

$$s^{0,75} \leq 13,809 .$$

Ограничения по подаче на зуб, глубине резания и ширине фрезерования согласно каталогу производителя:

$$0,02 \leq s_z \leq 0,04 .$$

$$7,5 \leq t \leq 10.$$

$$8 \leq B \leq 10.$$

Система ограничений для операции 060:

$$\left\{ \begin{array}{l} n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq 2929,217 \\ n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 40457,713 \\ 12,5 \leq n \leq 12000 \\ s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 13,809 \\ 0,25 \leq s_z \cdot n \leq 5000 \\ 0,02 \leq s_z \leq 0,04 \\ 7,5 \leq t \leq 10 \\ 8 \leq B \leq 10 \end{array} \right.$$

3.1.1.3 Расчёт ограничений для операции 065

Для операции 065 система ограничений такая же, как и в 060.

3.1.1.4 Расчёт ограничений для операции 070

Первое ограничение:

$$n \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^u \leq \frac{318,471 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot K_{mv} \cdot K_{пв} \cdot K_{ив}}{T^{m \cdot z \cdot p}} \dots$$

Необходимые для расчётов значения: $C_v = 443$, $D = 6$ мм., $q = 0,17$, $K_{mv} = 0,657$, $K_{пв} = 1$, $K_{ив} = 1,4$, $T = 30$ мин., $m = 0,33$, $x = 0,38$, $y = 0,28$, $u = -0,05$, $z = 4$, $p = 0,1$.

$$n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq \frac{318,471 \cdot 443 \cdot 6^{-0,83} \cdot 0,657 \cdot 1 \cdot 1,4}{30^{0,33 \cdot 4 \cdot 0,1}}.$$

$$n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq 8310,850.$$

Ограничение по мощности привода главного движения станка:

$$n^{1-w} \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^n \leq \frac{61,2 \cdot 10^5 \cdot N_H \cdot \eta}{C_p \cdot z \cdot K_{мп} \cdot \pi \cdot D^{1-q}}$$

$$n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq \frac{61,2 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 0,95}{101 \cdot 4 \cdot 0,869 \cdot 3,14 \cdot 6^{1-0,17}}.$$

$$n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 13112,074.$$

Ограничение по прочности механизма подачи станка:

$$\frac{s^{yz} \cdot t^x \cdot B^n}{n^w} \leq \frac{P_{с,доп} \cdot D^q}{K'_s \cdot 10 \cdot C_p \cdot z}$$

$$\frac{s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1}{n^0} \leq \frac{4000 \cdot 6^{0,87}}{0,8 \cdot 10 \cdot 101 \cdot 4}.$$

$$\frac{s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1}{n^0} \leq 5,883.$$

Ограничения по подаче на зуб, глубине резания и ширине фрезерования согласно каталогу производителя:

$$0,02 \leq s_z \leq 0,04.$$

$$7,5 \leq t \leq 10.$$

$$0,02 \leq B \leq 0,03.$$

Система ограничений для операции 070:

$$\left\{ \begin{array}{l} n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq 8310,850 \\ n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 13112,074 \\ 12,5 \leq n \leq 12000 \\ s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 5,883 \\ 0,25 \leq s_z \cdot n \leq 5000 \\ 0,02 \leq s_z \leq 0,04 \\ 7,5 \leq t \leq 10 \\ 0,02 \leq B \leq 0,03 \end{array} \right.$$

3.1.1.5 Расчёт ограничений для операции 100, 105

Система ограничений такая же, как и в операции 035.

3.1.1.6 Расчёт ограничений для операции 110, 115, 135

Система ограничений такая же, как и в операции 070

3.1.1.7 Расчёт ограничений для операции 140, 145

Первое ограничение:

$$n \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^u \leq \frac{318,471 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv}}{T^{m \cdot zp}}.$$

Необходимые для расчётов значения: $C_v = 443$, $D = 10$ мм., $q = 0,17$, $K_{mv} = 0,657$, $K_{pv} = 1$, $K_{iv} = 1,4$, $T = 45$ мин., $m = 0,33$, $x = 0,38$, $y = 0,28$, $u = -0,05$, $z = 4$, $p = 0,1$.

$$n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq \frac{318,471 \cdot 443 \cdot 10^{-0,83} \cdot 0,657 \cdot 1 \cdot 1,4}{45^{0,33 \cdot 4 \cdot 0,1}}.$$

$$n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq 4757,741 \text{ (8457,768)}.$$

Ограничение по мощности привода главного движения станка:

$$n^{1-w} \cdot s_z^y \cdot t^x \cdot B^n \leq \frac{61,2 \cdot 10^5 \cdot N_H \cdot \eta}{C_p \cdot z \cdot K_{mp} \cdot \pi \cdot D^{1-q}}$$

$$n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq \frac{61,2 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 0,95}{101 \cdot 4 \cdot 0,869 \cdot 3,14 \cdot 10^{1-0,17}}$$

$$n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 8580,981 (15254,283).$$

Ограничение по прочности механизма подачи станка:

$$\frac{s^{yz} \cdot t^x \cdot B^n}{n^w} \leq \frac{P_{s,доп} \cdot D^q}{K'_s \cdot 10 \cdot C_p \cdot z}$$

$$\frac{s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1}{n^0} \leq \frac{4000 \cdot 10^{0,87}}{0,8 \cdot 10 \cdot 101 \cdot 4}$$

$$\frac{s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1}{n^0} \leq 9,175 (5,020).$$

Ограничения по подаче на зуб, глубине резания и ширине фрезерования согласно каталогу производителя:

$$0,11 \leq s_z \leq 0,13.$$

$$0,1 \leq t \leq 0,25.$$

$$0,035 \leq B \leq 0,05.$$

Система ограничений для операции 140, 145:

$$\left\{ \begin{array}{l} n \cdot s_z^{0,28} \cdot t^{0,19} \cdot B^{-0,05} \leq 8310,850 \\ n \cdot s_z^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 13112,074 \\ 12,5 \leq n \leq 12000 \\ s^{0,75} \cdot t^{0,88} \cdot B^1 \leq 5,883 \\ 0,25 \leq s_z \cdot n \leq 5000 \\ 0,12 \leq s_z \leq 0,13 \\ 0,2 \leq t \leq 0,3 \\ 0,04 \leq B \leq 0,06 \end{array} \right.$$

3.2 Определение целевой функции

Функция приспособленности представлена в виде разницы шероховатости и производительности, представленной объёмом снимаемого материала. При этом, оба критерия умножаются на коэффициент важности, который будет варьироваться в зависимости от операции. Так, к примеру, на операциях по тонкому фрезерованию поверхности формообразующей, где требуется добиться низкого значения шероховатости, у шероховатости

коэффициент важности будет равняться единице. Общий вид функции приспособленности можно представить с помощью формулы 25:

$$I = (1 - k) \cdot Q - k \cdot Ra \quad (25)$$

где Ra – шероховатость, мкм;

Q – объём снятого материала $\frac{\text{см}^3}{\text{мин}}$;

k – коэффициенты важности.

При этом Ra рассчитывается по эмпирической формуле 25 [9]:

$$Ra = 4,83 \cdot s_z^{1,69} \cdot \frac{t^{0,15}}{v^{1,23} \cdot \rho^{0,24} \cdot \gamma^{0,46}} \quad (26)$$

Путём подстановки формулы 7 в формулу 26 получим формулу 27:

$$Ra = 4,83 \cdot s_z^{1,69} \cdot \frac{t^{0,15}}{\left(\pi \cdot D \cdot \frac{n}{1000}\right)^{1,23} \cdot \rho^{0,24} \cdot \gamma^{0,46}} \quad (27)$$

А производительность Q по формуле 28:

$$Q = t \cdot B \cdot s_z \cdot z \cdot n \quad (28)$$

Путём подстановки 26 и 28 в 25, функция приспособленности преобразуется в формулу 29:

$$I = (1 - k) \cdot t \cdot B \cdot s_z \cdot z \cdot n - k \cdot 4,83 \cdot s_z^{1,69} \cdot \frac{t^{0,15}}{\left(\pi \cdot D \cdot \frac{n}{1000}\right)^{1,23} \cdot \rho^{0,24} \cdot \gamma^{0,46}} \quad (29)$$

3.3 Оптимизация режимов резания

3.3.1 Программа для оптимизации режимов резания

Для оптимизации режимов резания была написана программа на языке Python. Принцип работы программы повторяет базовую структуру генетического алгоритма [16]. В начале в качестве переменных вводятся параметры шероховатости R_a и производительности Q и приводятся формулы для их расчёта. Формулы для их расчёта представляются в виде соответствующих функций. Далее создаётся функция создания начальной популяции. Индивидуум состоит из случайной комбинации частоты вращения шпинделя n и подачи на зуб s_z , при этом они набираются из заранее заданного диапазона допустимых значений, установленных ограничениями по максимальной и минимальной частотам вращения шпинделя и максимальной, минимальной подачам на зуб. Следующим шагом идёт проверка набранных индивидуумов на соответствие ограничениям. В случае если индивидуум не соответствует ограничениям – он удаляется. После проверки на соответствие ограничения, реализуется функция оценки приспособленности. Каждый индивидуум проходит через функцию приспособленности и получается её значение. Далее идут функции подбора родителей, скрещивания и мутации. Описанная часть программы приведена в приложении А. После функции подбора задаются значения для используемых в расчётах переменных. Активируется функция создания новой популяции, проходит цикл работы генетического алгоритма. В конце программы происходит вывод лучшего индивидуума и его значения приспособленности [18], [19], [22], [24].

3.3.2 Исходные данные

Для начала работы по оптимизации режимов резания необходимо определить коэффициент важности для шероховатости для каждой операции. Для удобства работы, коэффициент важности будет представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Коэффициенты важности для шероховатости по операциям

Номер операции	Тип операции	Коэффициент важности для шероховатости
035	Фрезерная черновая	0
060	Фрезерная черновая	0
65	Фрезерная получистовая	1
70	Фрезерная черновая	0
100	Фрезерная получистовая	1
105	Фрезерная чистовая	1
110	Фрезерная получистовая	1
115	Фрезерная чистовая	1
135	Фрезерная получистовая	1
140	Фрезерная чистовая	1
145	Фрезерная финишная	1

3.3.3 Определение оптимальных параметров ген. алгоритма

Для эффективной работы алгоритма необходимо выявить оптимальные значения размера популяции, количества поколений и коэф. мутации. В качестве отправной точки зададим 100 обрабатываемых новых поколений, размер популяции в 100 особей, коэффициент мутации 0,1. Коэффициент важности для шероховатости в операции 035 равен нулю, исходя из чего можно заключить, что в целевой функции будет использована только часть посвящённая производительности. Результат работы программы при заданных режимах представлен на рисунке 8.

При этом лучший индивидум:

$$n = 6315,918172330221.$$

$$s = 0,059036838823715826.$$

$$B = 0,0294730768800884.$$

$$t = 9,828917017109763.$$

Лучшая приспособленность: 432.0666307154951.

Скачкообразность графика говорит о том, что входе отбора и мутации, лучшие решения удаляются, в результате чего алгоритм работает нестабильно. Для того чтобы стабилизировать работу алгоритма необходимо ввести элитизм



Рисунок 8 – График лучшей приспособленности среди индивидов в зависимости от поколения.

. Оператор элитизма отбирает лучшие найденные решения и сохраняет их в результате чего они не подвергаются отбору и мутации. Размер списка лучших решений задаётся пользователем, новые лучшие решения заменяют старые по достижению предела размеров списка резервируемого элитизмом [17]. Установим размер списка элитизма в 0.1 от размера популяции. Результат работы программы с элитизмом приведён на рисунке 9:

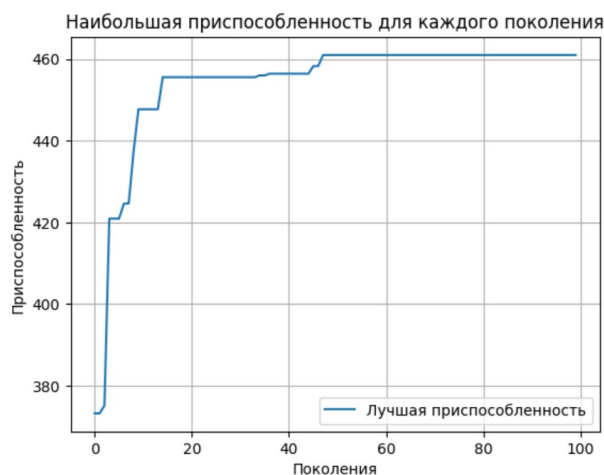


Рисунок 9 - График лучшей приспособленности среди индивидов в зависимости от поколения с работой оператора элитизма

При этом лучший индивидуум:

$$n = 6411,2692154361885 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

$$s = 0,05996143874055426 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$$

$$B = 0,029999753043405346 \text{ мм.}$$

$$t = 9,9921151406395 \text{ мм.}$$

Лучшая приспособленность: 460,94717691445265

За счёт элитизма, работа алгоритма стабилизировалась, и лучшая приспособленность возросла.

Следующий опыт будет проводиться при количестве новых поколений в 10000, результаты работы программы показаны на рисунке 10.

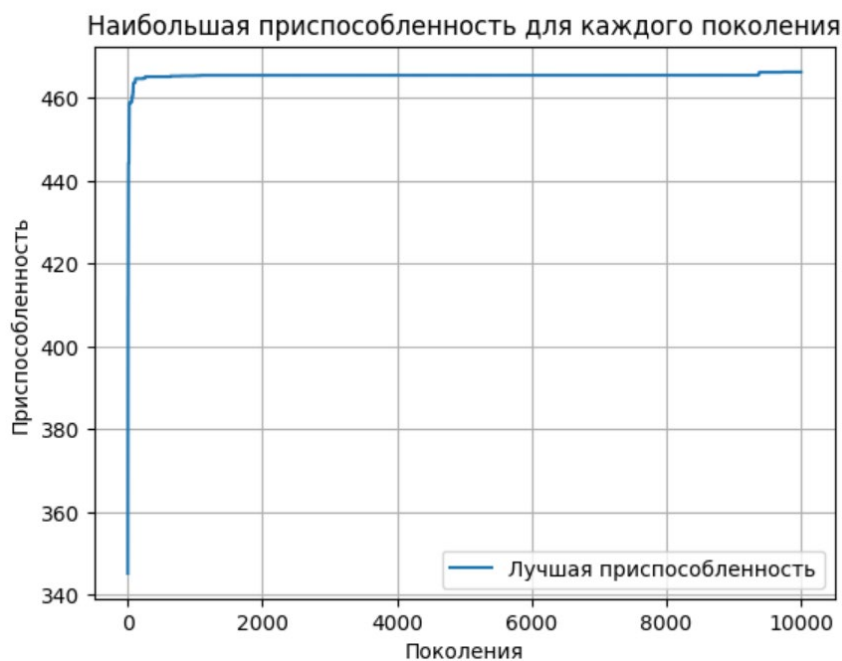


Рисунок 10 - График лучшей приспособленности среди индивидуумов в зависимости от поколения при количестве поколений в 10000.

В результате работы программы был найден лучший индивидуум:

$$n = 6475,949246942413 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

$$s = 0,05999889923304437 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$$

$$B = 0,029999947676458 \text{ мм.}$$

$$t = 9,999934807128701 \text{ мм.}$$

Лучшая приспособленность: 466,2559386784459

При увеличении количества поколений до 10000 приспособленность лучшей особи несколько возросла.

Увеличим количество поколений до 100000, результат данного опыта продемонстрирован на рисунке 11:

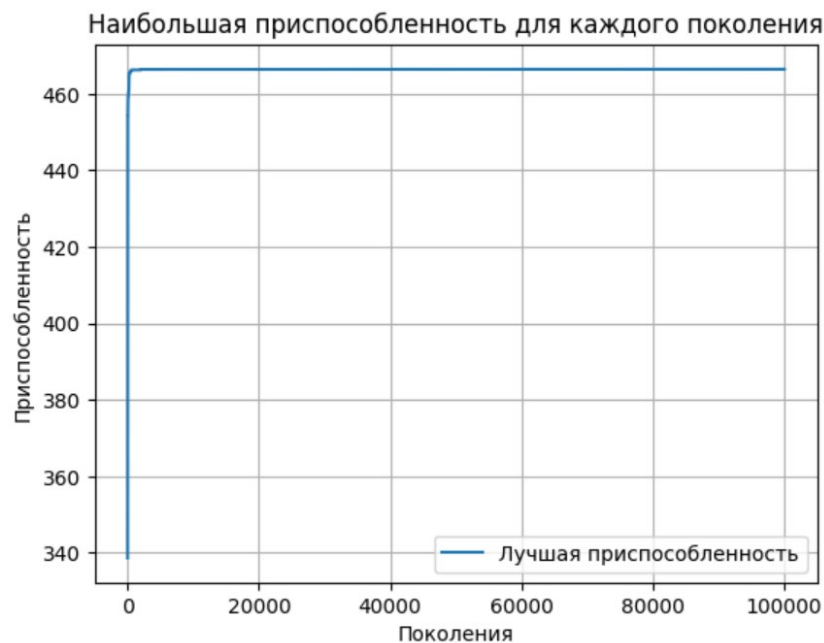


Рисунок 11 – График лучшей приспособленности среди индивидуумов в зависимости от поколения при количестве поколений в 100000

При этом полученные результаты:

$$n = 6478,643290501411 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

$$s = 0,05999998655977572 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$$

$$B = 0,02999998581524905 \text{ мм.}$$

$$t = 9,999996924769308 \text{ мм.}$$

Лучшая приспособленность: 466,4618484239651

В результате лучшее решение демонстрирует приспособленность примерно на 0,2 больше, чем решение полученной при количестве поколений в 10000, учитывая на порядок возросшее время работы программы, можно заключить, что количество поколений в 10000 является оптимальным при заданных условиях.

Для дальнейшей оптимизации работы программы, был проведён эксперимент с коэффициентом мутации. Для каждого значения коэффициента мутации было совершено 5 запусков программы, на основании которых было получено среднее значение приспособленности при данном значении мутации. Результаты эксперимента представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Значения приспособленности при различных коэффициентах мутации

Коэф. мутации 0		Коэф. мутации 0,05		Коэф. мутации 0,1		Коэф. мутации 0,2		Коэф. мутации 0,3		Коэф. мутации 0,4	
Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.
1	457,889	1	466,375	1	466,364	1	466,456	1	466,428	1	466,418
2	443,872	2	466,431	2	466,370	2	465,519	2	466,375	2	465,432
3	453,000	3	466,451	3	466,459	3	466,440	3	466,430	3	465,575
4	441,974	4	466,444	4	466,233	4	466,433	4	466,447	4	466,144
5	449,434	5	466,454	5	466,454	5	466,310	5	466,435	5	466,403
Коэф. мутации 0,5		Коэф. мутации 0,6		Коэф. мутации 0,7		Коэф. мутации 0,8		Коэф. мутации 0,9		Коэф. мутации 1	
Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.
1	466,258	1	466,324	1	466,069	1	465,982	1	463,706	1	453,834
2	466,326	2	466,307	2	466,189	2	463,842	2	462,358	2	456,593
3	466,377	3	466,222	3	466,142	3	465,616	3	462,888	3	452,916
4	466,326	4	466,344	4	466,246	4	465,550	4	464,754	4	455,468
5	466,440	5	464,709	5	466,248	5	459,819	5	461,305	5	456,674

В общем случае с увеличением коэффициента мутации увеличивается и время работы программы, вместе с этим разнообразие особей в популяции также увеличивается, что, с одной стороны, исключает возможность вырождения популяции и попадания в локальный максимум, с другой,

препятствует нормальному функционированию работы алгоритма. При отключении оператора мутации, то есть установлении коэффициента мутации равного нулю, происходит вырождение популяции, при значении коэффициента равному единице, работа алгоритма нарушается за счёт постоянного случайного обновления индивидуумов. Это можно понять с помощью графиков средней приспособленности, которые косвенно показывают разнообразие конкретной популяции.

На рисунке 12 приведен график средней приспособленности в зависимости от поколения для коэффициента мутации равного нулю. Средняя приспособленность не меняется, популяция выродилась.

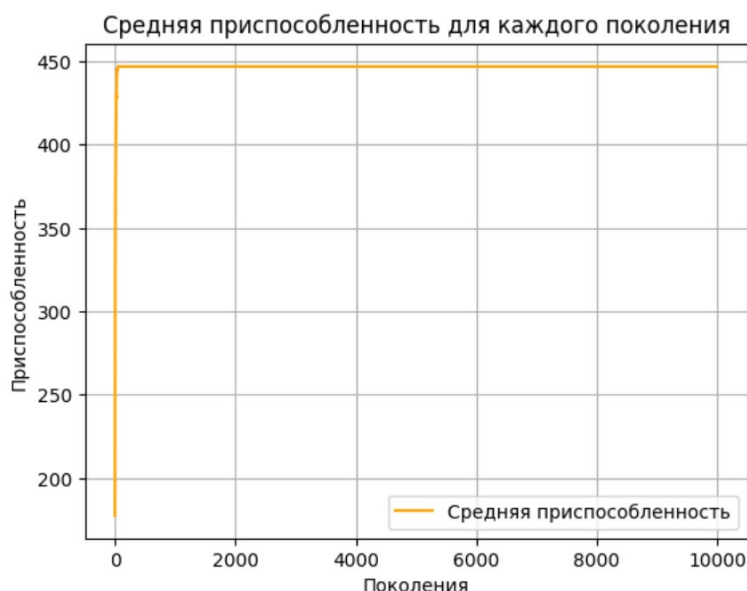


Рисунок 12 – График средней приспособленности в зависимости от поколения для коэффициента мутации 0

И, соответственно для коэффициента мутации равного единице график средней приспособленности в зависимости от поколения для коэффициента мутации 1 на рисунке 13.

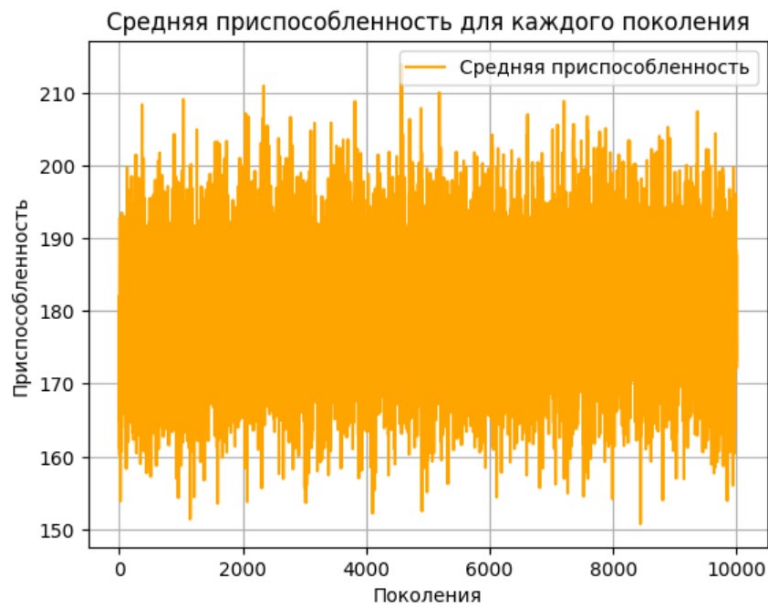


Рисунок 13 – График средней приспособленности в зависимости от поколения для коэффициента мутации 1

Обобщённая зависимость, основанная на таблице 10, продемонстрирована на рисунке 14.

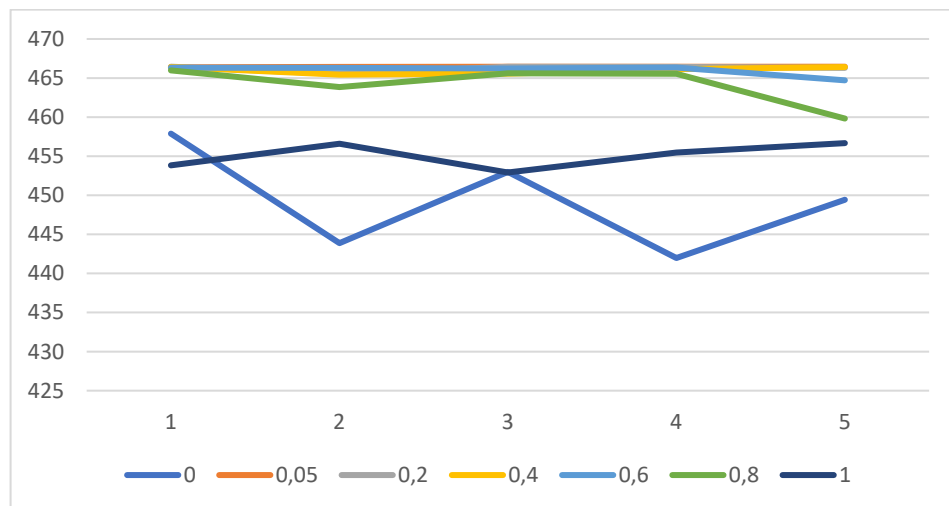


Рисунок 14 – Зависимость приспособленности в пяти опытах от коэффициента мутации

Коэффициент в 0,1 будет принят в качестве оптимального. Аналогичным образом проведём определение оптимальной доли особей для элитизма. В таблице 11 приведены результаты эксперимента для доли элитизма от 0,1 до 0,8 с шагом в 0,1.

Таблица 11 - Значения приспособленности при различных долях элитизма

Доля элитных индивидуумов 0,1		Доля элитных индивидуумов 0,2		Доля элитных индивидуумов 0,3		Доля элитных индивидуумов 0,4	
Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.
1	466,447	1	466,396	1	466,445	1	466,410
2	466,402	2	464,023	2	463,279	2	466,443
3	466,405	3	466,410	3	466,443	3	466,410
4	465,569	4	466,449	4	466,453	4	466,422
5	466,439	5	466,008	5	466,406	5	466,427
Доля элитных индивидуумов 0,5		Доля элитных индивидуумов 0,6		Доля элитных индивидуумов 0,7		Доля элитных индивидуумов 0,8	
Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.	Опыт	Присп.
1	462,774	1	460,084	1	454,818	1	465,043
2	466,445	2	465,856	2	462,542	2	466,343
3	463,779	3	463,718	3	457,432	3	464,913
4	466,328	4	465,420	4	466,441	4	462,302
5	464,029	5	466,439	5	462,451	5	458,945

Увеличение доли элитных особей уменьшает время выполнения программы, за счёт того, что к ряду особей перестают применяться операторы отбора и мутации, тем не менее это приводит к снижению разнообразия среди особей и высокие значения доли элитизма ведут к нестабильным результатам и вырождению популяции.

Доля в 0,2 имеет наибольшую скорость выполнения программы, при этом алгоритм работает стабильно, поэтому будет принята как оптимальная.

3.3.4 Оптимизация режимов резания

Полученные режимы резания для каждой операции приведены в таблице 12.

3.3.5 Сравнение полученных режимов резания с базовыми

Режимы резания, полученные с помощью генетического алгоритма, были перенесены в управляющую программу. Сравнение с базовыми режимами показаны в следующих подразделах.

Таблица 12 – Полученные режимы резания

Операция	Коэффициент важности для шероховатости	Частота вращения шпинделя n, об/мин.	Подача на зуб s, мм/зуб.	Ширина фрезерования В, мм.	Глубина резания t, мм.
035	0	6478,069	0,059	0,029	9,999
060	0	5230,164	0,039	9,999	9,970
065	0,66	5226,377	0,039	9,999	9,999
070	0	11091,957	0,039	0,029	9,998
100	0,66	7535,730	0,040	0,028	7,782
105	1	7573,396	0,040	0,029	7,535
110	0,66	11850,999	0,020	0,024	8,777
115	1	11991,538	0,020	0,025	7,619
135	0,66	11911,907	0,020	0,030	7,937
140	1	11961,695	0,120	0,044	0,202
145	1	11961,695	0,120	0,044	0,202

3.3.5.1 Операция 035

В данной операции проводится фрезерование отверстия с 13 до 15 мм. в диаметре (поверхности 38 и 41). Оставляемый припуск [7] на следующую операцию составляет 0,5 мм. Из-за большой полученной глубины резания, , было принято решение изменить траекторию с винтовой на спиральную. Обновлённая траектория проигрывает базовой на 51 секунду.

Формы базовой и обновлённой траектории приведён на рисунке 15.

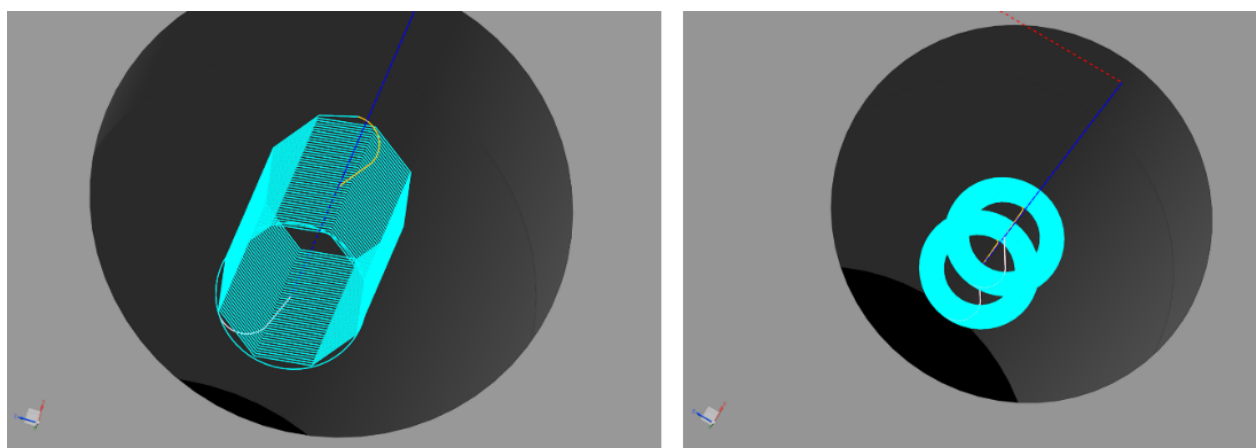


Рисунок 15 – Базовая и обновлённая траектория для операции 035

3.3.5.2 Операция 060

Проводится черновая обработка формообразующих пресс-формы (поверхности 42 и 44). Оставляемый припуск на сторону и по полу 0,55 мм. Время выполнения программы сокращено на 215 секунд.

Формы базовой и обновлённой траектории приведены на рисунке 16.

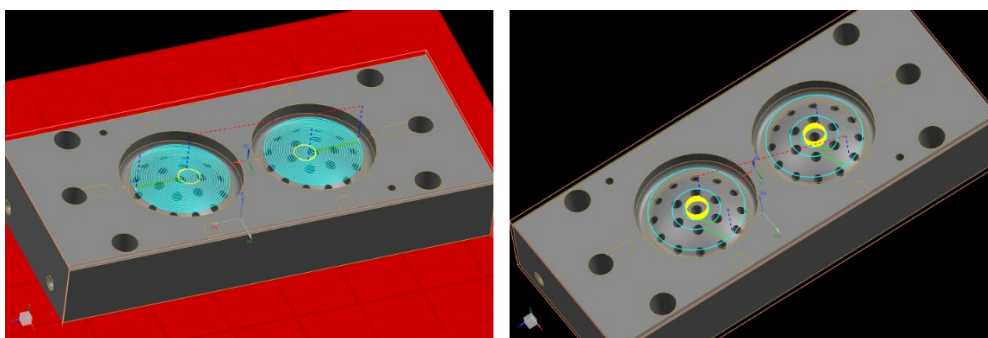


Рисунок 16 – Базовая и обновлённая траектория для операции 060

3.3.5.3 Операция 065

Черновая обработка четырёх отверстий диаметром 18 мм. и двух отверстий диаметром 17 мм (поверхности 1, 9, 12, 22, 38, 41). Оставляемый припуск на сторону составляет 0,1 мм. Время выполнения операции было сокращено с 13 минут, 59 секунд до 29 секунд.

Формы базовой и обновлённой траектории приведены на рисунке 17:

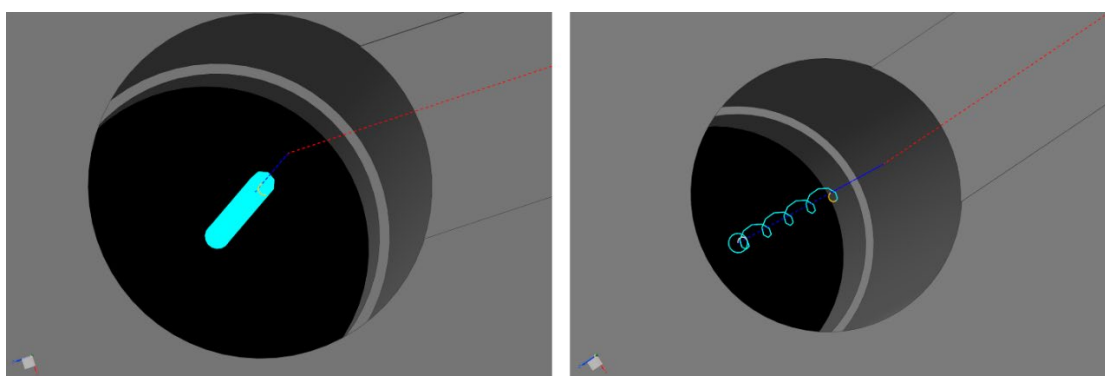


Рисунок 17 – Базовая и обновлённая траектория для операции 065

3.3.5.4 Операция 070

Черновое фрезерование пазов под отвод воздуха из пресс-формы. Был увеличен осевой шаг за счёт чего снижено количество проходов. Оставлен припуск по полу в 0,4 мм. Затрачиваемое время сокращено на 78 секунд.

Формы базовой и обновлённой траектории приведены на рисунке 18.

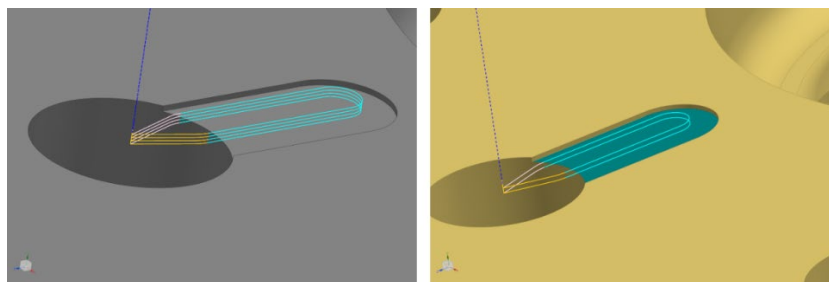


Рисунок 18 – Базовая и обновлённая траектория для операции 070

3.3.5.5 Операции 100, 105, 110, 115

В операции 100 проводится полуступенчатое фрезерование отверстий 36 и 39. Оставляемый припуск на сторону 0,1 мм. В операции 105 проводится чистовая обработка данных отверстий. Операции 110 и 115 аналогичны 100 и 105, но обрабатываются отверстия 8 и 15. Как и в операции 35 траектория была изменена с винтовой на спиральную. Общее время выполнения для всех четырёх операций было снижено на 108 секунд.

Формы базовой и обновлённой для операции 100 показаны на рисунке 19.

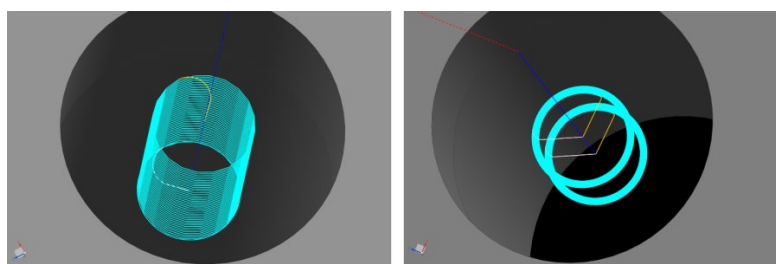


Рисунок 19 – Базовая и обновлённая траектория для операции 100

Для операции 105 на рисунке 20.

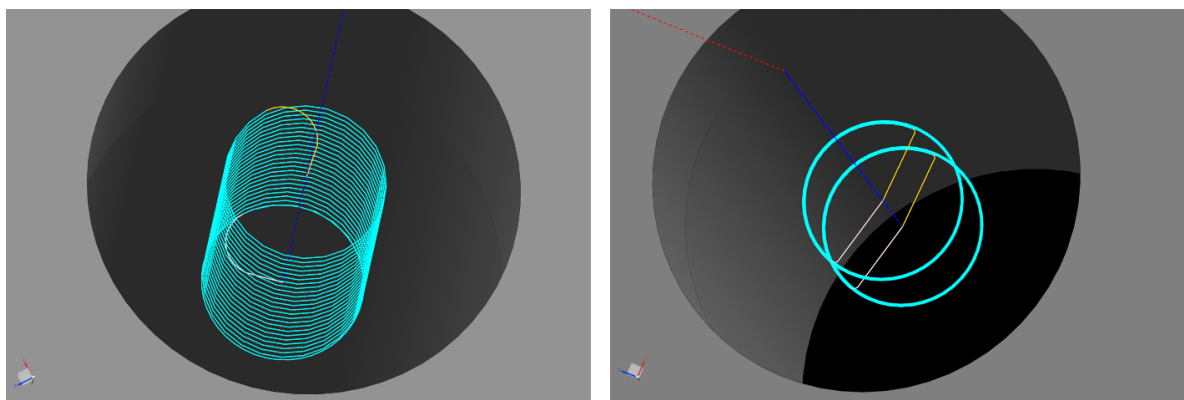


Рисунок 20 – Базовая и обновлённая траектория для операции 105
Для операции 110 на рисунке 21:



Рисунок 21 – Базовая и обновлённая траектория для операции 110

И для операции 115 на рисунке 22.

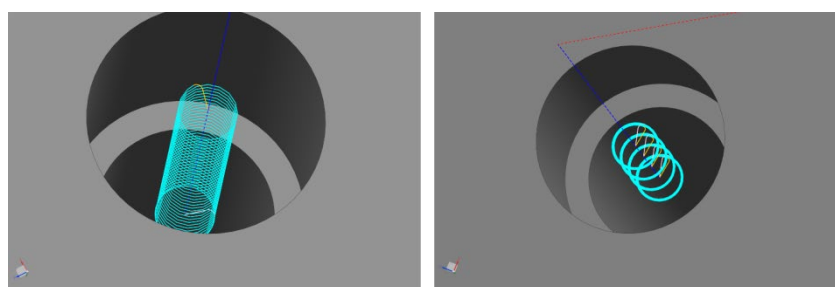


Рисунок 22 – Базовая и обновлённая траектория для операции 115

3.3.5.6 Операция 135

Проводится чистовая обработка пазов под вывод воздуха из-под пресс-формы. Полученные режимы позволили существенно сократить количество проходов, время выполнения программы сокращено на 107 секунд.

Формы базовой и обновлённой для операции 135 показаны на рисунке 23:

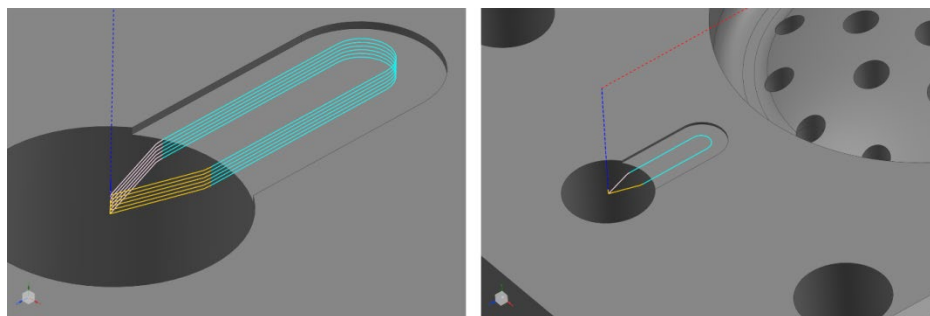


Рисунок 23 – Базовая и обновлённая траектория для операции 135

3.3.5.7 Операция 140, 145

Осуществляется чистовая и финишная обработка формообразующих соответственно (поверхности 42 и 44). На финишную операцию оставляется припуск в 0,1 мм. по полу и на сторону. В операции 140 обновлённые режимы резания проигрывают по времени базовым на 150 сек.

На рисунке 24 приведены базовая и обновлённая траектория соответственно.

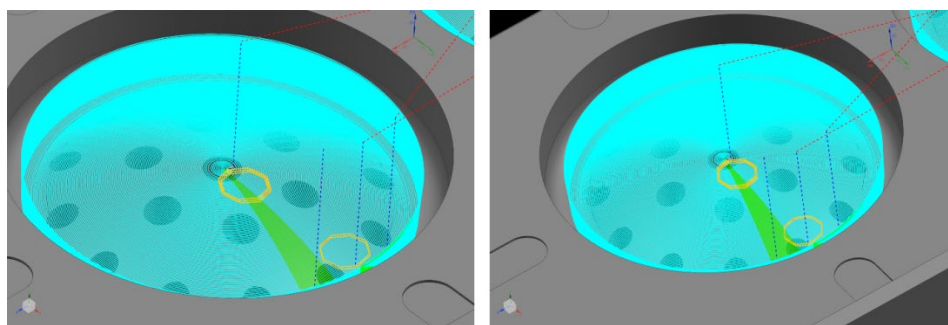


Рисунок 24 – Базовая и обновлённая траектория для операции 140

За счёт повышенной частоты вращения шпинделя удалось существенно сократить время обработки, при сохранении близких значений подачи на зуб и ширины фрезерования влияющих на шероховатость поверхности. Время финишной обработки снижено на 830 секунд по сравнению с базовым вариантом.

На рисунке 25 приведены базовая и обновлённая траектория соответственно.

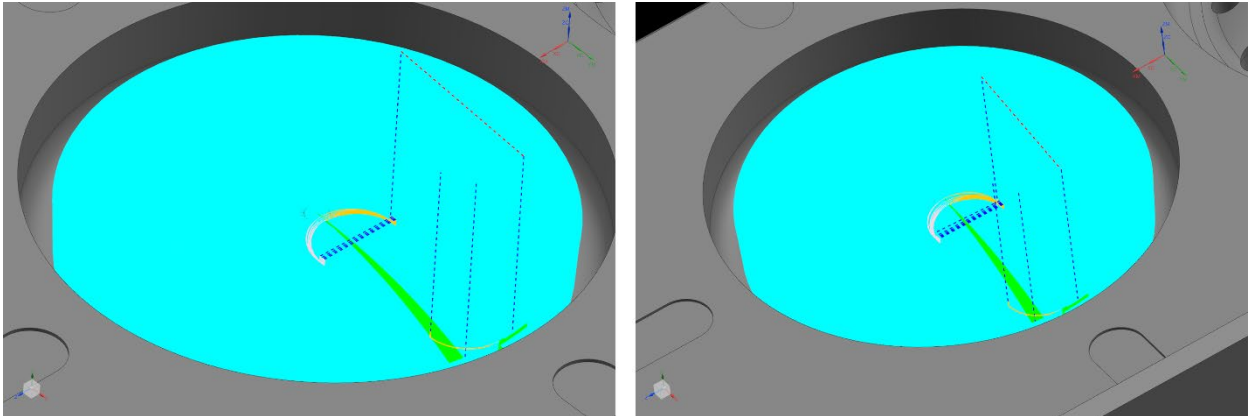


Рисунок 25 – Базовая и обновлённая траектория для операции 145

3.3.6 Итоговый результат

На рисунке 26 приведено суммарное машинное время и машинное время для каждого из четырёх установов после оптимизации режимов резания:

PROGRAM				04:13:56
UST1_DOTO				00:26:41
UST2_DOTO				00:38:40
UST1_POSLETO				00:02:38
UST2_POSLETO				03:05:57

Рисунок 26 – Машинное время для оптимизированных режимов резания

И, на рисунке 27, приведено время для базового варианта.

PROGRAM				04:46:23
UST1_DOTO				00:25:50
UST2_DOTO				00:57:03
UST1_POSLETO				00:04:26
UST2_POSLETO				03:19:04

Рисунок 27 – Машинное время для базовых режимов резания

За счёт оптимизации машинное время было снижено на 32 минуты 27 секунд.

3.4 Оптимизация траектории инструмента

3.4.1 Исходные данные

Оптимизация траектории инструмента будет проводиться для операции центrovания отверстий формообразующей поверхности. Расположение отверстий показано на рисунке 28. Там же показана траектория инструмента, сгенерированная с помощью встроенных алгоритмов программного обеспечения Siemens NX.

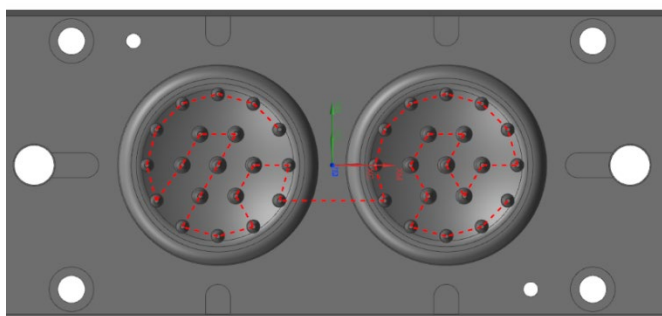


Рисунок 28 – Базовая траектория инструмента

В общем случае имеется 38 отверстий, по 19 отверстий в каждом секторе. С целью сокращения времени работы, в начале оптимизация будет проводиться именно для одной секции. Длина траектории построенной Siemens NX, с учётом погружений центровочного сверла составляет 1132,2 мм., время 5 минут 31 секунда.

3.4.2 Программа для оптимизации траектории инструмента

Для оптимизации режимов резания была написана программа на языке Python [21]. Принцип работы программы повторяет базовую структуру генетического алгоритма.

Общее устройство программы схоже с программой для оптимизации режимов резания. Так, первые строки кода задают координаты городов, затем вводится функция приспособленности, функция создания популяции, вычисления приспособленности, скрещивания и мутации. После чего идёт часть кода, задействующая сам генетический алгоритм. В финальной части выводится длина кратчайшего пути, значение максимальной приспособленности и отладочные графики зависимости максимальной и средней приспособленности от поколения [15], [20], [23].

3.4.3 Процесс оптимизации траектории инструмента

Для первого прохода размер популяции был принят за 100 и количество обрабатываемых поколений установлено как 1000.

В данном случае длина маршрута, представленная лучшим индивидуумом, составляла 308,4069623068916 мм.

Зависимость приспособленности от поколения представлен на рисунке 29.

А построенная траектория представлена на рисунке 30.

Исходя из представленных данных, можно заключить, что за заданное количество поколений алгоритм не успевает найти оптимальную траекторию. Это видно как из графика, где после преодоления отметки в 800 новых поколений значение приспособленности продолжает ступенчато изменяться, так и по самой траектории, которая имеет множество пересечений.

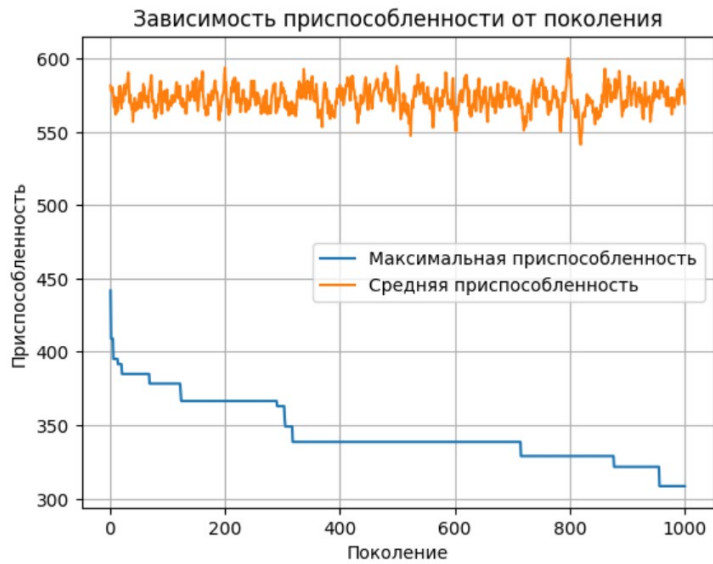


Рисунок 29 – График зависимости средней и максимальной приспособленности от поколения

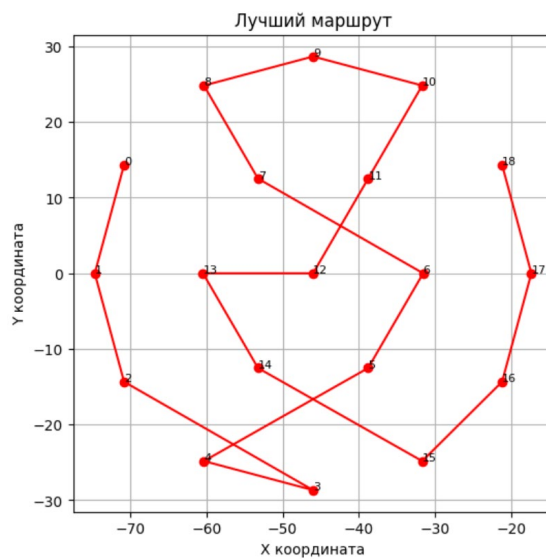


Рисунок 30 – Траектория, построенная алгоритмом при размере популяции 100 и количестве поколений в 1000.

Для получения лучших результатов следует увеличить количество поколений. Изменять общий размер популяции не стоит, поскольку алгоритм

работает и находит новые решения системы, не застревая в локальных максимумах. Уменьшение количества особей в начальной популяции может привести к её вырождению, в то время как излишнее увеличение, существенно увеличить время работы программы.

Следующий проход осуществляется с количеством новых поколений в 10000. Длина полученного маршрута составила 276,8138064205252 мм., разница с прошлым экспериментом составляет 31,5931558863664 мм., что является хорошим улучшением по сравнению с длиной полученной при числе обрабатываемых поколений в 1000. График зависимости средней и максимальной приспособленности от количества поколений приведён на рисунке 31.

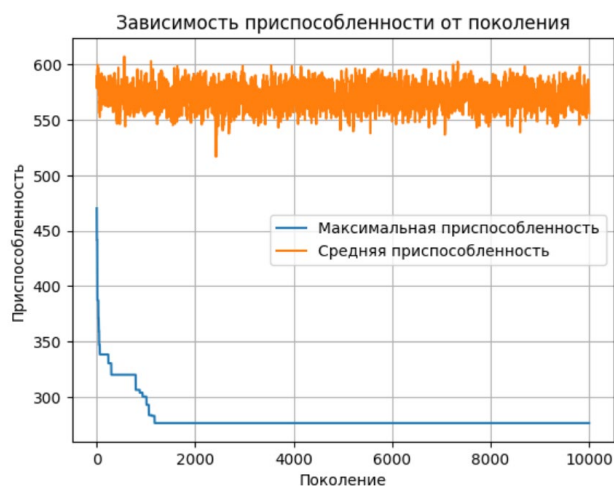


Рисунок 31 – График зависимости средней и максимальной приспособленности от поколения при размере популяции в 10000

Полученная траектория приведена на рисунке 3.5. Исходя из графика на протяжении 9 тысяч поколений максимальная приспособленность оставалась неизменной. Это могло бы сигнализировать о том, что получен оптимальный маршрут, тем не менее исходя из полученной траектории можно заключить, что это не так. Наличие пересечения и общий вид траектории говорит о том, что полученный результат не оптимален.

Количество поколений было повышено до 100000. Длина полученного маршрута составила 263,6288962823224 мм. Длина маршрута была уменьшена на 13 мм. по сравнению с экспериментом с размером популяции в 10000. Уменьшение динамики изменения лучшей особи говорит о том, что алгоритм приближается к оптимальному решению или уже нашёл его. Для проверки следует провести финальный эксперимент с количеством поколений в 1000000.

Обновлённый график зависимости средней и максимальной приспособленности от количества поколений представлен на рисунке 32.

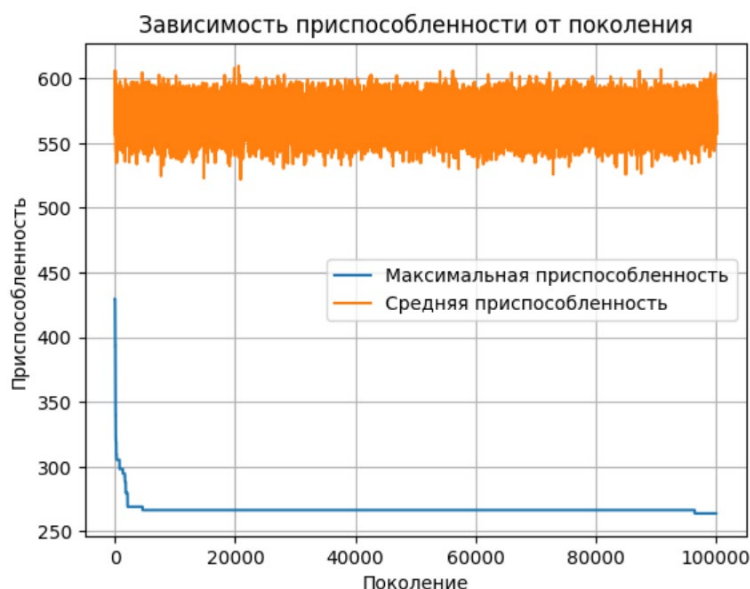


Рисунок 32 – График зависимости средней и максимальной приспособленности от поколения при размере популяции в 100000

Количество поколений было повышено до 1000000. Длина полученного маршрута составила 263,62883066085885 мм. График зависимости приспособленности от количества поколений показан на рисунке 33.

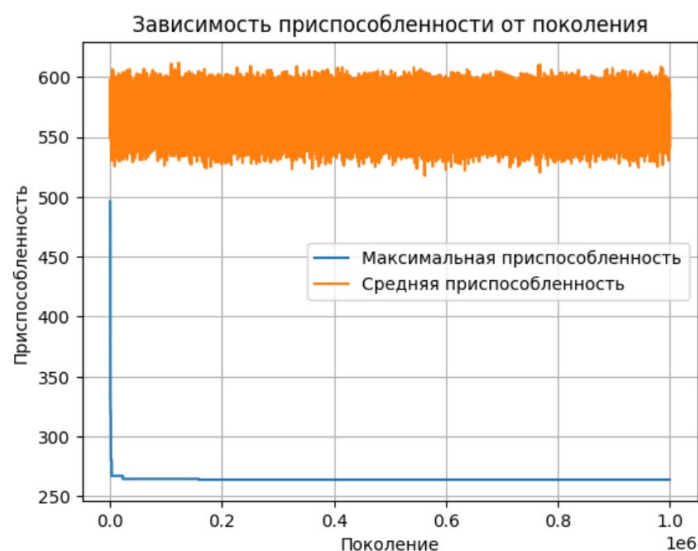


Рисунок 33 - График зависимости средней и максимальной приспособленности от поколения при размере популяции в 1000000

Траектория была укорочена на 0,00006562146355 мм. что, естественно является незначительным улучшением по сравнению с проведённым объёмом вычислений и временем, затраченным на работу программы. График демонстрирует, что последнее значительное изменение максимальной приспособленности было получено в районе 150 тысячного поколения. За оставшиеся 850 тысяч поколений алгоритм не нашёл новых решений либо они были мало отличны от старых.

Итоговая траектория представлена на рисунке 34.

Полученный при 1000000 поколений результат говорит о том, что полученное решение максимально близко к оптимальному или является оптимальным. В общем случае, если упор делается на скорость работы алгоритма можно порекомендовать использовать количество поколений в 200000.

Дополнительно была проведена оптимизация для двух формообразующих сразу. Количество новых поколений было взято как 1000000. Результат работы алгоритма в данном случае представлен на рисунке 35.

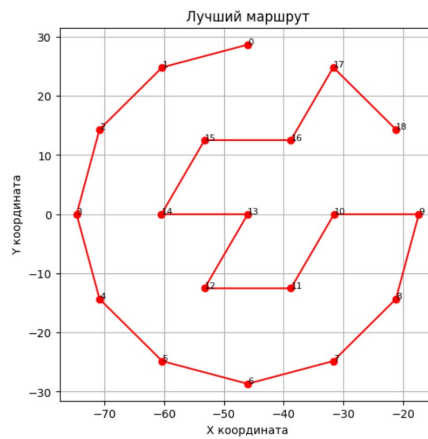


Рисунок 34 - Траектория построенная при количестве поколений в 1000000

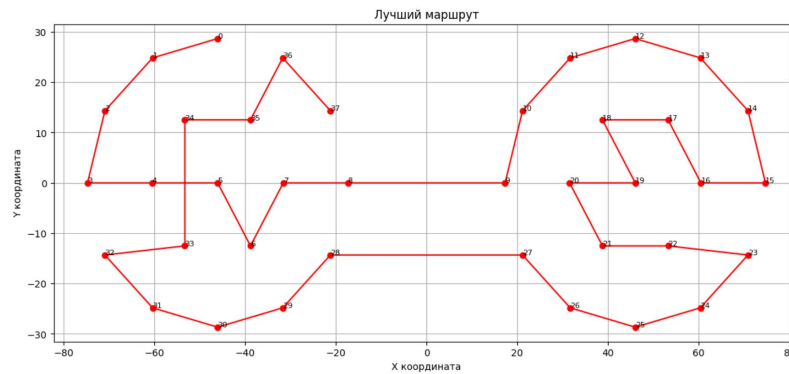


Рисунок 35 – Траектория, построенная для двух секторов

Результат, полученный на правом участке, можно отразить тем самым получив траекторию без пересечений. Полученный результат был перенесён в управляющую программу в Siemens NX, общий вид на деталь с траекторией показан на рисунке 36.

3.4.4 Результат работы алгоритма

Результат переноса траектории в программу и пересчёт длины траектории и времени выполнения программы показал следующие результаты.

На рисунке 37 приведена информация о базовой траектории.

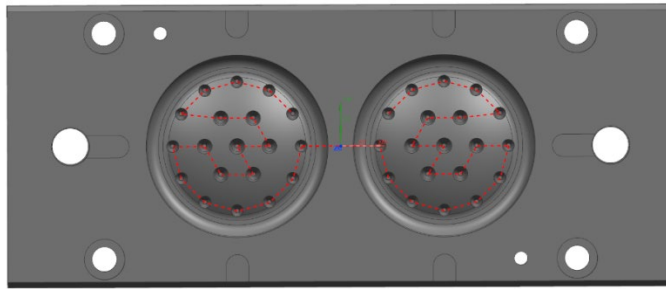


Рисунок 36 – Полученная траектория в окне интерфейса Siemens NX

Имя	Смена и...	Траектория	Инструм...	Номер...	Время	Длина
UST2_POSLETO					13:28:37	410999.1
22_CENTR	Ø	✓	CENTR	9	00:05:31	1132.2
23_D1_8	Ø	✓	D1_8	7	00:40:49	2590.7
24_D2U1316	Ø	✓	D2U1316	2	00:25:11	1340.2
25_D2U1316		✓	D2U1316	2	00:25:11	1350.7

Рисунок 37 – Данные базовой траектории

На рисунке 38 приведена информация об оптимизируемой траектории.

Имя	Смена и...	Траектория	Инструм...	Номер инструмента	Время	Длина
UST2_POSLETO					03:19:04	410983.2
22_CENTR	Ø	✓	CENTR	9	00:05:31	1128.9
23_D1_8	Ø	✓	D1_8	7	00:40:49	2589.8
24_D2U1316	Ø	✓	D2U1316	2	00:25:11	1339.6
25_D2U1316		✓	D2U1316	2	00:25:11	1339.6

Рисунок 38 – Данные обновлённой траектории

Выводы по разделу

Суммарная длина траектории со всех операций центрования и сверления данных отверстий была сокращена на 15,9 мм. Поскольку оптимизируемая часть траектории инструмента используется для подачи или отвода инструмента, то есть используются высокие подачи, изменения по времени для каждой из 4-ёх операций составило меньше секунды.

4 Безопасность и охрана труда

4.1 Опасные и вредные производственный факторы

В технологическом процессе участвуют вертикально-фрезерный станок с ЧПУ TAISUN SEIKI QUICK MILL-1020L и плоскошлифовальный ОШ-400АФ2, на обоих используется СОЖ. Обрабатываемый материал – сталь 40х.

При работе на фрезерно-сверлильном обрабатывающем центре и плоскошлифовальном станке рабочие могут подвергаться воздействию следующих опасных и вредных производственных факторов [4]:

- Механические и термически травмы: Возможность получения травм от вращающихся и движущихся частей оборудования, инструментов и обрабатываемых деталей. От контакта с нагретыми поверхностями. В контексте фрезерно-сверлильного обрабатывающего центра, к примеру, угрозу может представлять также средства оснастки, а именно магнитная плита.

- Шум и вибрация: Высокий уровень шума и вибрации, возникающие при работе оборудования, могут негативно влиять на здоровье работников. Нормируется в СанПиН 2.2.4.3359-16.

- Пыль и аэрозоли: Образование металлической пыли и аэрозолей смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в процессе обработки стали, ГОСТ Р 54578-2011.

- Химические факторы: Вредное воздействие компонентов СОЖ, а также продуктов их распада и взаимодействия с обрабатываемыми материалами.

- Электрический ток: Риск поражения электрическим током при неправильной эксплуатации оборудования или неисправностях в электрооборудовании.

4.2 Меры безопасности

Меры принимаемые для минимизации воздействия опасных и вредных производственных факторов на работников предприятия можно поделить на организационные:

- Обучение и инструктаж работников по охране труда и технике безопасности.
- Организация режима труда и отдыха, включая перерывы для снижения утомляемости.
- Выдача работникам спецодежды и спецобуви, защищающих от механических повреждений.
- Использование средств защиты органов слуха (беруши или наушники) для снижения воздействия шума.
- Применение респираторов и масок для защиты дыхательных путей от пыли и аэрозолей.
- Использование защитных очков и щитков для защиты глаз от металлической стружки и брызг СОЖ.
- Обеспечение работников защитными перчатками для предохранения рук от порезов и химического воздействия.

А также технические меры:

- Использование ограждающих устройств и защитных кожухов на оборудовании.
- Применение эффективных систем вентиляции и пылеудаления для удаления металлической пыли и аэрозолей СОЖ.
- Регулярное техническое обслуживание и контроль состояния оборудования.
- Использование инструментов и приспособлений, соответствующих требованиям безопасности.
- Обеспечение надежного заземления и защитного отключения электрооборудования.

4.3 Пожарная и техногенная безопасность

Основными причинами пожара могут быть: неисправность электропроводки; пламя и искры; возгорание промасленной ветоши; попадание высокого напряжения на токопроводящие части оборудования.

Как и в случае с мерами борьбы с опасными и вредными производственными факторами, общие методы обеспечения пожарной безопасности можно поделить на организационные:

- Проведение плановых противопожарных инструктажей
- Обеспечение средствами пожаротушения
- Обеспечение безопасности проведения пожарных работ

И технические:

- Использование пожарной сигнализации/извещателей

4.4 Экологическая безопасность

Ключевыми источниками экологической опасности технического объекта в данных условиях являются металлические стружка, пыль и СОЖ. В качестве мер борьбы с ними принимаются следующие меры:

- Использование систем фильтрации и очистки воздуха для удаления металлической пыли и аэрозолей СОЖ.

- Использование замкнутых систем обращения СОЖ, для многократного применения.

- Внедрение технологий сухой обработки металлов.

Утилизация и переработка отходов также являются важными аспектами экологической безопасности производства. Для их реализации предлагаются следующие методы:

- Сбор и переработка металлической стружки и пыли для вторичного использования.

- Организация сбора и безопасной утилизации использованных СОЖ, с последующей их переработкой или утилизацией в соответствии с экологическими нормативами.

- Очистка сточных вод с использованием фильтров

Выводы по разделу

Для контроля экологической безопасности производства необходимо проведение регулярного контроля выбросов в атмосферу, сбросов в водные ресурсы и инспекций для преждевременного выявления и устранения экологических рисков.

5 Экономическая эффективность работы

Основной целью работы была оптимизация режимов резания для сокращения времени обработки, соответственно, оценка экономической эффективности работы будет проводиться на основе основного времени и станкоёмкости с учётом заработной платы станочника с начислениями и затратами на содержание и эксплуатацию оборудования.

Согласно рисунку 27, основное время базового технологического процесса составляет 4 часа, 46 минут, 23 секунды. В то время как время оптимизированного технологического процесса, по рисунку 26, составило 4 часа, 13 минут, 56 секунд. Экономический эффект будет удобнее всего представить в виде таблицы 13.

Таблица 13 – Расчёт экономического эффекта

Наименование показателей	Расчётные формулы и расчёт	Значения показателей	
		Базовый вариант	Оптимизированный вариант
Заработная плата рабочих	<p>Учитывая среднюю зарплату станочника по Самарской области в 80 тысяч рублей восьмичасовом рабочем дне и приняв количество рабочих дней в месяце за 20 почасовой тариф:</p> $\frac{80000}{20 * 8} = 500 \frac{\text{рублей}}{\text{час}}$ $500 \cdot \left(4 + \frac{46}{60} + \frac{23}{3600} \right) = 2386,528 \text{ руб.}$ $500 \cdot \left(4 + \frac{13}{60} + \frac{56}{3600} \right) = 2116,111 \text{ руб.}$	2386,528 руб.	2116,111 руб.
Затраты на электроэнергию	<p>Учитывая тариф в 9 рублей/кВт. и, исходя из паспорта станка, приняв потребляемую им электроэнергию как 14 кВт/ч, найдём затраты на электроэнергию:</p>	601,405 руб.	533,260 руб.

Продолжение таблицы 13

Наименование показателей	Расчётные формулы и расчёт	Значения показателей	
		Базовый вариант	Оптимизированный вариант
	$14 \cdot 9 \cdot \left(4 + \frac{46}{60} + \frac{23}{3600}\right)$ $= 601,405$ $14 \cdot 9 \cdot \left(4 + \frac{13}{60} + \frac{56}{3600}\right)$ $= 533,260$		
Расходы на технологическую воду	<p>Техническая вода используется для разведения концентрата СОЖ. Примерный расход технической воды на 1 час работы фрезерного станка будет принята как 0,7 литра. Тариф на воду с учётом водоотведения 64,2 рубля за кубический метр.</p> <p>Исходя из этого расходы на воду:</p> $\frac{2,8}{1000} \cdot \left(4 + \frac{46}{60} + \frac{23}{3600}\right)$ $= 0,013 \text{ руб.}$ $\frac{2,8}{1000} \cdot \left(4 + \frac{13}{60} + \frac{56}{3600}\right)$ $= 0,012 \text{ руб.}$	0,013 руб.	0,012 руб.
Расходы на смазочные материалы, СОЖ	<p>Приняв стоимость 25 литров СОЖ Vlasocut 4000 CF как 22048,69 рублей с учётом того, что концентрат СОЖ разводится в пропорции 1 к 5, рассчитаем общие затраты на СОЖ:</p> $\frac{22048,69}{25} \cdot 0,14 \cdot \left(4 + \frac{46}{60} + \frac{23}{3600}\right) = 589,341 \text{ руб.}$ $\frac{22048,69}{25} \cdot 0,14 \cdot \left(4 + \frac{13}{60} + \frac{56}{3600}\right) = 522,564 \text{ руб.}$	589,341 руб.	522,564 руб.

Отсюда экономический эффект при изготовлении одного изделия:

$$2386,528 - 2116,111 + 601,405 - 533,260 + 0,013 - 0,012 + 589,341 - 522,564 = 405,34 \text{ руб.}$$

Выводы по разделу

Учитывая то, что согласно заказу необходимо изготовить 25 пресс-форм, суммарный экономический эффект: 10133,5 руб.

Заключение

В рамках работы были написаны две программы с использованием генетических алгоритмов: для оптимизации режимов резания и траектории инструмента на плоскости. Для работы первой программы были также рассчитаны ограничения на фрезерные операции, среди которых ограничение по мощности главного привода станка, скорости резания, по пределу прочности механизма подачи станки, ограничения образованные исходя из рекомендованных режимов резания производителем инструмента.

Полученные результаты показали работоспособность алгоритмов и сравнительную их эффективность. Так разница основного времени оптимизированного и базового вариантов составили 32 минуты 27 секунд, что впоследствии вылилось в экономический эффект в 10133,5 руб. при небольшой серии деталей из 25 штук. Результаты работы программы для оптимизации траектории в плоскости показал результаты лучше, нежели алгоритм Siemens NX, однако следует дополнить, что время работы программы было больше нежели у Siemens NX. Тем не менее, полученный результат позволил сократить почти 16 мм. длины траектории.

За счёт возможностей генетических алгоритмов, программы могут получить дальнейшее развитие с помощью дополнения моделей машинного обучения методами выделения признаков, использования обучения с подкреплением. Одним из путей совершенствования программы может выступить увеличение количества оптимизируемых параметров. Также перспективным может быть реализация работы генетического алгоритма в реальном времени, которая возможна при скорости смены поколений большей чем частота обновления данных.

В случае с программой для решения задачи коммивояжера, перспективным направлением развития было бы создание программы для решения задачи коммивояжера в пространстве.

Список используемой литературы

1. Барановский Ю.В. Режимы резания металлов. Справочник / Ю.В. Барановский. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - М., Машиностроение, 1995 г., 320 с.
2. Горбацевич А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: Учеб. Пособие для вузов. / А.Ф.Горбацевич, В.А. Шкред; 5-е издание, стереотипное. Перепечатка с 4-го издания. – М: ООО ИД «Альянс», 2007.- 256 с.
3. Гордеев А.В. Выбор метода получения заготовки. Метод, указания / А.В. Гордеев, - Тольятти, ТГУ, 2004.-9 с
4. Горина Л.Н. Обеспечение безопасных условий труда на производстве.Учеб. Пособие. / Л.Н. Горина, - Тольятти, 2016, 68 с.
5. Гузеев В. И., Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: справочник / В. И. Гузеев, В. А. Батуев, И. В. Сурков; под ред. В. И. Гузеева. - 2-е изд. - Москва: Машиностроение, 2007. - 364, [1] с.
6. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник / под общ. ред. В. И. Баранчикова. - Москва: Машиностроение, 1990. - 399 с.
7. Расчет припусков и межпереходных размеров в машиностроении: Учеб. пособ. Для машиностроит. спец. вузов/ Я.М. Радкевич, В.А. Тимирязев, А.Г. Схиртладзе, М.С. Островский; под ред. В.А. Тимирязева. – 2-е изд. Высш. шк. 2007 г.
8. Режимы резания металлов: справочник / Ю. В. Барановский [и др.]; под ред. А. Д. Корчемкина. - 4-е изд., перераб. и доп. Москва: НИИТавтопром, 1995. - 456 с.
9. Справочник технолога - машиностроителя. В 2-х кн. Кн. 1/ А.Г. Косилова [и др.]; под ред. А.М. Дальского [и др.]; - 5-е изд., перераб. и доп. - М: Машиностроение-1, 2001 г., 912 с.4.

10. Справочник технолога - машиностроителя. В 2-х кн. Кн. 2/ А.Г. Косилова [и др.]; под ред. А.М. Дальского [и др.]; - 5-е изд., перераб. и доп. - М: Машиностроение-1, 2001 г., 944 с.
11. Логинов, Н. Ю. Инженерно-исследовательские работы в технологии машиностроения: учебно-методическое пособие / Н. Ю. Логинов, Д. А. Расторгуев. — Тольятти: ТГУ, 2020. — 88 с.
12. Марочник сталей и сплавов / сост. А. С. Зубченко [и др.]; под ред. А. С. Зубченко. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 2003. — 782с.
13. ГОСТ 19903-2015 Прокат листовой горячекатаный. — 15 с.
14. Химический состав и физико-механические свойства стали 40X [Электронный ресурс]. — https://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/40X? (дата обращения: 12.05.2024).
15. A Genetic Algorithm for Solving Travelling Salesman Problem / Philip Adewole, Adio Akinwale, Kehinde Otubamowo — 4 с.
16. A review of genetic algorithm for metal cutting processes and a research agenda / Vijay D Jadhav, Krantikumar Bhosale – 9 с.
17. D. Bhandari, C.A. Murthy, and S.K. Pal. Genetic algorithms with elitist model and its convergence. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 10:731–747, 1996. – 17 с.
18. D.E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison Wesley, New York, 1989.
19. Genetic Algorithm-based Optimization of Cutting Parameters in Turning Processes / D. D'Addona, R. Teti — 6 с.
20. Genetic algorithms in integrated process planning and scheduling / Norhashiman Morad, Ams Zalzal — 11 с.
21. Eyal Wirsansky Hands-On Genetic Algorithms with Python — ISBN: 9781838557744 — 286 с.
22. Marwa Q. Ibraheem Optimization of Cutting Parameters in Milling Process Using Genetic Algorithm and ANOVA – 15 с.

23. Tomasz Gawronski, Optimisation of CNC routing operations of wooden furniture parts – 9 с.
24. Optimisation of the machining process using genetic algorithm / Nadežda Čuboňová, Zuzana Sagova, Tomas Dodok – 25 с.
25. YG-1 Каталог режущего инструмента для фрезерования – 751 с.

Приложение А

Программа для оптимизации режимов резания

```
import random
import math
import matplotlib.pyplot as plt

# Параметры задачи
population_size = 100 # размер начальной популяции
elitism_rate = 0.2 # для элитных индивидуумов, которые переходят в следующее поколение без изменений
mutation_rate = 0.1 # коэффициент мутации

# Параметры, задаваемые пользователем
k = 1 # важность для шероховатости
z = 4 # количество зубьев фрезы
D = 6 # диаметр фрезы
p = 1 # коэффициент
y = 5 # коэффициент

# функция для проверки соответствия индивидуума системе ограничений
def check_constraints(n, s, B, t):
    if n * (s ** 0.28) * (t ** 0.19) * (B ** -0.05) > 8457.768:
        return False
    if n * (s ** 0.75) * (t ** 0.88) * B > 15254.283:
        return False
    if (s ** 0.75) * (t ** 0.88) * B > 5.020:
        return False
    if s * n < 0.25 or s * n > 5000:
        return False
    return True

# функция для создания начальной популяции
def create_initial_population(population_size):
    population = []
    while len(population) < population_size:
        n = random.uniform(12.5, 12000)
        s = random.uniform(0.12, 0.13)
        B = random.uniform(0.04, 0.06)
        t = random.uniform(0.2, 0.3)
        individual = (n, s, B, t)
        if check_constraints(n, s, B, t):
            population.append(individual)
    return population

# функция для вычисления приспособленности
def calculate_fitness(individual, k, z, D, p, y):
    n, s, B, t = individual
    Q = t * B * s * z * n # Производительность
    Ra = 4.83 * (s ** 1.69) * (t ** 0.15) / ((math.pi * D * n / 1000) ** 1.23 * p ** 0.24 * y ** 0.46) # шероховатость поверхности
    I = (1 - k) * Q - k * Ra
    return I

# Оператор скрещивания
def crossover(parent1, parent2):
    crossover_point = random.randint(1, len(parent1) - 1)
    child1 = parent1[:crossover_point] + parent2[crossover_point:]
    child2 = parent2[:crossover_point] + parent1[crossover_point:]
    return child1, child2

# Оператор мутации
def mutate(individual, mutation_rate):
    n, s, B, t = individual
    if random.random() < mutation_rate:
        n = random.uniform(12.5, 12000)
    if random.random() < mutation_rate:
        s = random.uniform(0.12, 0.13)
    if random.random() < mutation_rate:
        B = random.uniform(0.04, 0.06)
    if random.random() < mutation_rate:
        t = random.uniform(0.2, 0.3)
    return n, s, B, t

# функция для выбора родителей для скрещивания
def select_parents(population, fitness_values):
    total_fitness = sum(fitness_values)
    selection_probs = [fitness / total_fitness for fitness in fitness_values]
    parent1, parent2 = random.choices(population, weights=selection_probs, k=2)
    return parent1, parent2

# функция для создания следующего поколения с учетом элитизма
def create_next_generation(population, fitness_values, mutation_rate, elitism_rate):
    next_generation = []
    elite_size = int(elitism_rate * population_size)
```

Продолжение Приложения А

```
# Сортировка популяции по приспособленности
sorted_population = [x for _, x in sorted(zip(fitness_values, population), reverse=True)]

# Добавление элитных индивидуумов
next_generation.extend(sorted_population[:elite_size])

while len(next_generation) < population_size:
    parent1, parent2 = select_parents(population, fitness_values)
    child1, child2 = crossover(parent1, parent2)
    child1 = mutate(child1, mutation_rate)
    child2 = mutate(child2, mutation_rate)
    if check_constraints(*child1):
        next_generation.append(child1)
    if len(next_generation) < population_size and check_constraints(*child2):
        next_generation.append(child2)
return next_generation

# Основной цикл генетического алгоритма
num_generations = 100000
avg_fitnesses = []
best_individuals = []
max_fitnesses = []

# Создание начальной популяции
population = create_initial_population(population_size)

for generation in range(num_generations):
    # Вычисление приспособленности
    fitness_values = [calculate_fitness(individual, k, z, D, p, y) for individual in population]

    # Сохранение максимальной и средней приспособленности
    max_fitnesses.append(max(fitness_values))
    avg_fitnesses.append(sum(fitness_values) / len(fitness_values))

    # Сохранение лучшего индивидуума
    best_individual = population[fitness_values.index(max(fitness_values))]
    best_individuals.append(best_individual)

    # Создание следующего поколения
    population = create_next_generation(population, fitness_values, mutation_rate, elitism_rate)

# Вывод лучшего индивидуума
final_best_individual = best_individuals[-1]
final_best_fitness = calculate_fitness(final_best_individual, k, z, D, p, y)
print(f"Лучший индивидуум: {final_best_individual}")
print(f"Лучшая приспособленность: {final_best_fitness}")

# Вывод графиков
# График максимальной приспособленности на каждой итерации
plt.plot(max_fitnesses, label='Лучшая приспособленность')
plt.xlabel('Поколения')
plt.ylabel('Приспособленность')
plt.title('Наибольшая приспособленность для каждого поколения')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

# График средней приспособленности на каждой итерации
plt.plot(avg_fitnesses, label='Средняя приспособленность', color='orange')
plt.xlabel('Поколения')
plt.ylabel('Приспособленность')
plt.title('Средняя приспособленность для каждого поколения')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```


Приложение Б

Программа для оптимизации траектории инструмента

```
import random
import matplotlib.pyplot as plt

# Количество городов и их координаты
num_cities = 38
cities_coordinates = [
    (-21.1678, 14.3369), (-31.6631, 24.8322), (-46.0000, 28.6738),
    (-60.3369, 24.8322), (-70.8322, 14.3369), (-74.6737, 0.0000),
    (-70.8322, -14.3369), (-60.4637, 0.0000), (-53.2319, 12.5260),
    (-38.7681, 12.5260), (-46.0000, 0.0000), (-53.2319, -12.5260),
    (-60.3369, -24.8322), (-46.0000, -28.6737), (-31.6631, -24.8322),
    (-38.7681, -12.5260), (-31.5362, 0.0000), (-17.3262, 0.0000),
    (-21.1678, -14.3369), (21.1678, -14.3369), (17.3263, 0.0000),
    (21.1678, 14.3369), (31.6631, 24.8322), (46.0000, 28.6737),
    (60.3369, 24.8322), (70.8322, 14.3369), (74.6738, 0.0000),
    (60.4638, 0.0000), (53.2319, -12.5260), (46.0000, 0.0000),
    (53.2319, 12.5260), (38.7681, 12.5260), (31.5363, 0.0000),
    (38.7681, -12.5260), (31.6631, -24.8322), (46.0000, -28.6738),
    (60.3369, -24.8322), (70.8322, -14.3369)
]

# Функция для вычисления расстояния между двумя городами
def distance(city1, city2):
    return ((city1[0] - city2[0])**2 + (city1[1] - city2[1])**2)**0.5

# Создание начальной популяции
def initial_population(population_size, num_cities):
    population = []
    for _ in range(population_size):
        individual = list(range(num_cities))
        random.shuffle(individual)
        population.append(individual)
    return population

# Функция для вычисления приспособленности особи (расстояние между городами)
def fitness(individual):
    total_distance = 0
    for i in range(len(individual) - 1):
        total_distance += distance(cities_coordinates[individual[i]], cities_coordinates[individual[i + 1]])
    return total_distance

# Скрещивание двух особей
def crossover(parent1, parent2):
    # Выбираем случайный участок генов от родителя 1
    start = random.randint(0, len(parent1) - 1)
    end = random.randint(start, len(parent1) - 1)
    child = [-1] * len(parent1)
    for i in range(start, end + 1):
        child[i] = parent1[i]
    # Заполняем оставшиеся гены из родителя 2
    index = 0
    for gene in parent2:
        if gene not in child:
            while child[index] != -1:
                index += 1
            child[index] = gene
    return child

# Мутация особи (случайная перестановка двух генов)
def mutate(individual):
    index1, index2 = random.sample(range(len(individual)), 2)
    individual[index1], individual[index2] = individual[index2], individual[index1]
```

Продолжение приложения Б

```
# Основная функция генетического алгоритма
def genetic_algorithm(population_size, generations, num_cities):
    best_distances = []
    avg_distances = []
    population = initial_population(population_size, num_cities)
    for _ in range(generations):
        population = sorted(population, key=lambda x: fitness(x))
        best_route = population[0]
        best_distances.append(fitness(best_route))
        avg_distances.append(sum(fitness(individual) for individual in population) / len(population))
        new_population = [best_route] # Elitism: сохраняем лучшую особь
        while len(new_population) < population_size:
            parent1, parent2 = random.choices(population, k=2)
            child = crossover(parent1, parent2)
            if random.random() < 0.1: # Вероятность мутации
                mutate(child)
            new_population.append(child)
        population = new_population
        best_route = population[0]
    return best_route, best_distances, avg_distances

best_route, best_distances, avg_distances = genetic_algorithm(population_size=100, generations=1000000, num_cities=num_cities)
print("Лучший маршрут:", best_route)
print("Длина маршрута:", best_distances[-1])

# Визуализация графика зависимости средней и максимальной приспособленности от поколения
generations = list(range(1, len(best_distances) + 1))
plt.plot(generations, best_distances, label='Максимальная приспособленность')
plt.plot(generations, avg_distances, label='Средняя приспособленность')
plt.xlabel('Поколение')
plt.ylabel('Приспособленность')
plt.title('Зависимость приспособленности от поколения')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

# Визуализация городов
plt.figure(figsize=(14, 6))
x = [city[0] for city in cities_coordinates]
y = [city[1] for city in cities_coordinates]
plt.scatter(x, y, color='blue')
for i, txt in enumerate(range(num_cities)):
    plt.annotate(txt, (x[i], y[i]), fontsize=8)
plt.title('Положение городов')
plt.xlabel('X координата')
plt.ylabel('Y координата')
plt.grid(True)
plt.show()

# Визуализация лучшего маршрута
best_route_x = [cities_coordinates[i][0] for i in best_route]
best_route_y = [cities_coordinates[i][1] for i in best_route]

plt.figure(figsize=(14, 6))
plt.plot(best_route_x, best_route_y, 'o-', color='red')
for i, txt in enumerate(range(num_cities)):
    plt.annotate(txt, (best_route_x[i], best_route_y[i]), fontsize=8)
plt.title('Лучший маршрут')
plt.xlabel('X координата')
plt.ylabel('Y координата')
plt.grid(True)
plt.show()
```