Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Волгоградский государственный технический университет

на правах рукописи

Ву Ван Занг

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ОБРАБОТКЕ

Специальность 2.5.5
Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Чигиринский Юлий Львович

Волгоград – 2024.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ **3**

ГЛАВА1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ .. **9**

1.1. Оценка качества поверхности, достижимого различными технологическими методами 9

1.2. Факторы, влияющие на качество поверхности деталей машин 15

1.3. Точность обработки деталей машин 17

1.4. Показатели качества и точности 19

1.5. Значение шероховатости поверхности и точность по справочным данным 22

1.6. Точность обработки и качество обрабатываемой поверхности изделий в исследованиях последних лет 28

1.7. Постановка цели и определение задач исследования 34

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ **38**

2.1. Оборудование, применяемое для исследования процесса многогостадийной обработки 38

2.2. Обрабатываемые материалы 44

2.3. Выбор инструментальных материалов 47

2.4. Выбор режимов обработки 51

2.5. Статистический анализ 52

2.6. Методика повышения надежности справочных данных 63

2.7. Оценка надёжности маршрута обработки 70

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА **72**

3.1. Построение вероятностных таблиц точности экспериментальных данных 72

3.2. Построение вероятностных таблиц точности справочных данных 83

3.3. Сравнение полученных результатов 90

3.4. Проектирование маршрута обработки с помощью вероятностных таблиц точности 101

Выводы по 3 главе 108

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ **110**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ **112**

ПРИЛОЖЕНИЕ А **125**

ПРИЛОЖЕНИЕ Б **130**

Введение

Актуальность темы исследования.

В области машиностроения производители все чаще используют различные материалы с повышенными механическими свойствами для улучшения качества продукции, а также для соответствия стандартам и специальным характеристикам.

Отметим, что определенный интерес, как производителей машиностроительной продукции, так и исследователей, вызывают конструкционные материалы, обладающие не только высокими прочностными характеристиками, но и, т. наз., «особыми» свойствами – коррозионной стойкостью, жаростойкостью, жаропрочностью, либо комплексом особых свойств. Более того, многие исследования [102, 103, 107, 120, 121] в мире показывают, что интенсивность коррозионных процессов и разрушение материалов в условиях тропической муссонной среды во много раз выше, чем в умеренном климате.

Вьетнам – страна, расположенная в тропическом муссонном климате, с высокой средней круглогодичной температурой и относительной влажностью, большим количеством осадков, что придаёт времени влажности TOW (time of wetness) большую ценность. Страна выходит к морю с протяжённостью береговой линии более 3000 км, поэтому на материке, а также в прибрежных районах, всегда есть потенциальный риск разрушения металлических материалов. Таким образом, во Вьетнаме процесс коррозии не только приводит к экономическим потерям, но и вызывает загрязнение окружающей среды из-за разрушения коррозионных продуктов или защитных материалов, нанося вред и окружающей среде, и здоровью человека. Более того, коррозия или ухудшение качества материалов также приводят к повреждениям и поломкам оборудования, в результате чего производство останавливается для ремонта и замены. В серьезных случаях коррозия вызывает катастрофические происшествия: несчастные случаи, приводящие к гибели людей и материальному ущербу.

Вьетнам – страна с молодой и развивающейся промышленностью, поэтому выбор и использование промышленных материалов требует особого внимания исследователей, а также производителей механической продукции, чтобы

гарантировать качество продукции и при этом соответствовать климатическим условиям Вьетнама.

В настоящее время во Вьетнаме производители часто изучают физико-механические свойства поверхностного слоя, получаемого с помощью нескольких стадий механической обработки, в основном – чистовой. В справочной литературе, традиционно используемой во Вьетнаме, отсутствуют данные об инструментальных и конструкционных материалах, разработанных в последней 30-35 лет, а также о том, насколько меняется геометрическая точность и качество поверхностного слоя при различных видах обработки.

Степень научной разработанности темы.

Анализ ситуации позволяет выявить ряд несоответствий, не позволяющих корректно использовать имеющиеся технологические знания для использования формальных методов проектирования технологических процессов поточной линии.

Выявленные несоответствия потенциально могут сформировать исследовательские задачи, в том числе по совершенствованию методов проектирования технологических процессов по индивидуальным путям переработки определенных качественных продуктов на основе занятости, четких представлений о случайном характере процессов, формирующих качество продукции, решаемые с использованием математических методов для моделирования и прогнозирования результатов многопереходной обработки.

Столкнувшись с необходимостью разработки методологической, теоретической и методологической базы проектирования линейных технологических процессов, мы сформулировали тему диссертационного исследования: «Исследование закономерностей формирования свойств поверхностного слоя изделий из титановых и алюминиевых сплавов при многопереходной обработке».

Цель работы: формирование информационного обеспечения формализованного построения технологических маршрутов многопереходной обработки плоских поверхностей при обработке титановые и алюмомагниевые

сплавы.

Для достижения данной цели необходимо решить ряд задач:

1) исследовать особенности процесса формирования комплекса показателей качества поверхности при обработке плоских поверхностей;

2) применить методику расчета статистических данных и оценки вероятности обеспечения требуемого качества поверхности;

3) определить условия наиболее рационального маршрута изготовления в цепочке многопереходной механической обработки;

4) определить и уточнить методику оценки статистических и экспериментальных данных, характеризующих качество обработанной поверхности после механической обработки детали.

Научная значимость исследования:

1. Разработаны вероятностные таблицы качества обработки, отражающие закономерности формирования глубины поверхностного слоя с измененными физико-механическими свойствами и микрогеометрии поверхности изделий машиностроения из цветных металлов и титановых сплавов, получаемых в результате многопереходной механической обработки.

2. Уточнена методика структурной оптимизации многопереходной технологии механической обработки поверхностей изделий машиностроения из цветных металлов и титановых сплавов с целью обеспечения заданного качества.

Научная новизна:

Включает в себя решение научно-практических задач прогнозирования результатов многопереходной обработки поверхностей механических изделий на стадии подготовки производства. Наиболее значимые результаты:

1. Показано и экспериментально обосновано, что при маршрутном технологическом проектировании необходимо учитывать технологические допуски методов механической обработки, фактически достижимые с учётом особенностей физико-механических и теплофизических свойств конструкционного материала;

2. Экспериментально доказано и теоретически обосновано с позиций

теплофизики формирования качества поверхностного слоя существенное отличие технологических допусков различных этапов механической обработки изделий из сплавов ПТ-3В и алюминиевого сплавов АМг5 от данных, рекомендуемых нормативно-справочной литературой для конструкционных и низколегированных сталей.

Наиболее значимые результаты:

1. Внедрена научно обоснованная методика проектирования планов обработки поверхностей определенного качества и точности на основе вероятностных таблиц точности обработки поверхностей изделий из цветных металлов и титановых сплавов.

2. Предложены таблицы точности обработки, содержащие значения фактических величин и доверительные оценки изменения технологических допусков при многопереходной обработке обработки поверхностей изделий из цветных металлов и титановых сплавов.

3. Доработан и дополнен метод статистического анализа результатов производственных экспериментов с целью достоверного определения технологических допусков методов механической обработки.

4. Уточнены алгоритмы и методика формализованного оптимального проектирования на основе вероятностных таблиц качества структуры многопереходных технологических процессов.

Практическая ценность и реализация результатов работы:

1. Построена база данных качества обработки, проведено сравнение типовых таблиц качества обработки и технологических допусков методов механической обработки цветных металлов и титановых сплавов и представлена структурированная информация для проектирования элементарных технологических маршрутов.

2. Разработаны и обоснованы с позиций технологического обеспечения качества принципы выбора типовых и проектирования новых технологических процессов при обработке цветных металлов и титановых сплавов на производственных объектах во Вьетнаме для обеспечения заданных требований

точности, качества обработки деталей и экономической эффективности.

Методология и методы исследования. Использованы основные положения технологии машиностроения, теории резания. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с общепринятыми методами математической статистики и теорией планирования экспериментов с использованием аттестованных и метрологически обеспеченных средств измерения точности размеров, шероховатости поверхностей деталей.

Объект исследования – многопереходная механическая обработка изделий машиностроения.

Предмет исследования – процесс формирования качества поверхности и точности изделия из цветных металлов и титановых сплавов, полученного многопереходной механической обработкой.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика формализованного проектирования вариантов последовательности обработки поверхностей заданного качества из сплавов цветных металлов (титановые и алюмомагниевые сплавы), с учетом теплофизических свойств конструкционных материалов.
2. Вероятностные таблицы качества обработки изделий машиностроения из цветных металлов и титановых сплавов, учитывающие технологические возможности производства в республике Вьетнам.

Достоверность результатов обеспечена использованием проверенных методов исследования, репрезентативных выборок экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов производственного эксперимента, согласованности построенной математической модели с реальными данными эксперимента, проведенного с использованием современных лицензионных средств измерений и программного обеспечения.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на всероссийских и международных научно-технических конференциях: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment

"Mechanical Engineering and Materials Science" (ICMTMTE 2020) (Sevastopol, Russia, September 7-11, 2020), III научный конкурс "Технические направления среди иностранных студентов вузов России" (г. Волгоград, 2022 г.), ежегодные научные конференции сотрудников ВолгГТУ (г. Волгоград, 2021, 2022, 2023, 2024 г.г.).

Публикации. Результаты диссертационного исследования отражены в 5 публикациях, из них 3 работы входят в перечень журналов, рекомендованных ВАК, и 2 статьи в изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 121 наименования. Работа содержит 130 страниц машинописного текста, включая 28 рисунков и 67 таблиц; два приложения.

Благодарности. Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры ТМС ВолгГТУ – профессору Сидякину Ю. И. и доценту Крайневу Д. В. за консультации в организации экспериментов и при проведении численных расчетов.

ГЛАВА1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Качество продукции является важным критерием, на который следует обращать особое внимание при разработке технологии изготовления продукции.

Качество продукции в машиностроении включает в себя качество изготовления деталей машин и качество сборки из них готовых изделий. Для деталей машин качество их изготовления оценивается по следующим основным параметрам:

- Размерная точность поверхности;
- Точность формы поверхности;
- Точность относительного положения между поверхностями;
- Качество поверхности.

1.1. Оценка качества поверхности, достижимого различными технологическими методами

1.1.1. Геометрические свойства обработанного поверхностного слоя

Геометрические свойства отделки поверхности оценивают по микроскопической волнистости и поверхностной волне.

а. Шероховатость поверхности (микрогеометрия)

Шероховатость поверхности является одной из основных геометрических характеристик качества поверхности деталей и оказывает влияние на эксплуатационные показатели. Термины и определения основных понятий по шероховатости поверхности установлены в ГОСТ 25142-82 (СТ СЭВ 1126-78) «Шероховатость поверхности. Термины и определения». В практике образивной подготовки поверхностей и контроля шероховатости пока еще часто используются прежние параметры шероховатости *Ra*, *Rz*, *Rmax* по стандарту ИСО 468, разработанному ранее, в основном для применения в машиностроении.

По ГОСТ 2789 – 73 (СТ СЭВ 638-77) установлено шесть основных параметров шероховатости поверхности: *Ra, Rz, Rmax, Sm, S и* t_p. Ранее проведенными исследованиями [55, 69, 75] установлено, что наиболее часто на рабочих чертежах изделий общего машиностроения нормируются параметры *Ra* и *Rz* – в зависимости от, т. наз., класса шероховатости.

Эти параметры требуют серьезного изучения, т. к. необходимо знать, когда их надо применять: при каких условиях, при каких видах обработки, при использовании каких материалов, какого оборудования и инструментов.

Оценка по опорной длине профиля не дает достаточно полного представления об опор. ной площади, так как шероховатосгь поверхности в поперечном и продольном направлениях различна и не связана постоянным соотношением. Поэтому для оценки несущих площадей нужна топография поверхности [55].

Эти параметры требуют серьезного изучения, т. к. необходимо знать, когда их надо применять: при каких условиях, при каких видах обработки, при использовании каких материалов, какого оборудования и инструментов.

Требования к шероховатости поверхности не включают требований к дефектам поверхности, поэтому при контроле шероховатости поверхности влияние дефектов должно быть исключено. В некоторых случаях допускается устанавливать требования к шероховатости отдельных участков одной поверхности, которые могут быть различными.

ГОСТ 2789-73 (СТ СЭВ 638-77) разработан для обеспечения повышенных требований к качеству изделий путем полного учета свойств шероховатости поверхности и прогрессивных методов их нормирования. Он устанавливает требования к шероховатости поверхности независимо от способа ее получения или обработки. Это дает возможность применять требования стандарта к поверхностям, обработанным резанием и другими методами, такие как плоское фрезерование, шлифование, строгание и т. д.

Технологическое обеспечение шероховатости поверхности базируется в основном на зкспериментальном изучении зависимостей между методом окончательной обработки и параметрами шероховатости (табл. 1.1) [55].

Таблица 1.1. Шероховатость поверхности при различных методах обработки

Обработки		Шероховатость поверхности Ra, мкм			
		Ra, мкм	*Sm*, мкм	*S*, мкм	t_{20}, %
Калибрование		0,1 – 1,6	0,025 – 1	0,025 – 1	10 – 70
Плоские поверхности					
Строгание:	черновое	6,3 – 50	0,2 – 1,6	0,2 – 1,6	10 – 15
	чистовое	1 – 6,3	0,08 – 0,25	0,063 – 0,25	10 – 15
	тонкое	0,32 – 1,6	0,025 – 0,125	0,0125 – 0,1	10 – 15
Цилиндрическое фрезерование:	черновое	3,2 – 12,5	1,25 – 5	1,25 – 5	10
	чистовое	0,8 – 3,2	0,5 – 2	0,5 – 2	10
	тонкое	0,2 – 1	0,16 – 0,63	0,1 – 0,63	10 – 15
Торцовое фрезерование:	черновое	3,2 – 12,5	0,16 – 0,4	0,16 – 0,4	10 – 15
	чистовое	1 – 4	0,08 – 0,2	0,063 – 0,8	10 – 15
	тонкое	0,32 – 1,25	0,025 – 0,1	0,016 – 0,08	10 – 15
Торцовое точение:	черновое	15 – 50	0 2 – 1,25	0,20 – 1,25	10 – 15
	чистовое	1,6 – 6,3	0,08 – 0,25	0,063 – 0,25	10 – 15
	тонкое	0,32 – 1,6	0,025 – 0,125	0,0125 – 0,1	10 – 15
Протягивание:	черновое	1 – 3,2	0,16 – 2	0,16 – 2	10 – 15
	чистовое	0,32 – 1,25	0,0,5 – 0,5	0,032 – 0,5	10 – 15
Шлифование плоское:	предварительное	1,6 – 4	0,1 – 0,32	0,063 – 0,25	10
	чистовое	0,32 – 1,6	0,025 – 0,125	0,0125 – 0,08	10
	тонкое	0,08 – 0,32	0,01 – 0,032	0,005 – 0,025	10

б. Волнистость поверхности

Волнистость поверхности - совокупности периодически чередующихся неровностей, шаг которых превышает базовую длину для измерения шероховатости. Волнистость занимает промежуточное положение между шероховатостью и погрешностью формы поверхности. Для шероховатости характерно отношение шага неровности к их высоте менее 50, для волнистости - 50...1000 для погрешностей формы - свыше 1000 [55, 69, 75].

Хотя конкретных стандартов для формы поверхностного сигнала не существует, для оценки его параметров были разработаны рекомендации RS 3951-73. В качестве характеристических параметров волнистости используются максимальная высота волнистости *Wmax*, средняя высота волнистости по десяти точкам *Wz*, рассчитываемая аналогично параметрам шероховатости поверхности *Rmax* и *Rz*, и среднее волнистости *Sw*, определяемое как среднее арифметическое расстояние пяти значений. между волнами на пяти отдельных участках волновода идентичны (аналогично шагу *Sm* для шероховатости) (рис. 1.1).

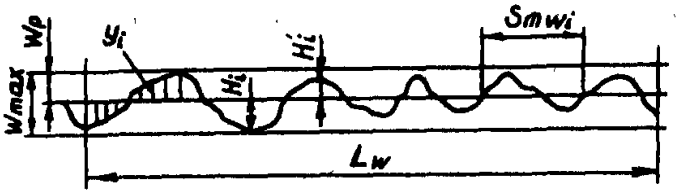


Рис. 1.1 – Волнограмма поверхности [62]

Однако в некоторых случаях оценки сигналов только по заданным параметрам недостаточно. Более полную параметрическую оценку волнистости производят по тем же параметрам, что и шероховатость: высоте *Wmax*, *Wa*, *Wz*, *Wp*, шагу *Sw*, форме нерегулярных волн r_w, их направлению, размеру базовой длины участка t_w, а при этом различают продольную и поперечную рябь на поверхности детали [29, 49, 50, 62, 63]. Применение столь тщательных методов оценки обусловлено возможным влиянием волнистости не только на качество обрабатываемой поверхности, но и на ее чистоту, точнее на шероховатость на разных уровнях.

Образование ряби на поверхности зависит от многих факторов и далеко не так полно изучено, как образование микроскопических шероховатостей. Этот параметр геометрии поверхности не всегда поддается контролю на практике. Несомненно, роль длины волны как геометрического параметра, характеризующего качество поверхности, имеет большое значение и недостаток знаний в этой области будет определять приоритеты исследований. Необходимость дальнейших исследований в этой области обусловлена также тенденцией современного машиностроения к повышению качества продукции за счет улучшения эксплуатационных характеристик деталей машин.

Как известно, все группы геометрии поверхностей деталей имеют ряд параметров, определяющих их основные критерии и классификацию [62]. Несомненно, каждый параметр геометрической характеристики может влиять или не влиять на определенные рабочие характеристики. Например, значение параметра *Wmax* - наибольшая высота волны - явно влияет на износостойкость, контактную жесткость, плотность (плотность) соединения и не влияет на антивибрационную способность и прочность соединения при его нарушении, в зависимости от других параметров (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей машин с геометрическими характеристиками качества поверхностей [55]

Эксплуатационные свойства	Геометрические характеристики поверхности										
	Волнистость			Шероховатость							
	W_a	W_{max}	Sw	R_a	R_z	R_{max}	S_m	S	t_p	r	r'
Контактная жесткость	+	+	+	+	+	+	+	0	+*	+*	0
Износостойкость	+	+	+	+	+	+	+	0	+*	+*	0
Трение	+*	+	+*	+*	+	+	+*	+	+*	+*	+
Усталостная прочность	0	+*	+	+	+	+*	+	0	0	0	+*
Виброустойчивость	+	0	+	+	+	+	+*	0	+*	+*	0
Коррозионная стойкость	+*	+	+	+	+	+	+*	+	+	0	+
Плотность (герметичность) соединений	+*	+	+	+*	+	+	+	+	+*	0	0
Прочность соединения с натягом	+	0	+	+	+	0	+	0	+*	+*	0
Прочность сцеплений покрытий	+	+	+	+	+*	+	+*	0	+	+	+
Обтекаемость газами и жидкостями	+	+	+	+	+	+	+	+*	+*	+	+*

+* – основное влияние; + – оказывает влияние; 0 – не оказывает

1.1.2. Механические свойства обработанной поверхности

Механические и физические свойства поверхностного слоя детали машины выражаются твердостью, изменением решетчатой структуры поверхностного слоя, величиной и знаком напряжения в поверхностном слое, глубиной слоя поверхностного упрочнения.

а. Явление упрочнения поверхностного слоя

В процессе обработки под действием силы резания кристаллическая решетка поверхностного слоя металла смещается и возникает пластическая деформация в области до и после режущей кромки. Металлическая стружка образуется путем пластической деформации металлических частиц в зоне скольжения. Между металлическими кристаллами возникает напряжение. Объем увеличивается, а плотность металла уменьшается при одном и том же разрезе. Улучшаются предел прочности, твердость, хрупкость поверхностного слоя; напротив, прочность поверхностного слоя снижается. Изменяются и многие другие свойства поверхностного слоя. Совокупный результат состоит в том, что поверхностный слой металла, упрочняется и имеет высокую микротвердость. Микроскопическая

твердость является важным физическим свойством поверхностного слоя.

Степень упрочнения и глубина поверхностного упрочняющего слоя зависят от действия силы сдвига. Повышенная сила сдвига вызывает увеличение пластической деформации материала, тем самым увеличивая степень упрочнения и глубину поверхностного упрочняющего слоя. Тепло, выделяющееся в зоне резания, ограничивает затвердевание поверхности. Таким образом, степень упрочнения поверхностного слоя зависит от соотношения двух факторов: силы сдвига и тепла, выделяющегося в зоне сдвига.

б. Остаточные напряжения в поверхностном слое

При механической обработке в поверхностном слое детали возникают остаточные напряжения. Величина, знак и глубина распределения напряжений в поверхностном слое зависят от конкретных условий обработки. К основным причинам появления напряжений в поверхностном слое деталей машин можно отнести следующие:

– при резании металла возникает силовое поле, вызывающее неравномерную пластическую деформацию в каждом участке поверхностного слоя. Когда оно исчезает, пластическая деформация вызывает остаточное напряжение в поверхностном слое.

– возникающая в результате пластическая деформация упрочняет поверхностный слой материала, увеличивая удельный объем внешнего тонкого металлического слоя. Внутренний металлический слой не подвергается пластической деформации, поэтому сохраняет нормальный объем. Тонкий внешний металлический слой вызывает сжимающее напряжение, поэтому баланс внутреннего металлического слоя вызывает растягивающее напряжение.

– из-за тепла, выделяемого в зоне резания, возникает локальный эффект нагрева тонких поверхностных слоев, что снижает эластичность материала. Затем поверхностный слой быстро остывает, сжимается и создает остаточное растягивающее напряжение для балансировки внутреннего поверхностного слоя металла, создающего сжимающие напряжения.

– в процессе резания в металле происходит фазовый переход, и тепло,

выделяемое в зоне резания, изменяет структуру материала, что приводит к изменению объема металла.

1.2. Факторы, влияющие на качество поверхности деталей машин

Согласно [69, 70], состояние и свойства поверхностного слоя деталей машин в процессе механической обработки определяются многими технологическими факторами.

Шероховатость обработанной поверхности, наклеп и остаточные напряжения в поверхностном слое оказывают существенное влияние на её эксплуатационные свойства: износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность, стабильность характера посадок, герметичность соединений. Важнейшими эксплуатационными характеристиками деталей машин являются износостойкость и усталостная прочность.

Износостойкость определяет сопротивление поверхности детали износу в процессе эксплуатации. При износе меняются размеры и геометрическая форма поверхностей, что приводит к изменению характера сопряжений деталей, потере точности взаимного расположения узлов и нарушениям в работе машины.

Усталостная (циклическая) прочность характеризует способность детали противостоять многократно повторяющимся знакопеременным нагрузкам в процессе эксплуатации. Недостаточная усталостная прочность приводит к быстрой поломке деталей, вызывая отказ в работе деталей.

Шероховатость поверхности уменьшает площадь фактического соприкасания двух сопрягаемых поверхностей, поэтому в начальный период работы соединения возникают значительные удельные давления, которые ухудшают условия смазки и, как следствие, вызывают более интенсивный износ поверхностей.

Так как микронеровности поверхности являются местом концентрации напряжений, то более шероховатые поверхности имеют меньшую усталостную прочность в условиях циклической нагрузки. Особенно сильно шероховатость поверхности влияет на придел выносливости детали в местах концентрации напряжений. Коэффициент концентрации напряжений для поверхностей, обработанных резанием, составляет 1,5…2,5. Установлено [69], что прочность

стальных деталей, обработанных резанием, по сравнению с полированными деталями в условиях знакопеременной нагрузки составляет 40…50%.

Грубо обработанные поверхности более подвержены коррозии, особенно в атмосферных условиях, так как коррозия наиболее интенсивно протекает во впадинах микронеровностей и у вершин мелких трещин [69].

Влияние шероховатости поверхности *Rz* на скорость γ изнашивания детали на рис. 1.2.

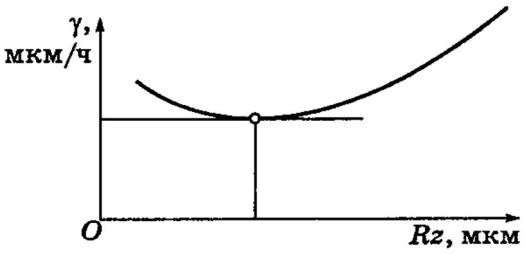


Рис. 1.2 – Влияния шероховатости поверхности на скорость изнашивания [69]

Из рис. 1.2 видно, что снижать шероховатость поверхности в каждом конкретном случаев следует до определенного предела. Слишком большое снижение шероховатости приводит к ухудшению условий смазки, так как на очень чистых поверхностях смазочный слой удерживается плохо. Поэтому поверхность, покрытая пористым хромом, удерживает смазочный слой лучше, чем на поверхность с гладким хромовым покрытием.

От шероховатости зависит и стабильность неподвижных посадок. При запрессовке детали наблюдается сглаживание микронеровностей, приводящее к уменьшению фактического натяга. В связи с этим уменьшение прочности соединения деталей обнаруживается при более шероховатых поверхностях [69].

Шероховатость и волнистость поверхности сильно влияют на контактную жёсткость стыков сопрягаемых деталей. Уменьшая шероховатость и волнистость путем тонкого шлифования, шабрения или тонкой притирки, удается увеличить площадь несущей поверхности детали на 80%...90% и тем самым повысить контактную жёсткость.

Состояние поверхностного слоя детали отражается на её эксплуатационных свойствах. Установлено, что создание в поверхностном слое наклепа и остаточных

напряжений сжатия в большинстве случаев повышает усталостную прочность и износостойкость, но одновременно в 1,5-2 раза уменьшает коррозионную стойкость деталей. Последнее обстоятельство объясняется тем, что первичная защитная пленка на сильно деформированном металле легче разрушается под влиянием внутренних напряжений, что ускоряет процесс коррозии.

В зависимости от характера наклепа и шероховатости поверхности детали предел выносливости у наклепанных образцов благодаря действию сжимающих напряжений повышается на 30…80 %, а износостойкость металла – в 2-3 раза. Под действием растягивающих напряжений предел усталости для сталей повышенной твёрдости снижается на 30 % и одновременно уменьшается износостойкость детали [69].

На снижение качества поверхностного слоя значительное влияние оказывает его структурная неоднородность. Обезуглероженный поверхностный слой, образовавшийся в процессе ковки или штамповки, снижает предел выносливости детали. При изготовлении ответственных деталей этот слой следует удалить.

1.3. Точность обработки деталей машин

Качество изготовления продукции определяется совокупностью свойств процесса её изготовления, соответствием этого процесса и его результатов установленным требованиям. Основными производственными факторами являются качество оборудования и инструмента, физико-химические, механические и другие свойства исходных материалов и заготовок, совершенство разработанного технологического процесса и качество выполнения обработки и контроля.

В машиностроении показатели качества изделий весьма тесно связаны с точностью обработки деталей машин. Полученные при обработке размер, форма и расположение элементарных поверхностей определяют фактические зазоры и натяги в соединениях деталей машин, а следовательно, технические параметры продукции, влияющие на её качество.

В общем, точность обрабатываемой детали является наиболее сложным и дорогостоящим критерием для достижения как в процессе ее наладки, так и в

процессе изготовления.

На практике невозможно изготовить деталь машины, которая была бы абсолютно точной, то есть полностью соответствующей по геометрии, размерам, а также механическим свойствам, идеальным значениям. Поэтому значения отклонения используются для оценки точности обработки деталей машин - чем больше значение отклонения, тем ниже точность обработки.

Международными и национальными стандартами установлены следующие показатели точности [55, 75]:

Размерная точность - это точность прямых или угловых размеров. Точность размеров оценивается по отклонению фактического размера от требуемого идеального размера и выражается как допуск этого размера. По ГОСТ 25346-82 установлено 19 квалитетов от *IT*01 до *IT*17, где *IT* – международный допуск по системе ИСО. Точность размеров на чертежах проставляют условными обозначениями поля допуска (Ø50*K*6, Ø50*H*7) или предельными отклонениями в мм $(Ø50^{0,018}_{0,002})$, иногда указываются оба обозначения ($Ø50H7^{(+0,021)}$).

Точность взаимного расположения между двумя поверхностями - это фактически поворот на определенный угол одной поверхности относительно другой (используемой в качестве опорной поверхности), и точность поворота этой поверхности относительно другой поверхности наблюдается с другой стороны в двух координатных плоскостях, перпендикулярных друг другу. Таким образом, относительная точность позиционирования оценивается по требуемой угловой ошибке между положением этой поверхности и другой поверхности в двух перпендикулярных координатных плоскостях. Точность относительного положения обычно записывается отдельной спецификацией на проектных чертежах.

Геометрическая точность деталей машины – это их наилучшее соответствие ее идеальной геометрии. Например, для цилиндрической детали геометрическая точность оценивается по погрешности ее геометрической формы, которая представляет собой овальный конус, множественные ребра и т. д. Когда

обрабатываемая поверхность представляет собой плоскость, точность геометрии есть погрешность ее плоскостности относительно идеальной плоскости.

1.4. Показатели качества и точности

Качество всего изделия [16, 25, 61, 63] определяется (рис. 1.3) совокупностью его технических характеристик, которые включают в себя геометрическую точность, микроскопические и механические свойства каждой обрабатываемой поверхности, а также точность взаимного расположения поверхностей заготовки.

Рис. 1.3 – Классификация показателей качества и точности обработки

Требования к качеству поверхности обеспечиваются выбором способа отделки, поверхности подложки, последовательности обработки и переделки подложки. Ошибки формы и положения (макрогеометрические) поверхностей в основном зависят от базовых планов, монтажа и крепления деталей, а также точности размеров, микромеханических и микромеханических свойств поверхности, определяемых методами формообразования и условиями их выполнения. (режим обработки, инструментальный материал марка, геометрия инструмента и т. д.). Качество и точность обработанной поверхности оцениваются по комплексу показателей, которые можно рассматривать как параметры технологического процесса, определяющего состояние поверхности изделия. Как

правило, качество обработки оценивается не менее чем по двум показателям: размерной точности и форме микроструктуры поверхности. Размерная точность оценивается величиной точности или допуска, а форма микроструктуры поверхности может быть измерена сочетанием параметров высоты и шага. В большинстве справочных материалов рассматриваются только два критерия качества обработанной поверхности: высота микрочастиц и размерные или числовые допуски. Каждый метод обработки характеризуется рядом показателей качества и достижимой точностью. Нижние пределы диапазона значений этих показателей определяются экономическими соображениями, а верхние - технологическими возможностями метода. Сводный массив значений показателей качества, которые могут быть получены при обработке, приведен в справочных материалах и является информационной основой проектирования технологии.

В качестве допущения примем, что каждый из показателей процесса обработки является случайной величиной, определяемой совокупностью факторов, влияющих на процесс обработки [24, 48]:

1. наиболее вероятное значение (среднее значение) - это значение, которое наиболее часто встречается в распределении вероятностей. Это значение можно использовать в качестве ожидаемого или достижимого эталонного значения индекса обработки;

2. диапазон значений (переменный диапазон) - это разница между максимально достижимыми значениями индекса обработки, определяемая по эталону;

3. диапазон значений индекса обработки можно принять равным ширине поля рассеяния с вероятностью не меньшей, чем доверительная вероятность, установленная принятым законом распределения;

4. в зависимости от серийности производства выбирается диапазон изменения случайной величины. В большинстве случаев [48] для описания распределения вероятностей в этом диапазоне используется стандартный закон Гаусса. При этом разработаны рекомендации [36, 46, 94, 95], позволяющие заранее определить закономерность распределения в зависимости от условий производства и точности

обрабатываемого продукта:

- в условиях массового производства или крупного производства распределение вероятностей асимптотически приближается к нормальному закону Гаусса [94, 95]. Также общепринято, что нормальное распределение описывает разброс размеров внутри партии изделий со средней точностью (9-12 квалитет) [36] или при отсутствии каких-либо преобладающих факторов, влияющих на характер обработки [46];

- в условиях мелкого или среднего производства распределение вероятностей приближается к закону треугольника Симпсона [94, 95]. Это распределение также характерно для изделий с точностью 6-8 квалитет [36]. Закон Симпсона встречается и при описании точности размеров обрабатываемой поверхности при высоком износе инструмента [46];

- в условиях мелкотоварного и индивидуального производства закон распределения фактически совпадает с эквивалентным законом распределения [94, 95]. Аналогичный результат наблюдается при обработке высокоточных изделий (4-5 квалитет) [36] и при учете влияния термического деформирования технологической системы на точность выполняемых размеров [46];

- при обеспечении допусков положения (поврежденности, параллельности, перпендикулярности и т. д.) распределение значений стремится к эксцентрическому распределению (закону Релея) [36];

Следует отметить, что сведения о качестве и точности обработки, приведенные в справочной литературе, являются экспертными знаниями [9]. Это означает, что они определяют технологическую возможность методов обработки в идеальных условиях, которые не всегда встречаются в реальных производственных условиях. В реальных условиях необходимо доводить все параметры обработки в соответствии с технологическими возможностями конкретного предприятия.

Ряд специалистов, в частности, А. Н. Плотников и его ученики [44, 73], выдвинули гипотезу о том, что однородные эталонные значения, полученные из различных источников информации, могут значительно различаться. Причина различия однородных эталонных значений может быть связана с отраслевой

спецификой эталонов и надежностью статистических методов, используемых при их формировании. В статьях [73, 86] исследована надежность справочной информации, используемой при стандартизации методов обработки. Гипотеза неоднозначности [86] подтверждается результатами анализа таблиц точности обработки из наиболее часто используемых источников [2, 14, 40, 71] и современных монографических публикаций [63, 96]. Анализируя нормативную и справочную информацию, мы делаем следующие предположения:

качество продукции, как совокупность свойств, характеризующих соответствие результата обработки требованиям к продукции, определяется множеством факторов, в основном технологических. В дальнейшем будем рассматривать качество как технологическую характеристику, отражающую возможности каждого метода обработки;

если результат процесса оценивается однородной случайной величиной, то это означает, что колебания значений этой величины достаточно малы по отношению к величине реальных значений. В этом случае процесс можно считать достаточно устойчивым к внешним воздействиям и стабильным с точки зрения контролируемых параметров.

Надежность способа обработки и достоверность справочных данных являются важными факторами качества обработки данных. Если способ обработки надежный, а справочные данные достоверные, то результаты обработки будут более точными и воспроизводимыми.

1.5. Значение шероховатости поверхности и точность по справочным данным

Проектирование технологического маршрута обработки начинается с определения методов обработки детали и последовательности её обработки.

Разработка маршрута обработки опирается на использование таблиц точности обработки. Отсюда следует, что использование справочных данных влияет на точность и качество обрабатываемой поверхности заготовки, так как мы доверяем полноте справочных данных. Для выявления расхождения показателей точности и качества поверхности детали, был проведён анализ нормативно-справочной

литературы.

С целью обеспечения репрезентативности данных мы рассматриваем только те способы обработки (табл. 1.3), справочные данные для которых приведены в двух и более первоисточниках [2, 14, 26 , 57, 63, 71, 96]

Таблица 1.3. Наличие справочной информации о методах обработки

Метод обработки		Количество ссылок	Параметр шероховатость поверхности Ra, мкм	Количество ссылок	Квалитет точности
Строгание:	черновое	6	40,0…4,0	6	14…11
	чистовое	6	6,3…1,0	6	13…9
	тонкое	5	1.60…0,32	5	10…6
Фрезерование цилиндрической фрезой:	черновое	6	50,0…3,2	6	16…10
	чистовое	6	6,30…0,80	6	14…9
	тонкое	6	1,60…0,20	6	10…6
Фрезерование торцовой фрезой:	грубое			1	16…14
	черновое	4	16,0…4,0	6	14…12
	чистовое	4	6,30…1,0	4	14…9
	тонкое	4	1,60…0,32	4	10…6
Фрезерование концевой фрезой:	черновое	1	25,0…6,3	1	14…12
	чистовое	1	6,3…1,6	1	9…8
Точение при поперечной подаче:	обдирочное	3	100,0…5,0	4	17…12
	получистовое	4	25,0…1,6	2	15…11
	однократное	2	25,0…1,0	1	13…11
	чистовое	6	6,3…0,4	5	13…6
	тонкое	5	1,6…0,2	3	11…5
Протягивание:	получистовое	3	12,5…0,8	3	10…6
	чистовое	6	6,3…0,2	5	9…5
	отделочное	3	4,0…0,16	2	7…5
Шлифование плоское:	получистовое	4	6,3…0,4	4	11…8
	чистовое	6	3,2…0,2	6	10…6
	тонкое	6	1,6…0,04	6	9…5

В табл. 1.3 приведены нормативно-справочные данные из справочников.

Данные для статистического анализа были взяты из нормативно-справочной литературы [2, 14, 26 , 57, 63, 71, 96].

Из приведённых выше справочников видно, что многие данные не совпадают или вовсе отсутствуют.

Построение обобщённой таблицы точности можно выполнить несколькими способами, например, для выбранного метода обработки по данным разных справочников объединить полученные значения параметра шероховатости *Ra* в множества или построить и определить их точку контакта.

Таблица 1.4. Данные из справочной литературы

Вид обработки		Балабанов [2]						Косилова и др. [57]					
		Шероховатость поверхности Ra, мкм				Точность размеров, IT		Шероховатость поверхности Ra, мкм				Точность размеров, IT	
		средняя	высокая	низкая	миним.	низкая	высокая	средняя	высокая	низкая	миним.	низкая	высокая
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Строгание:	черновое	12,50	25	12,5		14	12						
	чистовое	3,20	6,3	3,2		13	12						
	тонкое	1,60	1,6	1,6	0,8	10	8						
Фрезерование цилиндрической фрезой:	грубое												
	черновое	40,00	50	25		14	12						
	чистовое	3,20	6,3	3,2		11	11						
	тонкое	1,25	1,6	0,8		9	8						
Фрезерование торцовой фрезой:	грубое												
	черновое	10,00	12,5	6,3		14	12						
	чистовое	3,20	6,3	3,2	1,6	11	11						
	тонкое	1,60	1,6	1,6	0,8	9	8						
Фрезерование концевой фрезой:	черновое	12,50	25	6,3		14	12						
	чистовое	3,20	6,3	1,6		11	11						
Точение при поперечной подаче:	обдирочное	40,00	100	25		17	16	40,00	50,00	6,30		14	12
	получистовое	10,00	12,5	6,3		15	14	10,00	25,00	1,60		13	11
	однократное							12,50	25,00	1,60		13	11
	чистовое	3,20	3,2	3,2		13	11	3,20	6,30	0,40		10	8
	тонкое	1,60	1,6	1,6		11	8	1,60	1,60	0,20		9	6
Протягивание:	получистовое	6,30	6,3	6,3		9	8	6,30	12,50	0,80		11	10
	чистовое	0,80	3,2	0,8		8	7	0,80	6,30	0,20		9	6
	отделочное	0,40	0,4	0,4	0,2	7	7						
Шлифование плоское:	получистовое	3,20	6,3	3,2		11	8	3,20	6,30	0,40		9	8
	чистовое	0,80	1,6	0,8		8	6	0,80	3,20	0,20		7	6
	тонкое	0,20	0,4	0,2	0,04	7	6	0,20	1,60	0,10		6	5

Продолжение табл. 1.4

Вид обработки		Федотиков [71]						Данилевский [14]					
		Шероховатость поверхности Ra, мкм				Точность размеров, IT		Шероховатость поверхности Ra, мкм				Точность размеров, IT	
		средняя	высокая	низкая	миним.	низкая	высокая	средняя	высокая	низкая	миним.	низкая	высокая
1		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Строгание:	черновое	10,00	10,00	10,00		14	12		10,00	10,00		14	12
	чистовое	3,20	5,00	1,25		12	11		5,00	1,25		12	11
	тонкое	1,25	1,25	0,63		10	8		1,25	0,63		9	7
Фрезерование цилиндрической фрезой:	грубое					16	14						
	черновое	10,00	10,00	10,00		14	12		10,00	10,00		14	12
	чистовое	3,20	5,00	2,50		14	11		5,00	2,50		14	11
	тонкое	1,25	1,25	1,25		10	8		1,25	1,25		9	7
Фрезерование торцовой фрезой:	грубое					16	14						
	черновое	10,00	10,00	10,00		14	12		10,00	10,00		14	12
	чистовое	3,20	5,00	2,50		14	11		5,00	1,25		14	11
	тонкое	1,25	1,25	1,25		10	8		1,25	0,63		9	7
Фрезерование концевой презой:	черновое												
	чистовое												
Точение при поперечной подаче:	обдирочное					12	12						
	получистовое	6,30	10,00	5,00					10,00	5,00			
	однократное								1,00	5,00			
	чистовое	2,50	2,50	1,25		11	11		2,50	1,25			
	тонкое	0,63	0,63	0,63	0,32				0,63	0,32			
Протягивание:	получистовое												
	чистовое	1,25	2,50	0,63					2,50	0,63		9	6
	отделочное	0,32	0,32	0,16					0,32	0,16		6	5
Шлифование плоское:	получистовое												
	чистовое	1,25	2,50	0,63		8	6		2,50	0,63		9	6
	тонкое	0,32	0,32	0,32	0,16	7	6		0,32	0,16		6	6

Продолжение табл. 1.4

Вид обработки		Дальский, Суслов [63]						Шамин [96]					
		Шероховатость поверхности Ra, мкм				Точность размеров, IT		Шероховатость поверхности Ra, мкм				Точность размеров, IT	
		средняя	высокая	низкая	миним.	низкая	высокая	средняя	высокая	низкая	миним.	низкая	высокая
1		26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Строгание:	черновое		40,00	6,30		14	12		20,00	10,00		13	11
	чистовое		6,30	1,00		11	9		5,00	2,50		11	9
	тонкое		1,60	0,32		8	6						
Фрезерование цилиндрической фрезой:	грубое												
	черновое		10,00	3,20		16	12		20,00	10,00		13	12
	чистовое		3,20	0,80		11	9		2,50	1,25		11	11
	тонкое		1,60	0,20		8	6		1,25	0,32		9	8
Фрезерование торцовой фрезой:	грубая												
	черновое												
	чистовое												
	тонкое												
Фрезерование концевой фрезой:	черновое												
	чистовое												
Точение при поперечной подаче:	обдирочное		32,00	6,30		13	12						
	получистовое												
	однократное												
	чистовое		6,30	1,60		11	9						
	тонкое		1,60	0,32		8	6						
	чистовое		1,25	0,63		9	7		2,50	1,25		7	6
	тонкое		0,63	0,32		6	5						
Протягивание:	получистовое		3,20	1,60		8	6						
	чистовое		1,25	0,32		6	5						
	отделочное												
Шлифование плоское:	получистовое		6,30	1,60		9	8		2,50	1,25		11	10
	чистовое		1,60	0,32		7	6		0,63	0,20		10	9
	тонкое		0,32	0,08		6	5		0,16	0,08		9	8

Продолжение табл. 1.4

Вид обработки		Браун, Суслов [26]					
		Шероховатость поверхности Ra, мкм				Точность размеров, IT	
		средняя	высокая	низкая	миним.	низкая	высокая
1		38	39	40	41	42	43
Торцовое фрезерование:	черновое		16,00		4,00	14	12
	чистовое		4,00		1,00	11	9
	тонкое		1,25		0,32	8	6
Цилиндрическое фрезерование:	черновое		10,00		3,20	14	12
	чистовое		3,20		0,80	11	9
	тонкое		1,60		0,20	8	6
Строгание:	черновое		40,00		6,40	14	12
	чистовое		6,30		1,00	11	9
	тонкое		1,60		0,32	8	6
Торцовое точение:	черновое		32,00		6,40	13	12
	чистовое		6,40		1,60	11	9
	тонкое		1,60		0,32	8	6
Шлифование:	обдирочное		4,00		1,60	9	8
	чистовое		1,60		0,32	7	6
	тонкое		0,32		0,08	6	5
Протягивание:	черновое		3,20		1,00	8	7
	чистовое		1,25		0,32	6	5

1.6. Точность обработки и качество обрабатываемой поверхности изделий в исследованиях последних лет

В настоящее время постоянно возрастающие требования к точности обработки, качеству обрабатываемой поверхности и ресурсу изготавливаемой детали привели к необходимости исследования всех параметров качества поверхности. Разработка новых технологических рекомендаций на основе этих исследований позволит получить оптимальный комплекс поверхностных свойств изделия при механической обработке детали.

Известно, что на ресурс изготавливаемой детали влияют шероховатость, упрочнение обрабатываемой поверхности, а также остаточные напряжения, обусловленные процессом механической обработки, которые могут значительно исказить форму детали в готовых деталях и в исключительных случаях приводить к непоправимым дефектам. Следовательно, необходимо изучить параметров качества обрабатываемой поверхности, разработать новые методы исследования и решить известные задачи новыми методами.

Показывает [28], что улучшение качества поверхности титановых деталей также необходимо для повышения производительности процесса фрезерования. Автором применена адаптивная самообучающаяся технологическая система управления технологическим оборудованием, включающая математическую модель, связывающую параметры качества поверхностного слоя детали станка с режимом механической обработки. Рассматривается применение таких методов механической обработки, как вибрационная резка, низкочастотная осциллирующая резка, ультразвуковая осциллирующая резка и лазерное фрезерование.

В исследовательской работе Ю. Л. Чигиринского [87] были решены нижеперечисленные задачи.

Решена крупная научно-техническая проблема повышения эффективности и надежности индивидуального технологического проектирования в условиях многономенклатурных производств.

Сформулирована концепция проектирования маршрутных технологических процессов с учетом последовательного повышения качества и точности в

зависимости от текущего состояния изделия, сформированного на предшествующих этапах технологического процесса.

Разработана методология проектирования планов обработки поверхностей заданного качества и точности на базе вероятностных таблиц точности обработки.

Впервые предложена информационная структура таблиц точности обработки, содержащих значения собственно величин и оценки достоверности изменения технологических допусков в ходе многопереходной механической обработки.

Уточнена и дополнена методика статистического анализа результатов механической обработки в условиях реального производства с целью достоверного определения технологических возможностей конкретного машиностроительного предприятия.

Разработана методика формирования вероятностных таблиц точности обработки с учетом технологических возможности реального производства.

Введено и обосновано понятие надежности технологического проекта и разработана методика расчета величины вероятностного показателя надежности на стадии проектирования последовательности обработки поверхности заданного качества.

Созданы модели и алгоритмы и разработана методика формализованного проектирования индивидуальных маршрутных технологий на основе вероятностных таблиц точности обработки с использованием математических методов имитационного моделирования.

Разработана методика структурной оптимизации планов обработки по критерию надежности.

Уточнены нормативно-справочные данные, используемые в маршрутном технологическом проектировании.

Разработана база данных вероятностных таблиц точности обработки, содержащая дополненную, по сравнению с типовыми таблицами точности, информацию для формализованного проектирования маршрутных технологий.

Разработаны практические рекомендации и методические материалы для формализации и алгоритмизации задач маршрутного технологического

проектирования, что позволило формировать технологические маршруты в автоматизированном режиме.

Разработаны программы для ЭВМ, предназначенные для построения обобщенных и вероятностных таблиц точности, адаптированных под технологические возможности и технологические традиции конкретного механообрабатывающего производства и для оптимального проектирования индивидуальных маршрутных технологий механической обработки поверхностей заданного качества.

Результаты анализа точности обработки после моделирования фрезерования поверхности свободной формы (на основе обработки сплавов EN AW-7075) для различных стратегий обработки (уровень *Z*, радиальная, квадратная, круговая) представлены в работе [99]. Конкретное моделирование фрезерования было выполнено с использованием программного обеспечения CAD/CAM Esprit. Точность полученного припуска определяется как разница между теоретической поверхностью элемента заготовки (поверхностью, спроектированной в программе САПР) и обработанной поверхностью после имитации фрезерования. Разница между двумя поверхностями описывает значение шероховатости, которое является результатом отображения формы инструмента на обрабатываемой поверхности. Точность левого припуска напрямую указывает на качество поверхности после чистовой обработки. Описанная методика использования программ CAD/CAM позволяет улучшить временной расчет процесса обработки поверхности произвольной формы на 5-координатном фрезерном станке с ЧПУ без обработки детали на фрезерном станке с целью измерения точности обработки для выбранных стратегий и режимов резания.

В статье [110] представлен подход к повышению точности обработки с помощью высокоточных систем обработки за счет использования специальных процедур регулировки и дополнительных компенсаций деформации заготовки.

В работе [106] основное внимание уделяется решению контроля точности обработки проблемы, предлагается метод локализации информации для обработки крупногабаритных тонкостенных конструкций. Кроме того, алгоритм реперной

коррекции используется для компенсации ошибок деформации при обработке. Наконец, были проведены эксперименты, и результаты показали, что предложенный метод может повысить точность обработки.

В статье [112] рассматривается достижение точности обработки станков с ЧПУ за счет применения инновационных методов моделирования и проектирования систем обработки, приводов и машинных процессов. Топологический метод анализа предполагает визуализацию системы в виде матриц блок-графов с различной степенью детализации между верхним и нижним уровнями иерархии. Этот подход сочетает в себе преимущества теории графов и эффективность методов декомпозиции, обладает наглядностью, присущей как топологическим моделям, так и структурным матрицам, а также отказоустойчивостью линейной алгебры как части матричных исследований. Основное внимание в исследовании уделяется проектированию автоматизированных рабочих мест, систем, машин и агрегатов, которые могут быть разбиты на взаимосвязанные части и представлены в виде алгебраических, топологических и теоретико-множественных моделей. Каждая модель может быть преобразована в модель другого типа и, как следствие, интерпретирована как система линейных и нелинейных уравнений, решения которых определяют параметры системы. В данной работе анализируются динамические параметры машины 1716ПФ4 на этапах проектирования и эксплуатации. Исследовав влияние динамики системы на качество деталей, авторы разработали ряд практических рекомендаций, которые позволили значительно уменьшить амплитуду относительного движения, исключить некоторые резонансные зоны в диапазоне частот вращения шпинделя 0…6000 мин и улучшить точность обработки.

Согласно работе [104] метод WECMM использует вращающийся спиральный электрод для повышения точности обработки за счет увеличения частоты обновления электролита и достижения более высоких скоростей подачи электрода, что сокращает расстояние обработки. Моделирование электрического поля показывает, что плотность тока локализована во вращающемся спиральном электроде. Эксперименты подтвердили, что вращающийся спиральный электрод

уменьшает расстояние обработки с 94 до 19 мкм по сравнению с цилиндрическим электродом того же диаметра.

В исследовании [101] надежность точности обработки определялась как способность станка работать с определенной точностью обработки в заданных условиях в течение определенного периода времени и предлагался новый подход к надежному анализу точности обработки станков на основе быстрого моделирования цепи Маркова. Используя этот метод, можно определить семь различных режимов отказа станка. Анализ чувствительности надежности точности обработки выполняется на основе анализа вероятности отказа станка и основных геометрических погрешностей, оказывающих наибольшее влияние на надежность точности обработки. Наконец, в этом исследовании в качестве примера был выбран 4-осевой станок для экспериментальной проверки эффективности предложенного метода.

Работа [100] включает оптимизацию процессов EM (с использованием метода Тагучи) и EDM (путем выбора соответствующего электрода) для обработки сталей с высоким содержанием хрома, поддерживая высокий уровень брака материала (MRR) и чистоту поверхности на должном уровне.

В работе [118] представлены результаты анализа влияния ультразвукового точения (UAT) на шероховатость поверхности (по множеству параметров) для различных металлов и сплавов: от меди, алюминия и нержавеющей стали до никелевых и титановых сплавов. Исследовано влияние параметров обработки как для обычного точения, так и для UAT, чтобы обеспечить оптимальный диапазон для каждого материала и его связь с шероховатостью поверхности.

В работе [108] изучались эффекты изменения четырех параметров в процессе фрезерования, а именно: скорости резания, скорости подачи, радиальной глубины и осевой глубины. Влияние этих параметров на шероховатость поверхности анализируется по отдельности, а также рассматривается взаимодействие между некоторыми из них для фрезерной обработки закаленной стали (сталь 1.2738) с использованием метода оптимизации Тагучи. Для этого была построена ортогональная решетка L16, и для каждого параметра были определены два

различных уровня, соответствующих шестнадцати экспериментальным тестам. Из этих тестов было извлечено шестнадцать измерений шероховатости поверхности. Влияние каждого параметра на шероховатость поверхности затем было получено путем применения дисперсионного анализа (ANOVA) к экспериментальным данным. Следует отметить, что минимальная измеренная шероховатость составила 1,05 мкм. Это исследование также служит для определения вклада каждого параметра обработки и их взаимодействия в шероховатость поверхности. Результаты показывают, что радиальная глубина резания и взаимодействие между радиальной и осевой глубиной резания являются наиболее важными параметрами, так как их вклад в минимизацию шероховатости поверхности составляет около 30 % и 24 % соответственно.

В статье [27] рассмотрены три основных метода, позволяющие повысить устойчивость технологической системы, обеспечив требуемый уровень геометрической точности и качества обработанных поверхностей:

– минимизация колебаний за счёт оптимальных режимов обработки
– применение технологии высокоскоростной обработки (ВСО)
– управление процессом резания на основе отрицательной обратной связи

В работе [3] Использование системы управления и автоматического исправления ошибок положения режущей кромки инструмента позволяет повысить точность процесса обработки. Компенсация погрешностей настройки инструмента может выполняться путем ввода с пульта устройства ЧПУ коррекций радиуса, длины и положения инструмента. Разработаны системы контроля положения режущей кромки инструмента. С помощью функции измерения тактильного устройства, например, Touch Setter, осуществляют контакт режущей кромки инструмента с датчиком, установленным в станке. ЧПУ сравнивает установленное положение датчика и фактическую позицию контакта. На основе результатов сравнения ЧПУ автоматически вычисляет и устанавливает данные коррекции на конкретный инструмент. Для контроля траектории движения инструмента на некоторых станках используют лазерные измерительные системы.

В работе [41] рассматриваются вопросы точности обработки на станках с ЧПУ,

особенно требуемые значения отклонений формы в поперечных сечениях деталей типа корпусов машин. Показано, что использование вибросигнала дает возможность оценивать точность формы, а применение моделей на основе нечеткой логики и нейронных сетей позволяет получить взаимосвязь между параметрами вибросигнала и точностью формы в поперечном сечении. Применение указанного выше аппарата позволяет повысить точность формы на 20…30%.

В работе [68] авторы поделились самообучающейся технологической системой с АСНИ рабочих характеристик (контактная твердость, износостойкость, герметичность и др.) как единой системой автоматического управления рабочими характеристиками деталей машин, которая позволит:

– реализовать одноэтапную технологическую поддержку эксплуатационных характеристик деталей машин и их соединений,
– снизить влияние человеческого фактора на достижение конкретных показателей эффективности,
– повысить технологическую дисциплину;
– организовать единую компьютерную сеть,
– добавить базы данных режимов обработки разных материалов разными инструментами.

Проведенный анализ исследований в области технологического обеспечения требований качества при изготовлении изделий машиностроения позволил сформулировать проблему, решению которой посвящена настоящая работа, и, соответственно, цель и задачи нашего исследования.

1.7. Постановка цели и определение задач исследования

Проблема, выявленная в результате проведенного аналитического исследования, заключается в несоответствии рекомендаций нормативно-справочной литературы в отношении точности и качества обработки заготовок из конструкционных материалов с особыми свойствами, обеспечиваемой определенными технологическими методами и возможностей реальных машиностроительных производств. Основная причина заключается в следующем:

справочные данные в отношении точности – т. наз., «таблицы экономической точности» или «таблицы качества», – содержат укрупненные рекомендации для обеспечения точности при механической обработке заготовок из конструкционных углеродистых или низколегированных сталей. Модификация технологических допусков методов обработки для цветных металлов и сплавов, как правило, производится коррекцией технологических допусков в пределах 1..2 квалитетов (для точности размеров) и, соответственно, в пределах 1..2 классов шероховатости поверхности. Для относительно хрупких материалов (например, бронза или силумин) рекомендуется повышать изначально рекомендуемые значения, для вязких – занижать. Такой подход, как было показано работами волгоградских технологов, обычно, не соответствует технологическим возможностям конкретного производства и, соответственно, не может быть принят в качестве основы технологического маршрутного проектирования.

Исходя из сформулированной проблемы, определим основные положения настоящей работы.

Цель исследования: формирование информационного обеспечения формализованного построения технологических маршрутов многопереходной обработки плоских поверхностей при обработке титановые и алюмомагниевые сплавы.

Для достижения данной цели необходимо решить ряд задач:

1) исследовать особенности процесса формирования комплекса показателей качества поверхности при обработке плоских поверхностей;

2) применить методику расчета статистических данных и оценки вероятности обеспечения требуемого качества поверхности;

3) определить условия наиболее рационального маршрута изготовления в цепочке многопереходной механической обработки;

4) определить и уточнить методику оценки статистических и экспериментальных данных, характеризующих качество обработанной поверхности после механической обработки детали.

Объектом исследования является многопереходная механическая обработка

изделий машиностроения.

Предмет исследования – процесс формирования качества поверхности и точности изделия из цветных металлов и титановых сплавов, полученного многопереходной механической обработкой.

Научная новизна:

1. Показано и экспериментально обосновано, что при маршрутном технологическом проектировании необходимо учитывать технологические допуски методов механической обработки, фактически достижимые с учётом особенностей физико-механических и теплофизических свойств конструкционного материала;

2. Экспериментально доказано и теоретически обосновано с позиций теплофизики формирования качества поверхностного слоя существенное отличие технологических допусков различных этапов механической обработки изделий из сплавов ПТ-3В и алюминиевого сплавов АМг5 от данных, рекомендуемых нормативно-справочной литературой для конструкционных и низколегированных сталей;

Практическая ценность и реализация результатов работы:

1. Построена база данных показателей качества обработки, проведено сравнение типовых таблиц качества обработки и технологических допусков методов механической обработки цветных металлов и титановых сплавов и представлена структурированная информация для проектирования элементарных технологических маршрутов.

2. Разработаны и обоснованы с позиций технологического обеспечения качества принципы выбора типовых и проектирования новых технологических процессов при обработке цветных металлов и титановых сплавов на производственных объектах во Вьетнаме для обеспечения заданных требований точности, качества обработки деталей и экономической эффективности.

Методология и методы исследования:

Использованы основные положения технологии машиностроения, теории резания. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с

общепринятыми методами математической статистики и теорией планирования экспериментов с использованием аттестованных средств измерения точности размеров, шероховатости поверхностей деталей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика формализованного проектирования вариантов последовательности обработки поверхностей заданного качества из сплавов цветных металлов (титановые и алюмомагниевые сплавы), с учетом теплофизических свойств конструкционных материалов.

2. Вероятностные таблицы качества обработки изделий машиностроения из цветных металлов и титановых сплавов, учитывающие технологические возможности производства в республике Вьетнам.

Достоверность результатов обеспечена использованием проверенных методов исследования, репрезентативных выборок экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов производственного эксперимента, согласованности построенной математической модели с реальными данными эксперимента, проведенного с использованием современных лицензионных средств измерений и программного обеспечения.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Оборудование, применяемое для исследования процесса многогостадийной обработки

2.1.1. Фрезерный станок

Метод многопереходной контурного фрезерования выполнен на фрезерном станке с ЧПУ Mazak VCN-530CL (рис. 2.1) на кафедре «Технология машиностроения» ВолгГТУ.

Рисунок 2.1 – фрезерный станок с ЧПУ Mazak модели VCN-530CL.

Основные характеристики фрезерного станка с ЧПУ Mazak модели CVN - 530CL приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Технические характеристики станков Mazak VCN-530CL

Модель	VCN530CL
Рабочий диапазон	
Размер стола, мм	1300x550
Ось вращения	360^0
Длина заготовки, мм, макс.	1050
Ширина заготовки, мм, макс.	530
высота заготовки мм, макс.	510
Перемещение	
Количество координат станка (число осей)	3
Кол-во одновременно управляемых координат станка (осей)	3
Количество фрезерных шпинделей, шт.	1
По оси X, мм	1050
По оси Y, мм	530
По оси Z, мм	510
Расстояние от торца шпинделя до стола, мм	150~660
Максимальная нагрузка на стол, кг	1200

Продолжение табл. 2.1

Скорость подачи по осям	
По оси X, м/мин	42
По оси Y, м/мин	42
По оси Z, м/мин	42
Точность позиционирования	
По осям X, мкм	5
По осям Y, мкм	5
По осям Z, мкм	5
Повторяемость (точности) по линейным осям, мкм	4
Шпиндель	
Конус шпинделя	40
Обороты шпинделя об/мин., макс.	40-12000
Мощность шпинделя В ПОСТОЯННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ (S1 - 100% времени), кВт	18,5
Тип привода	Прямой
Система автоматической смены инструмента	
Выбор инструмента	Память произвольного доступа MAZATROL/кратчайший путь
Инструментальный магазин, шт	30
Максимальный диаметр инструмента, мм	80
Максимальный диаметр инструмента без соседних, мм	125
Максимальная длина инструмента, мм	350
Максимальный вес инструмента, кг	8
Время смены инструмента , сек	2,8
Система охлаждения	
Емкость резервуара СОЖ, л	20
Габаритные размеры	
Высота, мм	2952
Установочные размеры при магазине на 30 инструментов, мм	2808 x 2950
Вес, кг	6900
Питание	
Напряжение	220В/60Гц или 380В/50Гц
Потребляемая мощность, кВт	30
Требуемое давление воздуха, бар	6
Расход воздуха, л/мин	200

2.1.2. Выбор схемы обработки

Наиболее распространенными поверхностями деталей, обрабатываемыми в процессе фрезерования, являются плоские поверхности, уступы, канавки, пазы, прорези, фасонные профили, контуры. Некоторые схемы фрезерования приведены на рис. 2.2.

В современном машиностроении процесс фрезерования деталей машин осуществляется по одной из пяти широко распространенных схем (рис. 2.2)

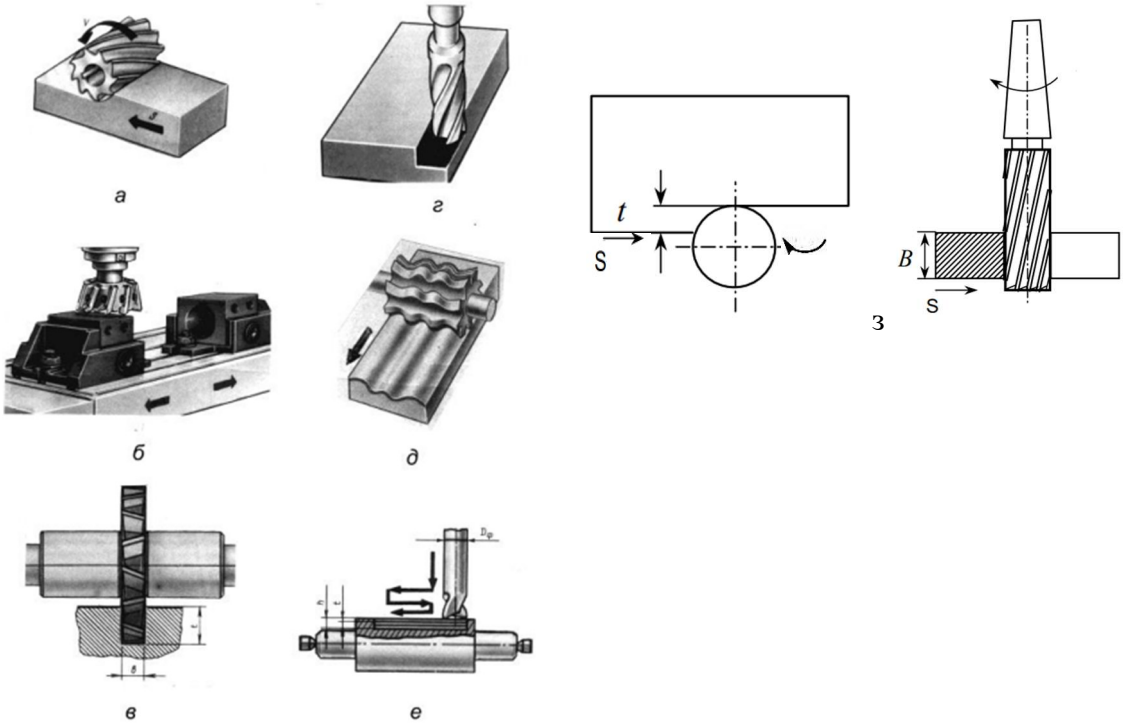


Рис. 2.2 – Схемы обработки деталей машин фрезерованием

Различают два метода фрезерования:

– попутное (по подаче) (рис. 2.3 а);

– встречное (против подачи) (рис. 2.3 б)

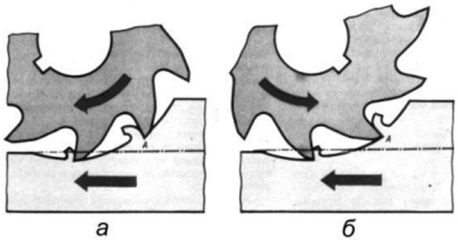


Рис. 2.3 – Два метода фрезерования: а – попутное; б – встречное

При попутном фрезеровании резание начинается с максимальной толщины среза, что уменьшает влияние наклепа поверхности резания на износ зубьев фрезы. Этим объясняется увеличение стойкости фрезы при попутном фрезеровании жаропрочных и титановых сплавов, склонных к образованию наклепа. Также благоприятно и то, что фреза прижимает заготовку к столу станка.

По вышеуказанной причине и для контурного фрезерования концевыми фрезами выбираем схему обработки титанового сплава в виде схемы согласно (рис. 2.2, з).

Для удобства установки заготовок и режущих инструментов при обработке

алюминиевых сплавов схему фрезерования также выбираем по (рис. 2.2, з).

2.1.3. Измерительное оборудование

Замеры толщины деталей проводили по наибольшему и наименьшему диаметру в трёх точках. Схема измерения представлена на рис. 2.4.

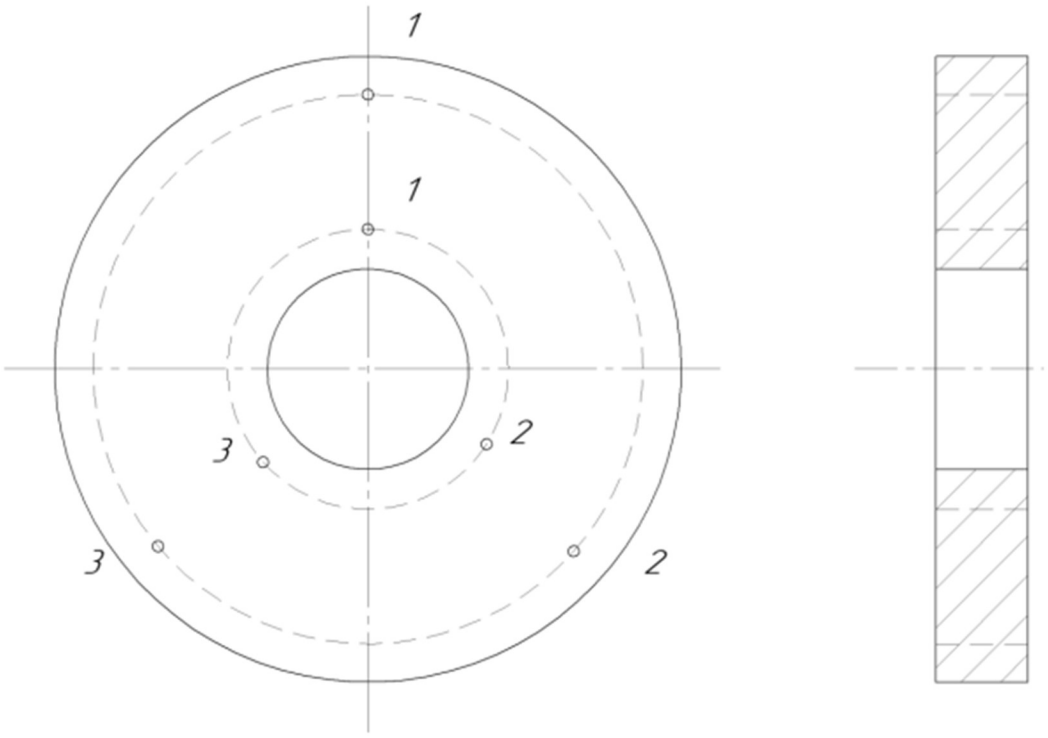


Рис. 2.4 – Схема измерения детали

С помощью микрометра (рис. 2.5) были выполнены замеры толщины деталей по наибольшему и наименьшему диаметру в трёх точках.

Рис. 2.5 – Микрометр с глубокой скобой 118-103 Mitutoyo

Технические характеристики микрометра с глубокой скобой 118-103 Mitutoyo представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Технические характеристики микрометра 118-103 Mitutoyo

Наименование характеристики	Значение
1	2
Диапазон измерений	0 – 25
Цена деления	0,01
Погрешность	±5 мкм
Пятка/Наконечник	А
Шкала	Барабан и стебель с матовым хромовым покрытием. Ø18 мм или Ø21 мм
Плоскостность	0,6 мкм для моделей с вылетом 110, 160, 165 мм 1 мкм для моделей с вылетом 300 мм
Параллельность	3 мкм
Измерительные поверхности	С твердосплавным наконечниками, доведенные
Микрометрический винт	Вылет до 300 мм: Ø8 мм Шаг микровинта 0,5 мм, со стопором
Измерительное усилие	3 – 8 Н
Цифровой/Аналоговый	Аналоговый
Дюймовый/Метрический	Метрический

Замеры значений шероховатости проводились при помощи профилометра Mitutoyo Surftest SJ-210 (рис. 2.6) – базовый прибор для измерения шероховатости от японской компании Mitutoyo Corporation. Модификации SJ-210 используются для быстрого и точного измерения шероховатости прямолинейных поверхностей. Погрешность измерений находится в пределах 5%.

Рис. 2.6 – Профилометр Mitutoyo Surftest SJ-210

Профилометры Mitutoyo Surftest серии SJ-210 внесены в Госреестр средств измерений РФ, свидетельство об утверждении типа № 30381-11. Методика поверки содержится в МП 30381-11. Межповерочный интервал 2 года. Основное средство поверки - эталонные меры шероховатости 2-го разряда по ГОСТ 8.296-78. Свидетельтсво о поверке в стандартный комплект не входит и поставляется по заявке. Помимо российского реестра, профилометры SJ-210 соответствуют требованиям европейских и международных стандартов - EN ISO, VDA, ANSI, JIS. Производство – Mitutoyo Corporation, Япония.

Технические характеристики профилометра Mitutoyo Surftest SJ-210 представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Технические характеристики Mitutoyo Surftest SJ-210

Характеристики	Surftest SJ-210
1	2
Диапазон:	360 мкм
Измерительное усилие:	0,75 мН
Угол измерительного наконечника:	60º
Радиус измерительного	2 мкм

Продолжение табл. 2.3

наконечника:			
Масса:	500 г		
Диапазон измерения:	16 мм 4,8 мм (S-тип)		
Ход траверсы:	17,5 мм; 5,6 мм (S-тип)		
Скорость измерения:	Измерение: 0,25 мм/с; 0,5 мм/с; Возврат: 0,8 мм/с		
Длина кабеля:	1 м		
Метод измерения:	Индукционный способ		
Щуп:	Алмазный наконечник		
Радиус опоры:	40 мм		
Профили:	Первичный профиль (P), профиль шероховатости (R), DIN 4776		
Дисплей:	Цветной ЖК-дисплей 6 см (2.4“) с подсветкой		
Стандарты шероховатости:	DIN, ISO, ANSI, JIS		
Выборка длины:	0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм	Выборка длины:	0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм
Количество базовых длин:	x 1, x 3, x 5, x L		
Длина отсечки:	lc: 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм, ls: 2,5 мкм, 8 мкм		
Питание:	Посредством преобразователя переменного тока (7,5 В 1,5 Вт пост.тока) встроенная или аккумуляторная батаре		
Допуск:	Верхний/нижний предел		

Замеры получены после фрезерования торцев деталей. Результаты полученные в ходе измерений представлены в приложении А (табл. А1…, А5.)

2.2. Обрабатываемые материалы

Исходя из сказанного, в работе рассмотрены конструкционные ма-териалы [10, 11, 24, 47, 116], относящиеся к группе цветных сплавов.

В качестве обрабатываемого материала использовались цветные металлы, а именно титановые сплавы ПТ-3В и алюминиевые сплавы АМг5.

Значимой особенностью титановых сплавов является высокая удельная прочность. В сравнении со стальными, титановые сплавы обладают более высокой удельной прочностью (в определенной мере и усталостной прочностью). Например, при изготовлении шатуна автомобиля из титанового сплава снижаются

массы поступательно движущихся и вращающихся частей, что может привести к снижению инерционных нагрузок, боковых нагрузок со стороны поршня на цилиндр, а также нагрузок на коленчатый вал и шатунный подшипник и, как следствие, к более высокому ресурсу этих деталей. Снижение массы шатуна может способствовать уменьшению размеров противовесов коленчатого вала, что приводит к уменьшению размеров картера и габаритных размеров двигателя.

Ко второй по значимости особенностью титановых сплавов можно отнести высокую коррозионную стойкость. Емкостные аппараты нефтехимической, пищевой промышленности, корпуса и обшивка морских судов и изготавливают преимущественно из титановых сплавов, так как они обладают устойчивостью к большому числу агрессивных сред определенных концентраций, широко применяемых в промышленности, таких как серная, азотная, муравьиная кислота и тд. . Применение стекло- и углепластиков для изготовления деталей планера из-за значительной коррозии алюминиевых сплавов в контакте с ними вызвало необходимость использования титановых сплавов взамен алюминия.

Третьей положительной особенностью титановых сплавов является высокая хладостойкость (уникальная особенность в отличие от сталей) и жаропрочность (высокая термическая стабильность). Показатели хладостойкости титановых сплавов способствуют широкому использованию данного материала в таких важных отраслях машиностроения как: авиастроение;

Титановые сплавы способны эффективно поверхностно упрочняться благодаря правильно подобранным технологическим режимам термообработки. Дополнительная деформационная составляющая упрочнения (например, от прокатки, ультразвуковой обработки и тд.) способна повысить плотность дефектов кристаллической решетки в новой фазе, снизить шероховатость поверхности, повысить усталостную прочность и износостойкость.

Технологически средне- и высоколегированные титановые двухфазные (а+Р)-сплавы (например, ВТ22) мало поддаются холодной деформации ввиду низкой податливости при обработке, интенсивного сопутствующего нежелательного наклепа, склонности к растрескиванию и разрывам. Нагрев при деформировании

до 200-300 °С способствует снижению сопротивления деформации для некоторых титановых сплавов до 40-60%. При 550-700 °С значительного окисления и ухудшения структуры не наблюдается, поэтому такие температуры для горячей деформации и упрочнения способны благоприятно повлиять на конечные свойства изделия.

Образующаяся при закалке мартенситная а'-фаза в псевдо-а сплавах (например, ПТ-3В и 5В) по своим механическим свойствам мало отличается от равновесной а-фазы, поэтому обычно термообработку не применяют. Однако, несмотря на малое содержание элементов-упрочнителей и Р-фазы (Fe, Mn, Cr, V), при критических скоростях нагрева и охлаждения становится возможным привести к распаду Р-фазы на высокопрочную а'-фазу. В таком случае метастабильные фазы будут обладать достаточно выраженными искажениями кристаллической решетки.

Низкая теплопроводность титановых сплавов способная вызвать поверхностное растрескивание в результате традиционных способов термообработки ввиду появления нежелательных термических растягивающих остаточных напряжений.

Физические, химические и механические свойства титановых сплавов представлены в табл. 2.4, 2.5, 2.6.

Таблица 2.4. Физические свойства титанового сплава ПТ-3В

Т, Град	Е 10^{-5}, МПа	ρ, кг/м^3
20	1,18	4450

Таблица 2.5. Химический состав в % материала ПТ-3В [ГОСТ 19807-91]

V	Ti	Al	Примесей (Fe, Si, Zr, C, N, H,…)
1,2 – 2,0	91,2 – 95,3	3,5 – 5,0	не более 0,3 %

Таблица 2.6. Механические свойства при Т = 20^0 С материала ПТ-3В [ГОСТ 19807-91]

Сортамент	Размер, мм	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU, кДж/м^2	Термообр.
Плита	11 - 26	700 – 900	600	10	22 – 25	600	Отжиг

где Т – Температура, при которой получены данные свойства, Град;

E – модуль упругости первого рода, МПа;

ρ – плотность материала, кг/м^3 ;

σ_B – предел кратковременной прочности, МПа;

σ_T – предел пропорциональности (предел текучести для остаточной деформации), МПа;

δ_5 – относительное удлинение при разрыве, %;

ψ – относительное сужение, %;

KCU – ударная вязкость, кДж/м^2 .

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м.град ·);

Алюминиевые сплавы применяют в судостроении, в частности, при изготовлении цельносварных судов, имеющих толстые стенки при относительно небольшом общем весе конструкции. Благодаря высоким антикоррозийным качествам АМг5 стойко переносит агрессивное воздействие окружающей среды, в том числе контакты с пресной и морской водой. Физические, химические и механические свойства титановых сплавов представлены в табл. 2.7, 2.8, 2.9.

Таблица 2.7. Физические свойства алюминиевого сплава АМг5 [47]

T, Град	E 10^{-5} · , МПа	ρ, кг/м^3	R 10^9 , Ом . м
20	0,71	2650	64

Таблица 2.8. Химический состав в % материала АМг5 [ГОСТ 21631-76]

Al	Mg	Примесей (Fe, Si, Mn, Ti, Zn, …)
91,9 – 94,7	4,8 – 5,8	не более 0,8 %

Таблица 2.9. Механические свойства при T = 20ºC материала АМг5 [ГОСТ 21631-76]

Сортамент	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	Термообр.
Плита	300	110 – 120	12 – 13	_

Где $R \cdot 10^9$ – удельное электросопротивление, Ом . м.

2.3. Выбор инструментальных материалов

Высокие механические свойства и коррозионная стойкость в сочетании с малым удельным весом являются основным критерием широкого применения

титановых сплавов в авиа- и ракетостроении, судостроении и других отраслях, включая медицинское направление.

Вследствие своих физико-механических свойств (например, незначительная теплопроводность, низкий модуль упругости), титановые сплавы относятся к числу материалов, плохо поддающихся обработке резанием. Ввиду низкой теплопроводности титана в процессе обработки происходит чрезвычайно высокий нагрев инструмента, особенно в области контакта со стружкой. При резании титановых сплавов в тех же условиях температура может составлять 1100–1200 ºС, что значительно превышает пределы красностойкости инструментальных материалов из быстрорежущих сталей и твердых сплавов [6, 32, 20, 35]. Поэтому процесс сопровождается обильным применением СОЖ.

Из-за высоких температур в области контакта возникает и другой фактор. Практически все известные металлы и огнеупоры растворимы в титане. По данным работы [6, 20, 32, 35], когда титановая стружка контактирует с инструментом при таких высоких температурах, то, по существу, происходит легирование стружки материалом инструмента. Сплав удаляется со стружкой и в результате этого затупляются режущие кромки. Следовательно, необходимо уменьшить рабочую площадь контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, что позволит сократить период выделения тепла режущей кромкой и увеличит время для охлаждения перед новым врезанием в материал.

Кроме того, после прохода режущей кромки наблюдается интенсивное упругое восстановление материала под поверхностью резания, так как титановые сплавы обладают высокой склонностью к упругому деформированию. В этом случае на заднюю поверхность инструмента действуют большие силы, вызывающие повышенный износ задней поверхности режущей части. При использовании твердосплавного инструмента часто происходит скалывание режущей кромки в сторону передней поверхности, что вызывает необходимость уменьшать глубину резания и ширину фрезерования.

Легирование стружки имеет и другое действие. В области контакта с зубом стружка приваривается к режущей кромке инструмента из быстрорежущей стали,

образуя нарост. Из-за изменения геометрии режущей кромки образовавшимся наростом нарушается точность обработки детали и значительно ухудшается качество поверхности.

На основе литературного анализа выявлено, что повышение производительности и периода стойкости инструмента при обработке заготовок из титановых сплавов в значительной степени зависит от скорости резания.

С алюминиевыми сплавами они обладают высокой теплопроводностью, низкой прочностью, поэтому сила резания при обработке ниже, чем при обработке стали или чугуна.

Более того, из-за высокой пластичности алюминиевого сплава во время механической обработки или блокировки стружки он будет тереться об обрабатываемую поверхность, что влияет на качество поверхности.

Из-за малых усилий резания при обработки алюминий (30% от усилий при обработке стали) и его сплавы легче поддаются лезвийной обработке, чем стали, чугуны, латуни или бронзы. Так при одинаковых параметров резанья скорость резания алюминия превышает в три раза скорость резанья бронз и в 5 скорость резания сталей. Это обозначает, что алюминий и его сплавы можно обрабатывать быстрее чем, данные материалы.

Справочная информация от ведущих мировых производителей лезвийного инструмента, в т. ч. компаний «Korloy» (Ю. Корея) [77], «Sandvik Coromant» (Швеция) [114, 117], «Widia» (Германия) [119], [77] и др.

Инструменты для обработки титановых и алюминиевых сплавов должны быть устойчивы к высокому износу.

Для решения этой задачи наиболее широкое применение в промышленной практике и серийно выпускаются твердосплавные режущие инструменты с многослойными противоизносными покрытиями в зависимости от способа покрытия, вида и условий операции механической обработки и обрабатываемых материалов [22].

ОСЕВОЙ ИНСТРУМЕНТ
ФРЕЗЫ

MEGA TEC

Рекомендованные режимы резания для фрез

Обозна-чение по ISO	Материал	Скорость резания Vc, м/мин	Подача (мм/зуб.) в зависимости от диаметра фрезы d1 (мм)								
			1-2	3-4	5	6	8	10	12-14	16-18	20
P	конструкционные и низкоуглеродистые стали	170-200	0,003	0,01	0,02	0,024	0,032	0,038	0,046	0,054	0,065
	низколегированные стали (легирующих элементов менее 5%)	130-180	0,002	0,007	0,014	0,017	0,024	0,03	0,036	0,045	0,057
	высоколегированные стали и инструментальные стали	70-110	0,001	0,004	0,01	0,013	0,019	0,025	0,031	0,038	0,045
M	нержавеющие стали (ферритного класса)	60-80	0,001	0,004	0,01	0,013	0,019	0,025	0,031	0,038	0,045
	нержавеющие стали (аустенитного класса)	30-60	0,001	0,003	0,007	0,009	0,014	0,018	0,022	0,027	0,033
K	серый чугун	60-120	0,002	0,007	0,014	0,017	0,024	0,03	0,036	0,045	0,057
	высокопрочный чугун	30-80	0,001	0,004	0,01	0,013	0,019	0,025	0,031	0,038	0,045
N	алюминиевые ковкие сплавы	300-600	0,008	0,015	0,025	0,031	0,042	0,05	0,059	0,071	0,09
	алюминиевые литейные сплавы (Si до 12%)	100-400	0,007	0,01	0,022	0,027	0,035	0,044	0,052	0,063	0,08
	алюминиевые литейные сплавы (Si более 12%)										
	медные сплавы	100-280	0,01	0,016	0,026	0,029	0,042	0,053	0,063	0,079	0,097
	неметаллические материалы (пластики)	100-400	0,005	0,01	0,019	0,025	0,033	0,04	0,048	0,059	0,075
S	Жаропрочные сплавы (на основе Ni и Co)	20-30	0,001	0,002	0,006	0,008	0,012	0,016	0,02	0,025	0,03
	титановые сплавы	20-40	0,001	0,003	0,008	0,011	0,017	0,023	0,03	0,036	0,044

Рис. 2.7 – Рекомендованные режимы резания для фрез [77]

Фирма Sandvik Coromant создала серию концевых фрез для обработки титана с уникальными геометриями и сплавами. Фрезы CoroMill® Plura HFS для фрезерования материалов ISO S с высокими подачами обеспечивают надежность и производительность при обработке деталей, изготавливаемых из сплавов на основе титана и алюминия. Геометрия фрез представляет собой конструкцию с 6 стружечными канавками с неравномерным шагом зубьев. Кроме того, оптимизирован размер сердцевины для повышения жесткости при обработке титановых сплавов, а радиус при вершине, главный передний угол и задний угол спроектированы специально для обработки этих сложных материалов [114].

В соответствии с рекомендацией [114], а также рис. 2.7 выбираем режущий инструмент из группы материалов ISO SC1745, SC1710, NH10F, N20C.

По рекомендации [114] выбираем нож с диаметром резания D =16 мм, число лезвий 6 при обработке титанового сплава и 3 лезвия при обработке алюминиевого сплава.

2.4. Выбор режимов обработки

Получение стабильных результатов фрезерования зависит от выберите соответствующие режимы обработки. Целесообразно, чтобы режимы, обеспечивающие стабилизацию, обеспечивали требуемую точность размеров, геометрии и шероховатости поверхности, а также эффективность процесса [1, 8, 13, 56, 98]. Выбранный режим обработки фиксируется при тестовой отладке процесса фрезерования.

Для контурного фрезерования концевыми фрезами необходимо установить следующие режимы фрезерования:

– скорость резания v, м/мин;

– число оборотов фрезы n, об/мин (мин$^{-1}$);

– подачу на один зуб минутную S, мм/об;

– подачу на зуб S_z, мм/зуб;

– подачу минутную S_M, мм/мин;

– глубина резания t, мм.

2.4.1. Режим резания при фрезеровании титанового сплава

Выбранный режим обработки назначается в соответствии с рекомендациями [77, 114] и при отладочных испытаниях процесс фрезерования представлен в табл. 2.10.

Таблица 2.10. Режим фрезерной обработки

Этап обработки	Скорость резания, м/мин	Частота вращения, об/мин	Подача, мм/зуб	Подача, мм/об	Подача, мм/мин	Глубина резания, мм
Фрезерование черновое	25	497,6	0,044	0,264	131	1,5
Фрезерование чистовое	40	796,2	0,03	0,15	119,4	1,0
Фрезерование тонкое	60	1194	0,017	0,102	121,8	0,5

2.4.2. Режим резания при фрезеровании алюминиевого сплава

Аналогично разделу 2.4.1 имеется таблица режимов обработки при обработке алюминиевых сплавов типа табл. 2.11.

Таблица 2.11. Режим фрезерной обработки

Этап обработки	Скорость резания, м/мин	Частота вращения, об/мин	Подача, мм/зуб	Подача, мм/об	Подача, мм/мин	Глубина резания, мм
Фрезерование черновое	250	4.976	0,063	0,189	940,5	2
Фрезерование чистовое	300	5.971	0,044	0,132	788,2	1,5
Фрезерование тонкое	350	6.966	0,027	0,081	564,2	0,75

2.5. Статистический анализ

Случайной величиной [4, 30, 115] называется величина, которая может принимать одно из конечного или бесконечного множества значений, причем заранее неизвестно, какое из них она примет в конкретном эксперименте. Случайной величиной называется любое числовое значение (рис. 2.8), полученное в результате измерения или сравнения результата измерения с некоторым заранее заданным значением. Результат измерения представляет собой сумму номинального значения, определяемого комбинацией частых факторов, и погрешности, возникающей в результате влияния случайного фактора.

Рис. 2.8 – Структура значения случайной величины

Непрерывная случайная величина — это случайная величина, которая может принимать любое значение из некоторого числового промежутка. Для непрерывной случайной величины множество возможных значений бесконечно и несчетно. В общем случае значение непрерывной случайной величины, как и другие ее характерные параметры, выражается действительным числом. Мы полагаем, что непрерывными являются измеряемые или измеренные значения технологических параметров, таких как высота и ступенчатые параметры шероховатости поверхности, размеры и отклонения размеров измерения относительно номинального значения [33, 39].

Дискретными случайными величинами называются такие величины, множество мгновенных значений которых либо конечно, либо бесконечно, но обязательно счетно. В нашем понимании дискретная случайная величина – это случайная величина, мгновенные значения которой могут быть выражены только заранее заданными величинами, например, количественной точностью качества, номером сорта и типом шероховатости и т. п., т. е. значение, полученное путем сравнения измеренного значения с каким-либо эталоном − т. наз. косвенное

измерение заменой [33, 39].

Показания и методы расчета [4, 30, 97,] основных признаков (табл. 2.12) для непрерывных и дискретных случайных величин могут быть различными.

Таблица 2.12. Основные характеристики случайных величин

Статистическая характеристика	Обозначение	Расчетная
Ожидаемое (среднее) значение	$\bar{X}$, X^{mid}	
Границы интервала варьирования: правая	X_{max}	
Границы интервала варьирования: левая	X_{min}	
Размах (ширина поля рассеяния, интервал варьирования)	H	$H = X_{max} - X_{min}$
Дисперсия	D	
Стандартное отклонение	S, σ	
Коэффициент вариации	V	$V = \frac{S}{\bar{X}}$

2.5.1. Оценка значения случайной величины

Обычно в прикладной статистике для оценки значения случайной величины используют значение моды и математическое ожидание.

Мода — это наиболее часто встречающееся значение случайной величины в выборке. Она определяется непосредственно в результате наблюдений (экспериментов) без дальнейшего расчета. В зависимости от метода регистрации значений и характера случайной величины может быть несколько модальных значений, которые встречаются с одинаковой частотой, а также может не быть моды, если частоты появления значений почти равны. Известно, что для непрерывных случайных величин мода не определена, поскольку каждое значение может появиться только один раз. На практике множество наблюдений всегда представляет собой набор значений дискретной случайной величины, дискретность которой определяется масштабом применения измерительного инструмента. Согласно теоретическому обоснованию, значение метода должно существовать. Однако, чтобы упростить расчеты, исследователи в большинстве случаев

рассматривают множество значений непрерывной случайной величины, полученное в результате измерений [5, 30, 53, 74].

Математическое ожидание — это среднее значение случайной величины, которое с учетом характера процесса с наибольшей вероятностью будет наблюдаться в итерациях эксперимента. Для непрерывной случайной величины математическое ожидание вычисляется как среднее арифметическое всех возможных значений, а для дискретной случайной величины — как взвешенное среднее, где веса пропорциональны вероятностям появления значений.

Следует отметить, что в некоторых случаях значения метода и математического ожидания совпадают. Например, для симметричных распределений, таких как нормальное распределение или закон Симпсона, мода совпадает с математическим ожиданием. Однако для эквивалентных распределений, например, для распределения Пуассона, может не существовать понятия моды. Для асимметричных распределений, таких как двухпараметрическое β-распределение или f-распределение, два этих значения, как правило, отличаются.

2.5.2. Оценка погрешности случайной величины

Дисперсия — это среднее квадратов отклонений случайной величины от ее среднего значения.

Стандартное отклонение — это стандартное отклонение случайной величины от ее среднего значения. Расчет стандартного отклонения производится по различным формулам в зависимости от массы мгновенного набора значений:

– для выборочной совокупности малого объема

$$S = +\sqrt{\frac{n}{n-1}D}; \tag{2.1}$$

– для выборочной совокупности большого объема и для генеральной совокупности

$$S = +\sqrt{D}. \tag{2.2}$$

Такое различие в формулах позволяет учитывать ошибки, вызванные

случайным удалением некоторой мгновенной величины при формировании выборки малого объема.

Коэффициент вариации или вариация случайной величины x равен [5, 54, 74] отношению стандартного отклонения S к среднему значению $\bar{X}$:

$$V = \frac{S}{\bar{X}}. \tag{2.3}$$

В зависимости от значения коэффициента вариации можно оценить состояние (табл. 2.13) процесса [115], показателем которого является случайная величина. Однако такая оценка основана на предположении о нормальном распределении значений случайной величины в поле рассеяния. Это предположение может быть неверным, если распределение значений случайной величины подчиняется другому закону.

Таблица 2.13. Оценка устойчивости процесса по величине вариации

Значение V	Однородность значений случайной величины	Состояние процесса
менее 0,17	высокая однородность данных	устойчивый
0,17…0,33	удовлетворительная однородность данных	
более 0,33	неоднородность данных	неустойчивый

Коэффициент вариации — это относительная мера разброса значений случайной величины по отношению к ее среднему значению. В отличие от абсолютных мер разброса, таких как дисперсия и стандартное отклонение, коэффициент вариации не зависит от масштаба измерения. В дальнейшем мы покажем, что общепринятые пороги для коэффициента вариации могут быть уточнены путем сопоставления коэффициента вариации с оценкой достоверности статистических данных. Таким образом, понятие однородности [115] данных и состояния процесса [48, 74, 78] может быть количественно оценено (табл. 2.13).

2.5.3. Критерии сходства случайных величин

Система условных обозначений приведена в табл. 1.14.

Таблица 2.14. Условные обозначения в формулах

i, j	Индекс рассматриваемого технологического метода.	
n_i, n_j	Объем совокупности значений.	
X_i X_j $X_{i,j}$	Произвольное значение случайной величины. Если индекс «*i*» или «*j*» единственный, значение является параметром соответствующего технологического метода. В случае двойного индекса символ «*i*» (первый) соответствует предыдущему, а символ «*j*» (второй) – последующему технологическому методу в последовательности обработки.	
X^{min}, X^{max}, X^{mid}	Соответственно, наименьшее предельное, наибольшее предельное и среднее значения рассматриваемой случайной величины.	
α	Доверительная вероятность.	
S	Стандартное отклонение.	Если индекс единственный – значение является параметром соответствующего технологического метода
$D=S^2$	Дисперсия.	

Предположим, что случайные величины считаются разными, если значение разности их средних значений существенно отличается от нуля. Рассмотрим статистические критерии, позволяющие оценить достоверность различия средних значений. Начнем с наиболее распространенного случая [48] нормального распределения случайной величины.

Для нормально распределенных случайных величин с одинаковой дисперсией или с небольшой выборкой из нормально распределенной генеральной совокупности [34] следует использовать критерий Стьюдента для двух выборок:

$$t_{ij} = \frac{\left|X_i^{mid} - X_j^{mid}\right|\sqrt{(n_i + n_j - 2}}{\sqrt{n_i + n_j} \cdot \sqrt{(n_i - 1) \cdot D_i + \left(n_j - 1\right) \cdot D_j}} \cdot \tag{2.4}$$

В случае различных дисперсий для нормально распределенных выборок большого объема используют [30, 34, 42] критерий Крамера-Уэлча:

$$T_{ij} = \frac{\left|X_i^{mid} - X_j^{mid}\right|}{\sqrt{n_i \cdot D_i + n_j \cdot D_j}} \cdot \tag{2.5}$$

Для принятия решения о достоверности различия средних значений

рассчитанные значения критерия сравнивают с эталонными значениями, полученными из распределения Стьюдента с известным числом степеней свободы или функции Лапласа, соответствующими определенной степени достоверности.

Предположим, что выборочные наборы одинаковой массы можно сравнивать и что массы наборов n_i и n_j являются бесконечно большими величинами одного порядка. Тогда пороговое значение критерия Стьюдента (2.4) можно определить следующим образом:

$$\lim_{\substack{n_i\to\infty \\ n_j\to\infty \\ n_i\approx n_j}} t_{ij} = \lim_{\substack{n_i\to\infty \\ n_j\to\infty \\ n_i\approx n_j}} \left(\frac{\left|X_i^{mid} - X_j^{mid}\right|}{\sqrt{(n_i - 1)\cdot D_i + \left(n_j - 1\right)\cdot D_j}} \sqrt{\frac{\left(n_i + n_j - 2\right)}{n_i + n_j}} \right) \approx$$

$$\approx \lim_{n_i\to\infty} \left(\frac{\left|X_i^{mid} - X_j^{mid}\right|}{\sqrt{D_i + D_j}} \cdot \frac{\sqrt{(2\cdot n_i - 2)}}{\sqrt{2\cdot n_i\cdot(n_i - 1)}} \right) \approx \lim_{n_i\to\infty} \left(\frac{\left|X_i^{mid} - X_j^{mid}\right|}{\sqrt{n_i}\cdot\sqrt{D_i + D_j}} \right); \qquad (2.6)$$

а для критерия Крамера-Уэлча (10) предельное значение будет равно:

$$\lim_{\substack{n_i\to\infty \\ n_j\to\infty \\ n_i\approx n_j}} T_{ij} = \lim_{\substack{n_i\to\infty \\ n_j\to\infty \\ n_i\approx n_j}} \left(\frac{\left|X_i^{mid} - X_j^{mid}\right|}{\sqrt{n_i\cdot D_i + n_j\cdot D_j}} \right) \approx \lim_{n_i\to\infty} \left(\frac{\left|X_i^{mid} - X_j^{mid}\right|}{\sqrt{n_i}\cdot\sqrt{D_i + D_j}} \right). \qquad (2.7)$$

Преобразования (2.6) и (2.7) показывают, что при неограниченном увеличении массы популяции разница между критериями Стьюдента и Крамера-Уэлча нивелируется, поэтому нельзя использовать эти критерии для оценки таких популяций.

Некоторые исследователи [34, 42] предлагают использовать в качестве критерия различия / сходства двух случайных величин абсолютную величину разности, которая является случайной величиной, закон распределения которой совпадает [54] с законом распределения исходных значений. Значение нормализованной и нормированной разности [30] средних значений, рассматриваемых без учета знака:

$$Z_{ij} = \frac{\left|X_i^{mid} - X_j^{mid}\right|}{\sqrt{S_i^2 + S_j^2}}; \qquad (2.8)$$

может быть использована в качестве критерия сходства нормально распределенных случайных величин X_i и X_j . Учитывая, что $Z \geq 0$, рассматриваем одностороннюю область критических точек и считаем случайные величины X_i и X_j сходными с доверительной вероятностью $0 \leq \alpha \leq 100$ % при выполнении неравенства

$$\Phi(Z) \leq 1 - \frac{1-\alpha}{2} = \frac{1+\alpha}{2}, \tag{2.9}$$

где Ф(Z) – интеграл вероятности. Для доверительной вероятности α = 99%, Z = 2,58. Следовательно, те методы обработки, для которых парный критерий Z > 2,58, следует считать различающимися по достижимым показателям. Использование таких пар методов как смежных в одной технологической последовательности можно считать рациональным.

Однако рассмотренные критерии применимы только к нормально распределенным случайным величинам.

Рассмотрим возможность оценки сходства/различия двух случайных величин с помощью коэффициента вариации — характеристики случайной величины, не зависящей [115] от закона распределения. Определим коэффициент вариации случайной величины, который представляет собой абсолютное значение разности между двумя случайными величинами одного и того же распределения. Согласно теореме сложения [5, 30] случайные величины имеют один и тот же закон распределения:

$$X_{ij}^{mid} = \left|X_i^{mid} - X_j^{mid}\right|;$$

$$S_{ij} = \sqrt{S_i^2 + S_j^2}; \tag{2.10}$$

$$V_{ij} = \frac{S_{ij}}{X_{ij}^{mid}} = \frac{\sqrt{S_i^2 + S_j^2}}{\left|X_i^{mid} - X_j^{mid}\right|}.$$

Сравнение выражений (2.8) и (2.10) показывает, что коэффициент вариации

разности является величиной, обратной (2.11) критерию Z_{ij}

$$V_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}}, \tag{2.11}$$

следовательно, его также можно использовать для оценки равенства средств. Возможность использования коэффициента вариации различия в качестве критерия подобия или различия случайных величин подтверждается следующей причиной:

1) значение коэффициента вариации пропорционально (2.3, 2.10) размаху случайной величины, поэтому с увеличением размаха или соответственно оценки погрешности возрастало и значение коэффициента вариации;

2) значение коэффициента вариации обратно пропорционально (2.3, 2.10) среднему, поэтому при уменьшении разности средних значений (2.10) коэффициент вариации увеличивается;

3) при увеличении ошибки (рис. 2.9) каждой случайной величины по сравнению со средним неизменным или при уменьшении разности между средними значениями (рис. 2.10) различия между случайными величинами сглаживаются.

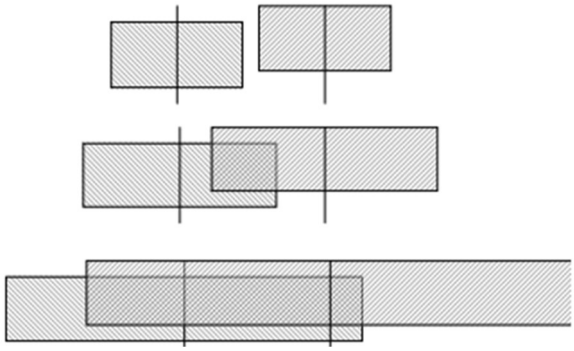


Рис. 2.9 – Влияние погрешности на различие случайных величин

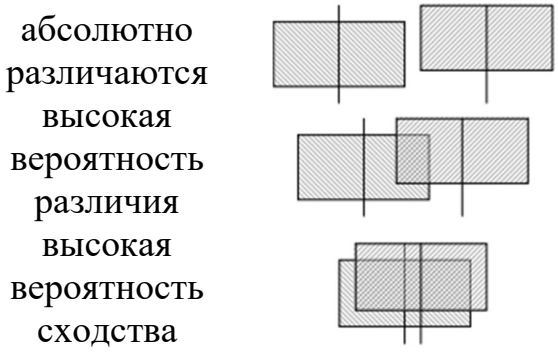


Рис. 2.10 – Влияние разности средних на различие случайных величин

Для практики использования коэффициента вариации различия в качестве критерия различия случайных величин необходимо предложить значение и определить его критические значения для сравнения со значением расчетного значения коэффициента вариации. С учетом соотношения (2.11) в качестве

критерия сравнения можно использовать модифицированное соотношение. Вместо интеграла Лапласа в неравенство необходимо подставить значение интегральной вероятности, рассчитанное для соответствующего закона распределения (2.12…2.14).

Соответствие между значениями коэффициента вариации и доверительной вероятности для наиболее часто используемых в технологических расчетах законов распределения [94, 95] показано на рис. 2.11. Оно выражается с учетом соотношения (2.11), зависимостей (2.12...2.14).

Закон нормального распределения

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\cdot\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Z} e^{-Z^2/2} dZ\,. \tag{2.12}$$

Закон Симпсона

$$\Phi_C(Z) = \begin{cases} 0 & \text{при } Z \le -\sqrt{6} \\ 0{,}5 + \frac{Z}{\sqrt{6}} \pm \frac{Z^2}{12} & \text{при } |Z| < \sqrt{6} \\ 1 & \text{при } Z \ge \sqrt{6} \end{cases}. \tag{2.13}$$

Равновероятное распределение

$$\Phi_P(Z) = \begin{cases} 0 & \text{при } Z \le -\sqrt{3} \\ \frac{(Z+\sqrt{3})}{2\cdot\sqrt{3}} & \text{при } |Z| < \sqrt{3} \\ 1 & \text{при } Z \ge \sqrt{3} \end{cases}. \tag{2.14}$$

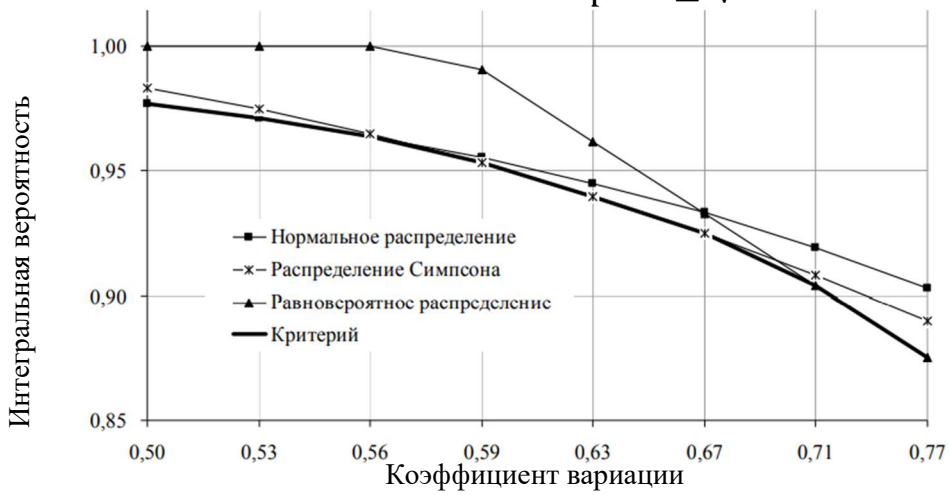


Рис. 2.11 – Зависимость интегральной вероятности от вида распределения

Специальная литература [31, 115] рекомендует пороговые значения (табл. 2.13, табл. 2.15) коэффициента вариации, позволяющие оценить однородность

значений случайной величины.

Таблица 2.15. Соотношение коэффициента вариации с величинами интегральной и двусторонней вероятности

Коэфф. вариации V_{ij}	**Интегральная вероятность** для закона распределения			**Доверительная (двусторонняя) вероятность α** для закона распределения		
	нормального	Симпсона	равновероят-ного	нормального	Симпсона	равновероя т-ного
0,170	0,99999999	1,0000000	1,0000000	$1-4{,}1*10^{-9}$	1,00000000	1,0000000
0,330	0,99877723	1,0000000	1,0000000	0,99755446	1,00000000	1,0000000

Интегральную вероятность можно рассчитать с учётом приведённых выше выражений (18… 21), по следующей системе уравнений:

$$\Phi(V) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\cdot\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{1/V} V^{-2} \cdot e^{-0{,}5\cdot V^{-2}} dV, \ V < 0{,}564 \\ 0{,}5 + \frac{1}{V\cdot\sqrt{6}} + \frac{1}{12\cdot V^2}, \quad 0{,}564 \le V < 0{,}697 \\ 0{,}5 + \frac{1}{2\cdot V\cdot\sqrt{3}}, \qquad V \ge 0{,}697 \end{cases} \tag{2.15}$$

С помощью данной системы, можно рассчитать минимальную интегральную вероятность исхода обработки для любой пары этапов.

Наихудший прогноз результатов расчёта зависит от значения интегральной вероятности для определённого коэффициента вариации, который зависит от среднего значения и размаха.

Приведённая методика анализа надёжности справочных данных, позволяет сделать следующие выводы [87]:

- процесс является надёжным (99,99%), при котором величина коэффициента вариации для любого метода не больше 0,17;

- процесс с допустимой надёжностью (99,86%), при котором коэффициент вариации лежит в диапазоне от 0,17 до 0,33;

- процесс будет ненадёжным, если коэффициент вариации больше 0,33.

Уровень надёжности таких процессов не будет превышать 99,73%.

Таким образом, можно сделать вывод, что устойчивость используют для

оценки надёжности стохастического процесса, а коэффициент вариации – это численная оценка надёжности [78].

2.6. Методика повышения надежности справочных данных

В исследовании [85] дали нам предложен подход к построению справочных таблиц точности обработки на основе функции принадлежности значения случайной величины выделенному из интервала варьирования граничному диапазону. Показано, что уменьшение ширины интервала варьирования приводит к незначительному снижению интегральной вероятности. Одновременно сужение интервала определяет существенное повышение надежности справочных данных.

Существенная проблема современной технологии машиностроения и, в частности, автоматизации технологического проектирования заключается в неоднозначности [23, 45, 64] нормативно-справочной информации, используемой при формировании маршрутных технологий. Анализируя [78, 86] таблицы точности обработки, автор исходит из утверждения о том, что качество обработки, рассматриваемое как комплексный показатель соответствия результатов обработкии требований, предъявляемых к изделию, есть понятие технологическое, характеризующее каждый из методов механической обработки. Результат процесса обработки оценивается однородной [78, 91] случайной величиной, этот процесс и соответствующие справочные данные являются надежными, следовательно, результаты проектирования также можно считать достоверными. Надежность справочных данных применительно к процессам механической обработки можно оценить по величине коэффициента вариации [78, 90, 91], поскольку этот статистический критерий определяется только шириной интервала варьирования и средним значением случайной величины и не зависит [90] от закона распределения вероятности в пределах интервала варьирования. Возможность повышения надежности справочных данных рассмотрим на примере таблиц точности механической обработки. На первом этапе необходимо сформировать совокупные таблицы точности. Рассматриваем интервал варьирования значений технологического показателя как совокупность [81] пересекающихся интервалов варьирования независимых [81, 91] случайных величин:

– левая граница интервала – случайная величина $X_{min} \in \left[X_{min}^{min}; X_{min}^{max}\right]$ со средним значением X_{min}^{mid}, стандартным отклонением S_{min} и плотностью вероятности $F^{min}(x)$;

– правая границы диапазона – случайная величина $X_{max} \in \left[X_{max}^{min}; X_{min}^{max}\right]$ со средним значением X_{min}^{mid}, стандартным отклонением S_{max} и плотностью вероятности $F^{max}(x)$.

Таблица 2.16. Условные обозначения в формулах и на схемах

Величина или диапазон значений величины	Точка или интервал на схеме	Условное обозначение в тексте и расчетных формулах
Левая граница объединения диапазонов (наименьшее значение показателя)	a	X_{min}^{mid}
Среднее значение объединения левых границ диапазонов – условное минимальное значение показателя	b	$X_{min}^{min} = X_{min}$
Наибольшее значение объединения левых границ диапазонов	c	X_{min}^{max}
Среднее значение случайной величины		$X_{min}^{mid} = \bar{X}$
Наименьшее значение объединения правых границ диапазонов	d	X_{max}^{min}
Среднее значение объединения правых границ диапазонов – условное максимальное значение показателя	e	$X_{max}^{mid} = X_{max}$
Правая граница объединения диапазонов (наибольшее значение показателя)	f	X_{max}^{max}
Варьирование наименьшего возможного значения технологического показателя	$[a, c]$	$F^{min}(x) = f_1\left(x, X_{min}^{mid}, S_{min}\right)$
Варьирование технологического показателя	$[b, e]$	$F^{mid}(x) = f_2(x, X^{mid}, S)$
Варьирование наибольшего возможного значения технологического показателя	$[d, f]$	$F^{max}(x) = f_2(x, X_{max}^{mid}, S_{max})$

Каждая из граничных случайных величин X_{min} и X_{max} может рассматриваться как совместная и независимая [81] относительно технологического показателя, который также представляет собой случайную величину $X^{mid} \in \left[X_{min}^{mid}; X_{max}^{mid}\right]$ со средним значением X^{mid} , стандартным отклонением S и плотностью вероятности mid $F^{mid}(x)$. Диапазоны изменения границ рассчитываются в соответствии с

методикой [86]. Статистические характеристики каждой из случайных величин определяются в зависимости от ширины соответствующего интервала варьирования и вида закона распределения плотности вероятности случайной величины в соответствующем интервале.

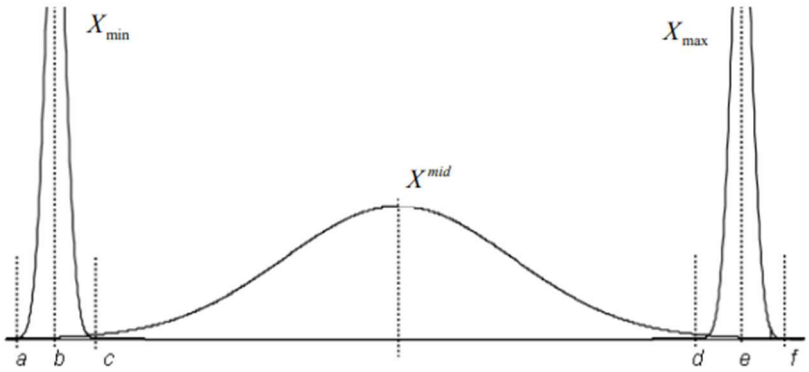


Рис. 2.12 – Расчетная схема к определению границ диапазонов технологического показателя

Автор продемонстрировал, что ширина интервала изменения значений технологического показателя, определяемого в результате логического объединения [78, 81, 91] справочных данных, может быть уменьшена. Для этого автор применяет понятие функции принадлежности [43], которая определяет вероятность нахождения значения случайной величины в заданном интервале времени. Количественно функция принадлежности представляет собой распределение плотности вероятности случайной величины. Значение плотности вероятности (2.15) в диапазоне предельной вариации определяется по теореме умножения вероятностей для общих независимых событий:

$$F(x) = \begin{bmatrix} F^{min}(x) \cdot F^{mid}(x) x \in [a, b] \\ F^{mid}(x) \qquad\qquad x \ni]b, e[. \\ F^{max}(x) \cdot F^{mid}(x)\ x \ni [e, f] \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

Распределение значений каждой из рассматриваемых случайных величин (табл. 2.16) подчиняется одному из трех законов (табл. 2.17), наиболее часто используемых [78, 86, 91] в технологическом проектировании.

Таблица 2.17. Параметры законов распределения

Параметр распределения	Распределение		
	нормальное (Гауссово)	равномерное (равновероятное)	треугольное (Симпсона)
Функция распределения плотности вероятности	$\frac{1}{S\cdot\sqrt{2\cdot\pi}}\cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\cdot S^2}}$	$\begin{cases}\frac{1}{2\cdot S\cdot\sqrt{3}} & \lvert x-\bar{x}\rvert < a\\ 0 & \lvert x-\bar{x}\rvert \geq a\end{cases}$	$\begin{cases}\frac{1}{S\cdot\sqrt{6}}-\frac{\lvert x-\bar{x}\rvert}{6\cdot S^2} & \lvert x-\bar{x}\rvert < S\cdot\sqrt{6}\\ 0 & \lvert x-\bar{x}\rvert \geq S\cdot\sqrt{6}\end{cases}$
Среднее	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$
Дисперсия	S^2	$\frac{(2\cdot S)^2}{12}=\frac{S^2}{3}$	$\frac{(2\cdot S)^2}{12}=\frac{S^2}{3}$
Полуширина поля рассеяния и множитель при стандартном отклонении	3.$\boldsymbol{S}$, k_f=3	$S\cdot\sqrt{3}\approx 1{,}73\cdot S$, $k_f=\sqrt{3}$	$S\cdot\sqrt{6}\approx 2{,}45\cdot S$, $k_f=\sqrt{6}$
Доверительная вероятность	99,73%	100%	100%

Интегральная вероятность попадания значения технологического показателя в интервал варьирования близка к 100 %, определим ширину интервала $\overline{[b,e]}=6\cdot S$, тогда $\overline{[a,f]}>6\cdot S$. Графики распределений плотности вероятности на правом граничном (рис. 2.9) интервале показаны ниже на рис. 2.10. Горизонтальные оси графиков размечены в долях стандартного отклонения *S*. Ширина граничного интервала [*d, f*] принята равной 2*S*.

Из представленных графиков (рис. 2.10) и расчетных данных (табл. 2.18) видно, что в результате умножения вероятностей для независимых и совместных событий – нахождение значения технологического показателя в интервале допустимых значений [*a, f*] и, одновременно, попадание значения в один из граничных интервалов [*a, c*] или [*d, f*] – значение функции принадлежности на границе существенно меньше, чем на основном интервале варьирования [*b, e*]. При этом уменьшение вероятности на границе интервала варьирования для модальных распределений (рис. 2.13, *а, в*) случайной величины X^{mid} на несколько порядков

существеннее, чем в случае немодального равновероятного распределения (рис. 2.13, *б*). В случае модальных распределений – нормального и треугольного – ширина интервала варьирования значений технологического показателя может быть уменьшена до 4S. Интегральная вероятность попадания случайной величины в такой интервал $\bar{X}^{mid} \pm 2 \cdot S$ без учета «граничной» составляющей равна 95,45 % для закона нормального распределения и 88,89 % для распределения Симпсона. При ширине интервала варьирования равной $6S$ ($X^{\text{mid}} \pm 3.S$) интегральная вероятность составляет 99,73 % в случае нормального распределения или 100 % для распределения Симпсона.

Анализ значений интегральной вероятности, рассчитанной с учетом функции принадлежности (рис. 2.14, табл. 2.19), показывает, что сужение интервала варьирования от $X \in \left[X_{min}^{min};\ X_{\max}^{\max}\right]$ до $X \in [X_{min};\ X_{max}]$ снижает вероятность попадания значений в рассматриваемый диапазон не более чем на 0,44 % для нормального и до 1,63 % для равновероятного законов распределения. Следует отметить, что ширина интервала варьирования однозначно связана с понятием надежности [78, 86, 91] случайной величины. Дальнейшее сужение интервала варьирования (до $X \in \left[X_{min}^{max};\ X_{\max}^{\min}\right]$) вызывает существенное снижение интегральной вероятности.

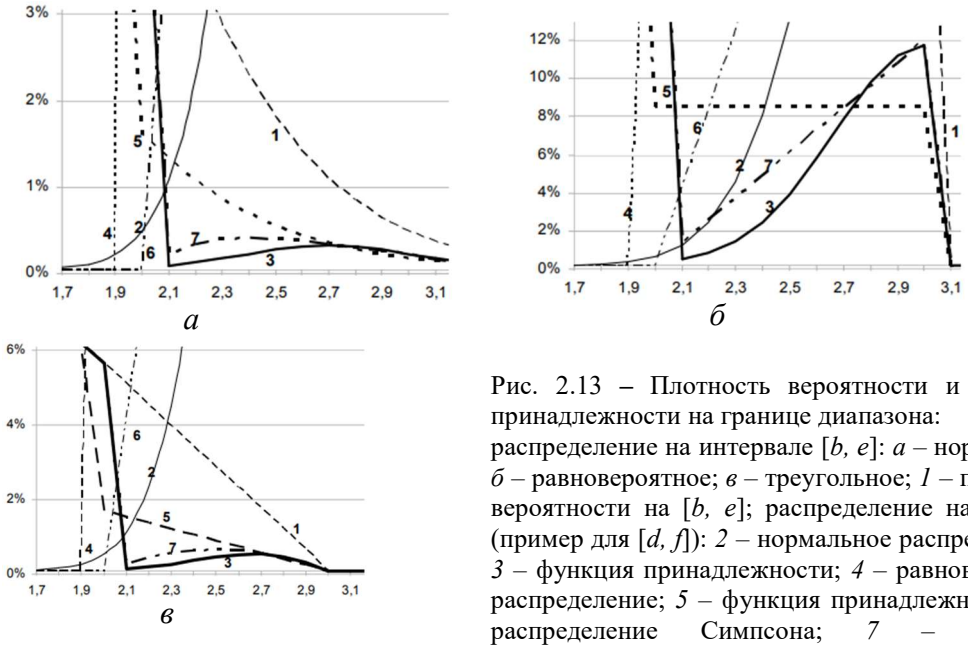


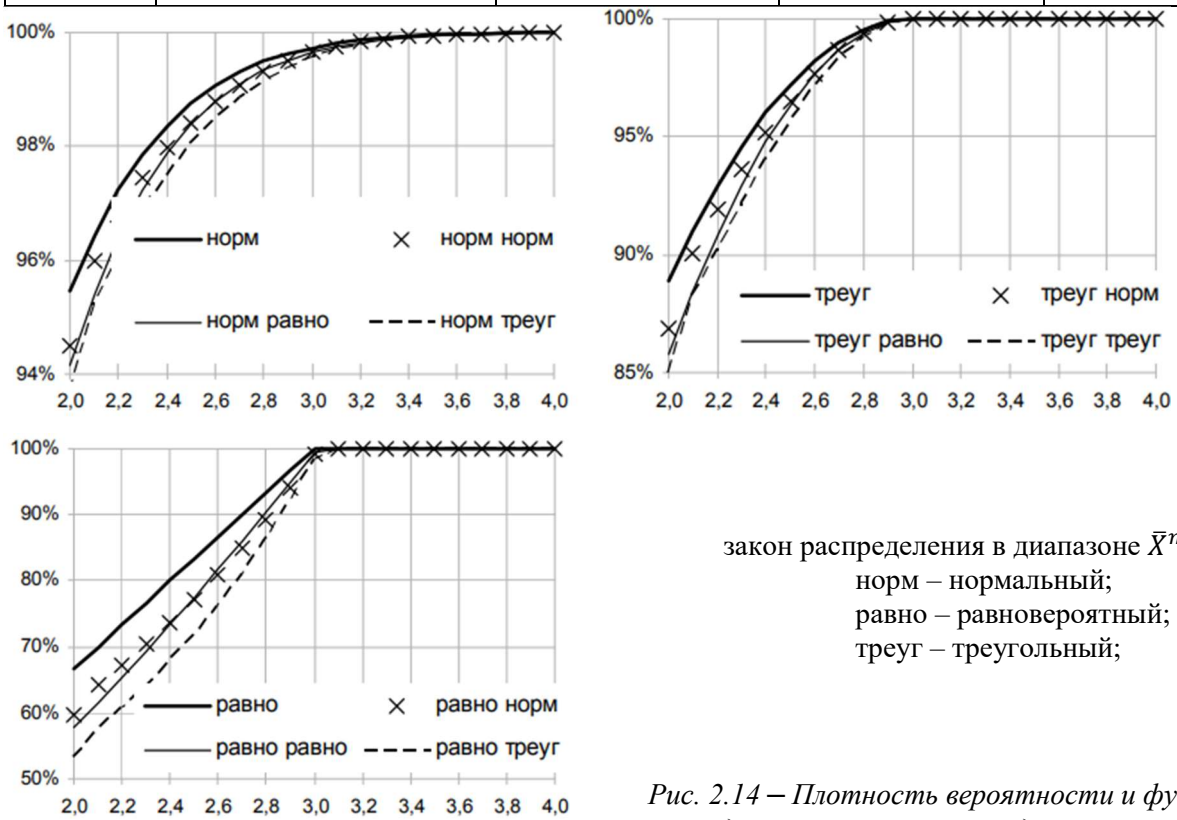
Рис. 2.13 – Плотность вероятности и функция принадлежности на границе диапазона:
распределение на интервале [*b, e*]: *а* – нормальное; *б* – равновероятное; *в* – треугольное; *1* – плотность вероятности на [*b, e*]; распределение на границе (пример для [*d, f*]): *2* – нормальное распределение; *3* – функция принадлежности; *4* – равновероятное распределение; *5* – функция принадлежности; *6* – распределение Симпсона; *7* – функция принадлежности

Таблица 2.18. Плотность вероятности на границе интервала варьирования технологического показателя

Точка (рис. 2,10) и значение показателя	Плотность вероятности $F^{mid}(x)$,%	Плотность вероятности $F(x)$ на интервалах [*a, c*] и [*d, f*] при выбранном законе распределения			Плотности вероятности $F^{min}(x)$,% и ($F^{max}(x)$,%)		
		Гаусса %	Равной вероятности %	Симпсона %	Гаусса %	Равной вероятности %	Симпсона %
Нормальное распределение на интервале [*a, f*]							
±1,9	6,5616						
c (-) d (+)	…						
± 2,9	0,5953	0,2270	0,1718	0,2187	38,1388	28,8675	36,7423
(b) e ± 3,0	0,4432	0,1768	0,1279	0,1809	39,8942	28,8675	40,8248
±3,2	0,2384	0,0794	0,0688	0,0779	33,3225	28,8675	32,6599
Равновероятное распределение на интервале [*a, f*]							
±1,9	28,8675						
C (-) d (+)	…						
± 2,9	28,8675	11,0097	8,3333	10,6066	38,1388	28,8675	36,7423
(b) e ± 3,0	28,8675	11,5165	8,3333	11,7851	39,8942	28,8675	40,8248
± 3,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	33,3225	28,8675	32,6599
Треугольное распределение Симпсона на интервале [*a, f*]							
±1,9	6,1111						
C (-) d (+)	…						
± 2,9	0,5556	0,1604	0,2119	0,2041	38,1388	28,8675	36,7423
(b) e ± 3,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	39,8942	28,8675	40,8248
± 3,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	33,3225	28,8675	32,6599

Таблица 2.19. Вероятность нахождения значения технологического показателя в определенном интервале с учетом функции принадлежности

Интервал, (рис. 2.10)	Интегральная вероятность, %			
	Распределение на [b, e]	Распределение на границе интервала варьирования		
		нормальное	треугольное	равновероятное
Нормальное распределение Гаусса				
[*c, d*]	95,45	94,49	93,69	94,15
[*b, e*]	99,73	99,65	99,56	99,65
[*a, f*]	99,99	99,99	99,99	99,99
Треугольное распределение Симпсона				
[*c, d*]	88,89	86,86	84,97	85,77
[*b, e*]	100,00	100,00	100,00	100,00
Равновероятное распределение				
[*c, d*]	66,67	59,63	53,35	57,76
[*b, e*]	100,00	99,11	98,37	99,36
[*a, f*]	100,00	100,00	100,00	100,00



закон распределения в диапазоне $\bar{X}^{mid} \pm 3 \cdot S$
норм – нормальный;
равно – равновероятный;
треуг – треугольный;

Рис. 2.14 – Плотность вероятности и функция принадлежности на границе диапазона

Для оценки изменения однородности [78, 91] случайной величины, характеризующей технологический показатель, рассмотрим, например, интервал значений средней арифметической высоты микронеровностей Ra цилиндрической поверхности, обработанной черновым растачиванием. Данный технологический метод был отмечен ранее [86], как недостаточно однородный. В результате анализа

справочной литературы установлен диапазон значений параметра: Ra ∈ [1,6;100] (мкм). Среднее значение для данного интервала составляет $\overline{Ra} = 50{,}8$ мкм. Предельные значения изменяются в следующих пределах: $Ra^{min} \in [1{,}6; 50]$ (мкм) ; $Ra^{max} \in [16; 100]$ (мкм). Округляя средние значения для граничных интервалов, получим $Ra^{mid} \in [26; 58]$ (мкм) и, соответственно, $\overline{Ra}^{mid} = 42$ мкм. Вероятностная оценка однородности случайной величины, определяемая по величине коэффициента вариации [91], равна 100 % для уточненного интервала варьирования, что свидетельствует о высокой надежности интервала значений технологического показателя.

Данный метод исследования позволяет значительно сократить ширину диапазона варьирования значений технологического показателя, что позволит повысить достоверность справочных данных и рационально подобрать методы обработки поверхности лица с конкретными показателями точности. Соответствующие значения $X_{\min}$ и $X_{\max}$ рекомендуется назначать точкам b и e (рис. 2.11) в качестве предельного значений технологического показателя.

2.7. Оценка надёжности маршрута обработки

Последовательность технологических переходов, реализуемая для каждой поверхности детали в соответствии с маршрутной технологией должна обеспечить получение заданных параметров точности и качества обработки изделия в-целом. Надежность плана обработки может быть определена из условия соответствия техническим требованиям значений показателей качества и точности, полученных в результате обработки. В качестве показателя надежности плана обработки, при таком подходе, может рассматриваться вероятность обеспечения требуемых точностных параметров. [88]

В случае использования двух и более рассматриваемых показателей общая оценка надежности маршрута обработки рассчитывается как произведение показателей надежностей (интегральных вероятностей) отдельных параметров из этой цепочки:

$$P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^{n} \Phi(V_i), \tag{2.17}$$

где P_{Σ} – надежность плана обработки;

n – количество переходов плана обработки;

V_i – коэффициент вариации показателя качества на i-том переходе.

Совокупная надежность i-го элемента в рассматриваемом случае также определяется как вероятность совместного наступления нескольких независимых событий. [87] Надежность технологического плана, включающего более одного перехода при условии контроля произвольного количества параметров точности / качества обработки, будет определена следующим образом:

$$P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^{n} \prod_{j=1}^{m} \Phi(V_i)\,, \tag{2.18}$$

где n – количество переходов плана обработки;

m – количество контролируемых на каждом технологическом переходе показателей качества / точности обработки;

V_{ij} – коэффициент вариации j-го показателя качества на i-том переходе.

Таким образом, надежность технологической цепочки может быть рассчитана как вероятность получения изделия заданного качества.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

3.1. Построение вероятностных таблиц точности экспериментальных данных

На данном этапе проведём статистический анализ **[87]** экспериментальных данных. Для этого рассчитаем коэффициент вариации и интегральную вероятность по формулам (2.11 и 2.15). По полученным данным в разделе 2 сформируем обобщённую таблицу (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Обобщённая таблица точности. Методы обработки плоских поверхностей

Метод обработки	6,000	3,464	4,899		Делитель			
	Точность размеров, IT				Шероховатость, *Ra*, мкм			
	min	max	Средн.	Размах	min	max	Средн.	Размах
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фрезерование черновое	12	15	13,5	3	5,355	20,237	12,976	14,882
Фрезерование чистовое	10	12	11	2	2,72	15,168	8,944	12,448
Фрезерование тонкое	7	9	8	2	1,36	9,584	5,472	8,224

Для дальнейших расчётов приведём уточнённые таблицы с данными (табл. 3.3, 3.4).

Коэффициенты вариации квалитетов точности:

Коэффициент вариации согласно законf нормального распределения рассчитывается по следующей формуле:

$$V_{гаусс_i} = \frac{6}{\overline{X} \cdot H}, \tag{3.1}$$

где $\overline{X}$ – среднее значение (в табл. 3.1, столбец);

H – размах (в табл. 3.1, столбец 6).

тогда

$$V_{гаусс_i} = \frac{6}{\overline{X} \cdot H} = \frac{6}{13{,}5 \cdot 3} = 0{,}148.$$

Полученные результаты представлены в табл. 3.3, столбец 6.

Коэффициент вариации согласно закону треугольника рассчитывается по формуле:

$$V_{симпсон_i} = \frac{3,464}{\overline{X} \cdot H}, \quad (3.2)$$

тогда

$$V_{симпсон_i} = \frac{3,464}{\overline{X} \cdot H} = \frac{3,464}{13,5 \cdot 3} = 0,086.$$

Полученные результаты представлены в табл. 3.3, столбец 7.

Коэффициент вариации согласно равновероятному закону рассчитывается по формуле:

$$V_{равное_i} = \frac{4,899}{\overline{X} \cdot H}, \quad (3.3)$$

Тогда

$$V_{равное_i} = \frac{4,899}{\overline{X} \cdot H} = \frac{4,899}{13,5 \cdot 3} = 0,121.$$

Полученные результаты представлены в табл. 3.3, столбец 8.

Среднеквадратичное отклонение для нормального распределения рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{гаусс} = \frac{H}{6}, \quad (3.4)$$

Тогда

$$\sigma_{гаусс} = \frac{H}{6} = \frac{3}{6} = 0,5.$$

Полученные результаты представлены в табл. 3.3, столбец 12.

Среднеквадратичное отклонение для нормального распределения рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{симпсон} = \frac{H}{3,464}, \quad (3.5)$$

Тогда

$$\sigma_{\text{симпсон}} = \frac{\text{H}}{3{,}464} = \frac{3}{3{,}464} = 0{,}866.$$

Полученные результаты представлены в табл. 3.3, столбец 13.

Среднеквадратичное отклонение для нормального распределения рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{равное}} = \frac{\text{H}}{4{,}899}, \tag{3.6}$$

Тогда

$$\sigma_{\text{равное}} = \frac{\text{H}}{4{,}899} = \frac{3}{4{,}899} = 0{,}612.$$

Полученные результаты представлены в табл. 3.3, столбец 14.

Устойчивость – это косвенная оценка надёжности стохастического процесса. Формулы расчёта данной характеристики представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2. Формулы для расчёта устойчивости средствами табличного процессора Microsoft Excel

Значение	Ячейка рабочего листа	Формула в ячейке
1	2	3
Устойчивость, %		
Нормальное распределение	H6	=2*NORMDIST(1/H6,0,1,1)-1; где H6 – коэффициент вариации (табл. 3.3, столбец 6)
Треугольное распределение	I6	=IF(I6>0.40825,2*(0.5+(1/I6)/6^0.5-(1/I7)^2/12)-1,1); где I6 – коэффициент вариации (табл. 3.3, столбец 7)
Равновероятное распределение	J6	=IF(J6>0.57735,2*(0.5+(1/J6)/2/3^0.5)-1,1); где J6 – коэффициент вариации (табл. 3.3, столбец 8)

Аналогично, расчётам проведённым по формулам (3.1 – 3.6) по точности обработки, проводим расчёты для качества поверхности обработки (табл. 3.4).

Результаты представленные в таблицах 3.3 и 3.4, используются для дальнейшего расчёта коэффициента вариации и интегральной вероятности и

формирования вероятностных таблиц точности.

Вероятностная таблица точности представляет собой трехмерную информационную структуру. состоящие из нескольких плоских слоев (матриц, таблиц) одинаковой размерности. Размерность (количество строк и столбцов матрицы) слоя определяется количеством различных технологических переходов, применимых для обработки поверхностей детали.

Каждый слой вероятностной таблицы представляет собой комбинацию таблицы технологических допусков методы обработки и матрица смежности ориентированного взвешенного полного графа [111].

Ориентированный взвешенный граф – это граф, у которого задано направление рёбер и длины рёбер или веса рёбер. Если задаём направление ребра, то это дуга. Весовые характеристики дуг различаются для разных слоев одной и той же вероятностной таблицы, поскольку они определяется значениями изменения каждого отдельно рассматриваемого качества обработки показатель в результате соответствующего (j-го) технологического перехода после i-го.

В дополнительных слоях таблицы вероятностей статистические оценки значимости изменения критерия качества обработки могут быть выражены в виде взвешенных по значению коэффициента вариации рассматриваемого критерия V_{ij} и значения вероятности изменения $\Phi(V_{ij})$, рассчитываемый по значению коэффициента вариации по так называемому «пессимистическому» прогнозу.

Введя в структуру взвешенного ориентированного графа две дополнительные вершины — «исток» и «сток», мы переходим к понятию транспортной сети. Математические модели и алгоритмы, основанные на вероятностных таблицах точности, позволяют учитывать лежащий в основе процесс маршрутизации как оптимальную транспортную задачу, для формального решения которой требуются методы линейного программирования. По сути, мы предлагаем трактовать множественную обработку как виртуальный процесс вывода продукта из состояния заготовки (источник транспортной сети) в состояние готового продукта (цель). В качестве целевых функций можно рассматривать следующие традиционные

критерии оптимизации:

- производительность обработки;
- технологические затраты;
- стоимость инструмента и т.д. [111].

Для построения вероятностной таблицы точности вычисляем коэффициент вариации точности обработки по закону распределения (Гаусса, Симпсона и равновероятности). Полученные результаты представлены в табл. 3.3, 3.4.

Коэффициент вариации точности обработки для каждого закона распределения определяется по формуле (3.1).

Коэффициент вариации точности обработки для нормального распределения:

$$V_{гаусс_i} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|} = \frac{\sqrt{0{,}5^2 + 0{,}33^2}}{|13{,}5 - 11|} = 0{,}24$$

Коэффициент вариации точности обработки для треугольного закона распределения:

$$V_{симпсон_i} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|} = \frac{\sqrt{0{,}866^2 + 0{,}577^2}}{|13{,}5 - 11|} = 0{,}416$$

Коэффициент вариации точности обработки для равновероятного закона распределения:

$$V_{равное_i} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|} = \frac{\sqrt{0{,}612^2 + 0{,}408^2}}{|13{,}5 - 11|} = 0{,}294$$

Полученные результаты коэффициента вариации по точности представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.3. Точность обработки. Оценка надёжности уточненных данных

Этапы обработки	Точность размеров				6,000	3,464	4,899	Делитель					
					Точность размеров								
	IT		Средн.	Раз-мах	Вариация			Устойчивость, %			Среднеквадратичное		
	min	max			Гаусс	Симп сон	Рав-ное	Гаусс	Симп сон	Рав-ное	Гаусс	Симп сон	Рав-ное
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Фрезерование черновое	12	15	13,5	3	0,148	0,086	0,121	100	100	100	0,500	0,866	0,612
Фрезерование чистовое	10	12	11	2	0,273	0,157	0,223	99,98	100	100	0,333	0,577	0,408
Фрезерование тонкое	7	9	8	2	0,375	0,217	0,306	99,23	21,57	100	0,333	0,577	0,408

Таблица 3.4. Шероховатость поверхности. Оценка надёжности уточненных данных

Этапы обработки	Шероховатость поверхности				6,000	3,464	4,899	Делитель					
					Шероховатость поверхности								
	Ra, мкм		Средн.	Раз-мах	Вариация			Устойчивость, %			Среднеквадратичное		
	min	max			Гаусс	Симп сон	Рав-ное	Гаусс	Симп сон	Рав-ное	Гаусс	Симп сон	Рав-ное
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Фрезерование черновое	5,355	20,237	12,976	14,882	0,031	0,026	0,425	100	100	99,92	2,486	3,045	4.296
Фрезерование чистовое	2,72	15,168	8,944	12,448	0,054	0.044	0,474	100	100	98,08	2,081	2,549	3,594
Фрезерование тонкое	1,36	9,584	5,472	8,224	0,133	0,109	0,495	100	100	97,22	1,371	1,679	2,374

Таблица 3.5. Коэффициент вариации точности обработки

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
1	2	3	4
Закон нормального распределения (Гаусса)			
Фрезерование черновое	∞	0,24	0,109
Фрезерование чистовое	0,24	∞	0,157
Фрезерование тонкое	0,109	0,157	∞
Закон треугольного распределения (Симпсона)			
Фрезерование черновое	∞	0,416	0,189
Фрезерование чистовое	0,416	∞	0,272
Фрезерование тонкое	0,189	0,272	∞
Закон равновероятного распределения			
Фрезерование черновое	∞	0,294	0,134
Фрезерование чистовое	0,294	∞	0,192
Фрезерование тонкое	0,134	0,192	∞

Аналогично рассчитывается коэффициент вариации по качеству поверхности. Результаты представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6. Коэффициент вариации качества поверхности обработки

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
1	2	3	4
Закон нормального распределения (Гаусса)			
Фрезерование черновое	∞	0,058	0,035
Фрезерование чистовое	0,058	∞	0,057
Фрезерование тонкое	0,035	0,057	∞
Закон треугольного распределения (Симпсона)			
Фрезерование черновое	∞	0,1	0,061
Фрезерование чистовое	0,1	∞	0,098
Фрезерование тонкое	0,061	0,098	∞
Закон равновероятного распределения			
Фрезерование черновое	∞	0,071	0,043
Фрезерование чистовое	0,071	∞	0,069
Фрезерование тонкое	0,043	0,069	∞

Следующим шагом является определение интегральной вероятности по формуле (2.15). Разделим этот этап на несколько частей.

Первый: определяем интегральную вероятность по формуле:

$$\Phi(V) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int\limits_{-\infty}^{1/V} V^{-2} \cdot e^{-0,5 \cdot V^{-2}} dV, & V < 0,564 \\ 0,5 + \frac{1}{V \cdot \sqrt{6}} + \frac{1}{12 \cdot \sqrt{V^2}}, & 0,564 \leq V < 0,697 \\ 0,5 + \frac{1}{2 \cdot V \cdot \sqrt{3}}, & V \geq 0,697 \end{cases}$$

Так как коэффициент вариации V = 0,24, то он соответствует формуле нормального закона распределения, так как удовлетворяет условию V < 0,564 (0,24 < 0,564).

Тогда

$$\Phi_{ij}(0,24) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int\limits_{-\infty}^{1/V} V^{-2} \cdot e^{-0,5 \cdot V^{-2}} dV = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int\limits_{-\infty}^{1/0,24} 0,24^{-2} \cdot e^{-0,5 \cdot 0,24^{-2}} dV \approx 1,0$$

где i – фрезерование черновое, j – фрезерование чистовое.

Аналогично рассчитываем для остальных этапов обработки. Результаты представлены в табл. 3.7.

Таблица 3.7. Интегральная вероятность точности обработки

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
1	2	3	4
Закон нормального распределения (Гаусса)			
Фрезерование черновое	0	1	1
Фрезерование чистовое	1	0	1
Фрезерование тонкое	1	1	0
Закон треугольного распределения (Симпсона)			
Фрезерование черновое	0	1	1
Фрезерование чистовое	1	0	1
Фрезерование тонкое	1	1	0
Закон равновероятного распределения			
Фрезерование черновое	0	0,992	1
Фрезерование чистовое	0,992	0	1
Фрезерование тонкое	1	1	0

Второй: определяем результирующую интегральную вероятность точности обработки, то есть из табл. 3.7, выбираем наихудший вариант. Полученные результаты записываем в табл. 3.8.

Таблица 3.8. Результирующая интегральная вероятность точности обработки

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	0	0,992	1
Фрезерование чистовое	0,992	0	1
Фрезерование тонкое	1	1	0

Третий: определяем коэффициент вариации относительно результирующей интегральной вероятности. Результаты представлены в табл. 3.9.

Таблица 3.9. Коэффициент вариации точности обработки относительно результирующей интегральной вероятности

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	0	0,416	0,189
Фрезерование чистовое	0,416	0	0,272
Фрезерование тонкое	0,189	0,272	0

Четвёртый: на результирующую интегральную вероятность накладываем ограничение. Разность между средним квалитетом предыдущей обработки и следующем этапом обработки не более 4. В машиностроении принято, что повышение точности обработки более чем на 4 квалитета не рационально, так как требует значительных затрат.

Интегральная вероятность точности обработки согласно ограничению, представлена в табл. 3.10.

Таблица 3.10. Результирующая интегральная вероятность точности обработки учитывающая ограничения

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	∞	0,992	0
Фрезерование чистовое	0,992	∞	1
Фрезерование тонкое	0	1	∞

Аналогично определяется интегральная вероятность качества поверхности.

1) Определение интегральной вероятности по формуле (2.15). Результаты приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11. Интегральная вероятность качества поверхности

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
1	2	3	4
Закон нормального распределения (Гаусса)			
Фрезерование черновое	0	1	1
Фрезерование чистовое	1	0	1
Фрезерование тонкое	1	1	0
Закон треугольного распределения (Симпсона)			
Фрезерование черновое	0	1	1
Фрезерование чистовое	1	0	1
Фрезерование тонкое	1	1	0
Закон равновероятного распределения			
Фрезерование черновое	0	1	1
Фрезерование чистовое	1	0	1
Фрезерование тонкое	1	1	0

2) Определение результирующей интегральной вероятности (наихудший вариант) качества поверхности. Результаты представлены в табл. 3.12.

Таблица 3.12. Результирующая интегральная вероятность качества поверхности

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	0	1	1
Фрезерование чистовое	1	0	1
Фрезерование тонкое	1	1	0

3) Определение коэффициента вариации качества поверхности относительно результирующей интегральной вариации. Результаты представлены в табл. 3.13.

Таблица 3.13. Коэффициент вариации качества поверхности относительно результирующей интегральной вероятности

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	0	0,1	0,061
Фрезерование чистовое	0,1	0	0,098
Фрезерование тонкое	0,061	0,098	0

На основании полученных результатов мы можем сделать следующие выводы:

Вероятность достижения среднего квалитета чистовой обработки (*IT*11) после выполнения черновой (*IT*12) составляет для 11 квалитета точности – 99,2%, а для 12 квалитета – 100%. А для шероховатости 100%.

Вероятность достижения среднего квалитета тонкой обработки (*IT*8) после выполнения чистовой (*IT*9) составляет для 8 квалитета точности – 99,9%, а 9 квалитета – 100%. А для шероховатости 100%.

3.2. Построение вероятностных таблиц точности справочных данных

Статистический анализ справочных данных проведем на примере фрезерования стали. Исходными данными для обобщённых таблиц точности являются справочные данные [2, 15, 56, 58, 59], которые включают в себя обрабатываемые поверхно-сти, методы обработки, точность размеров (квалитеты точности) и шероховатость поверхностей (*Ra*). Для этого рассчитаем коэффициент вариации и вероятность интегрирования по формулам (2.11 и 2.15).

Для начала сделаем обзор точности обработки при фрезеровании стали (табл. 3.14).

Таблица 3.14. Технологические возможности фрезерных переходов при обработке стали – «эталонные» данные

Метод обработки	Точность размеров						Шероховатость поверхности, *Ra*, мкм					
	Левая граница			Правая граница			Левая граница			Правая граница		
	min	mid	max	min	mid	max	min	mid	max	min	mid	max
Фрезерование черновое	10	11,33	12	10	12,67	14	2,5	4,27	6,3	10	12,83	16
Фрезерование чистовое	9	9,33	10	9	10,33	11	0,32	1,51	3,2	4	5,1	6,3
Фрезерование тонкое	6	7	8	8	8,5	9	0,16	0,43	0,8	1,25	1,37	1,6

По остальным методам обработки плоских поверхностей обобщённая таблица точности обработки представлена в главе 1, табл. 1.4.

Для составления сводной таблицы точности и качества обработки поверхностей (табл. 3.15, 3.16) используем формулы (2.11, 3.1 – 3.6) и следуем формулам, представленным в табл. 3.2.

Коэффициент вариации точности обработки для каждого закона распределения определяется по формуле (2.11).

Коэффициент вариации точности фрезерования стали для нормального закона распределения:

$$\mathrm{V}_{\text{гаусс}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|} = \frac{\sqrt{0{,}667^2 + 0{,}333^2}}{|11 - 9{,}5|} = 0{,}497$$

Коэффициент вариации точности фрезерования стали для треугольного закона распределения:

$$\mathrm{V}_{\text{симпсон}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|} = \frac{\sqrt{1{,}155^2 + 0{,}577^2}}{|11 - 9{,}5|} = 0{,}861$$

Коэффициент вариации точности фрезерования стали для равновероятного закона распределения:

$$\mathrm{V}_{\text{симпсон}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|} = \frac{\sqrt{0{,}861^2 + 0{,}408^2}}{|11 - 9{,}5|} = 0{,}609$$

Таблица 3.15. Точность обработки при фрезеровании стали. Оценка надёжности уточненных данных

Этапы обработки	Точность размеров								6,000	3,464	4,899	Делитель					
									Точность размеров								
	ITminim			ITmaxim			Средн.	Раз-мах	Вариация			Устойчивость, %			Среднеквадратичное		
	min	mid	max	min	mid	max			Гаусс	Симпсон	Равное	Гаусс	Симпсон	Равное	Гаусс	Симпсон	Равное
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Фрезерование черновое	10	11,33	12	10	12,67	14	11,0	4	0,061	0,105	0,074	100	100	100	0,667	1,115	0,816
Фрезерование чистовое	9	9,33	10	9	10,33	11	9,5	2	0,035	0,061	0,043	100	100	100	0,333	0,577	0,408
Фрезерование тонкое	6	7	8	8	8,5	9	8,0	3	0,063	0,108	0,077	100	100	100	0,500	0,866	0,612

Таблица 3.16. Шероховатость поверхности при фрезеровании стали. Оценка надёжности уточненных данных

Этапы обработки	Шероховатость поверхности								6,000	3,464	4,899	Делитель					
									Шероховатость поверхности								
	Raminim			Ramaxim			Средн.	Раз-мах	Вариация			Устойчивость, %			Среднеквадратичное		
	min	mid	max	min	mid	max			Гаусс	Симпсон	Равное	Гаусс	Симпсон	Равное	Гаусс	Симпсон	Равное
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Фрезерование черновое	2,5	4,27	6,3	10	12,83	16	9,25	13,5	0,243	0,421	0,298	100	99,90	100	2,25	3,897	2,756
Фрезерование чистовое	0,32	1,51	3,2	4	5,1	6,3	3,31	5,98	0,301	0,522	0,369	99,91	95,28	100	0,997	1,726	1,221
Фрезерование тонкое	0,16	0,43	0,8	1,25	1,37	1,6	0,88	1,44	0,273	0,472	0,334	99,98	98,16	100	0,24	0,416	0,294

Результаты коэффициентов вариации представлены в табл. 3.17.

Таблица 3.17. Коэффициент вариации точности обработки

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
1	2	3	4
Закон нормального распределения (Гаусса)			
Фрезерование черновое	∞	0,497	0,278
Фрезерование чистовое	0,497	∞	0,401
Фрезерование тонкое	0,278	0,401	∞
Закон треугольного распределения (Симпсона)			
Фрезерование черновое	∞	0,861	0,481
Фрезерование чистовое	0,861	∞	0,491
Фрезерование тонкое	0,481	0,491	∞
Закон равновероятного распределения			
Фрезерование черновое	∞	0,609	0,34
Фрезерование чистовое	0,609	∞	0,491
Фрезерование тонкое	0,34	0,491	∞

Аналогично рассчитывается коэффициент вариации по качеству поверхности. Результаты представлены в табл. 3.18.

Таблица 3.18. Коэффициент вариации качества поверхности обработки

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
1	2	3	4
Закон нормального распределения (Гаусса)			
Фрезерование черновое	∞	0,414	0,27
Фрезерование чистовое	0,414	∞	0,422
Фрезерование тонкое	0,27	0,422	∞
Закон треугольного распределения (Симпсона)			
Фрезерование черновое	∞	0,718	0,468
Фрезерование чистовое	0,718	∞	0,731
Фрезерование тонкое	0,468	0,731	∞
Закон равновероятного распределения			
Фрезерование черновое	∞	0,507	0,331
Фрезерование чистовое	0,507	∞	0,517
Фрезерование тонкое	0,331	0,517	∞

Следующим шагом, является определение интегральной вероятности, по формуле (2.15). Данный этап разделим на несколько частей.

Определение интегральной вероятности согласно формуле:

$$\Phi(V) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int\limits_{-\infty}^{1/V} V^{-2} \cdot e^{-0,5 \cdot V^{-2}} dV, & V < 0,564 \\ 0,5 + \frac{1}{V \cdot \sqrt{6}} + \frac{1}{12 \cdot \sqrt{V^2}}, & 0,564 \leq V < 0,697 \\ 0,5 + \frac{1}{2 \cdot V \cdot \sqrt{3}}, & V \geq 0,697 \end{cases}$$

Так как коэффициент вариации $V = 0,497$, то он соответствует формуле нормального закона распределения, так как удовлетворяет условию $V < 0,564$ ($0,497 < 0,564$).

Тогда

$$\Phi_{ij}(0,497) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int\limits_{-\infty}^{1/V_{ij}} V_{ij}^{-2} \cdot e^{-0,5 \cdot V_{ij}^{-2}} dV = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int\limits_{-\infty}^{1/0,497} 0,497^{-2} \cdot e^{-0,5 \cdot 0,497^{-2}} dV \approx 0,978$$

где i – фрезерование черновое, j – фрезерование чистовое.

Аналогично, рассчитывается для остальных этапов обработки. Результаты представлены в таблице 3.19.

Таблица 3.19. Интегральная вероятность точности обработки

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
1	2	3	4
Закон нормального распределения (Гаусса)			
Фрезерование черновое	0	0,978	1
Фрезерование чистовое	0,978	0	0,994
Фрезерование тонкое	1	0,994	0
Закон треугольного распределения (Симпсона)			
Фрезерование черновое	0	0,946	0,998
Фрезерование чистовое	0,946	0	0,979
Фрезерование тонкое	0,998	0,979	0
Закон равновероятного распределения			
Фрезерование черновое	0	0,835	0,981
Фрезерование чистовое	0,835	0	0,915
Фрезерование тонкое	0,981	0,915	0

Из табл. 3.19 выбираем наихудший результат, получаем результат интегральной вероятности точности обработки, представленный в табл. 3.20.

Таблица 3.20. Результирующая интегральная вероятность точности обработки

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	0	0,835	0,981
Фрезерование чистовое	0,835	0	0,915
Фрезерование тонкое	0,981	0,915	0

Определение коэффициента вариации относительно результирующей интегральной вероятности. Результаты представлены в табл. 3.21.

Таблица 3.21. Коэффициент вариации точности обработки относительно результирующей интегральной вероятности

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	0	0,861	0,481
Фрезерование чистовое	0,861	0	0,694
Фрезерование тонкое	0,481	0,694	0

Определение результирующей интегральной вероятности учитывая ограничение: разность между средним квалитетом предыдущей обработки и следующем этапом обработки не более 4, т.к. повышение точности обработки более чем на 4 квалитета не рационально и требует значительных затрат. Интегральная вероятность точности обработки согласно ограничению, представлена в табл. 3.22.

Таблица 3.22. Результирующая интегральная вероятность точности обработки учитывающая ограничения

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	∞	0,861	0,481
Фрезерование чистовое	0,861	∞	0,694
Фрезерование тонкое	0,481	0,694	∞

Аналогично определяется интегральная вероятность качества поверхности.

Определение интегральной вероятности рассчитывается по формуле (2.15). Результаты приведены в табл. 3.23.

Таблица 3.23. Интегральная вероятность качества поверхности при торцевом фрезеровании

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
1	2	3	4
Закон нормального распределения (Гаусса)			
Фрезерование черновое	0	0,992	1
Фрезерование черновое	0,992	0	0,991
Фрезерование черновое	1	0,991	0
Закон треугольного распределения (Симпсона)			
Фрезерование черновое	0	0,976	0,999
Фрезерование черновое	0,976	0	0,973
Фрезерование черновое	0,999	0,973	0
Закон равновероятного распределения			
Фрезерование черновое	0	0,902	0,984
Фрезерование черновое	0,902	0	0,895
Фрезерование черновое	0,984	0,895	0

Из табл. 3.19 выбираем наихудший результат, получаем результат интегральной вероятности качества поверхности, представленный в табл. 3.24.

Таблица 3.24. Результирующая интегральная вероятность качества поверхности

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	0	0,902	0,984
Фрезерование черновое	0,902	0	0,895
Фрезерование черновое	0,984	0,895	0

Определение коэффициента вариации относительно результирующей интегральной вероятности. Результаты представлены в табл. 3.25.

Таблица 3.25. Коэффициент вариации качества поверхности относительно результирующей интегральной вероятности

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	0	0,902	0,984
Фрезерование черновое	0,902	0	0,895
Фрезерование черновое	0,984	0,895	0

Определение результирующей интегральной вероятности согласно ограничению. Ограничение качества поверхности обработки – затруднительно повысить качество поверхности за один этап обработки в 8 раз. Результаты представлены в табл. 3.26.

Таблица 3.26. Результирующая интегральная вероятность качества поверхности учитывающая ограничения

Этапы обработки	Фрезерование черновое	Фрезерование чистовое	Фрезерование тонкое
Фрезерование черновое	∞	0,902	0,984
Фрезерование черновое	0,902	∞	0,895
Фрезерование черновое	0,984	0,895	∞

По полученным результатам, можно сделать следующие выводы:

Вероятность достижения среднего квалитета чистовой обработки (*IT*9,5) после выполнения черновой (*IT*11) составляет для 9,5 квалитета точности – 83,5%, а для 11 квалитета – 100%. А для получения шероховатости *Ra* 3,31 – 90,2%, а для получения *Ra* 6,3 – 100%.

Вероятность достижения среднего квалитета тонкой обработки (*IT*8) после выполнения чистовой (*IT*9). Вероятность получения 8 квалитета точности – 91,5%, а 9 квалитета – 100%. Вероятность получения шероховатости *Ra* 0,88 равна 89,5%, а *Ra* 1,6– 100%.

3.3. Сравнение полученных результатов

В данном разделе проведено сравнение полученных результатов по справочным и экспериментальным данным на примере фрезерования, то есть сравнение показателей точности и качества фрезерования сталей (справочники) и цветных сплавов (эксперимент), и вероятностные оценки стабильности технологических переходов фрезерования заготовок из цветных сплавов (табл. 3.32, 3.33) и однородность справочных данных (табл. 3.31). В качестве показателя для сравнения используется коэффициент вариации *V*.

Для достижения точности обработки и качества обрабатываемой поверхности в действительности зависит в большей или меньшей степени от разных факторов,

таких как: метод обработки, геометрические параметры инструментов, механические и химические свойства обрабатываемых материалов и т. д.

По табл. 3.27 можно сравнить точность и качество обработанной поверхности в зависимости от физико-механических свойств при многопереходном плоском фрезеровании титанового сплава ПТ-3В, алюминиевого сплава АМг5 по сравнению со сталью 40, 40Х, 08Х18Н10Т [20, 26, 37, 51, 60], ГОСТ 4543-71, ГОСТ 1050-2013, ГОСТ 7350-77.

Таблица 3.27. Точность и качество обрабатываемой поверхности в зависимости от физико-механических свойств при фрезеровании стали и цветных сплавов при Т = 20^0 С

Материал	σ_B, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ5, %	коэфф. теплопроводности λ Вт/(м·град)	зависимость теплопроводности от температуры λ=f(t)	Этап обработки	IT	Ra
сталь 40	570	335	19	49	убывает	чернов.	12 – 14	6,3 – 12,5
						чистов.	9 – 11	3,2 – 6,3
						тонк.	6 – 8	0,8 – 1,6
сталь 40Х	980	785	10	46	убывает	чернов.	12 – 14	6,3 – 12,5
						чистов.	9 – 11	3,2 – 6,3
						тонк.	6 – 8	0,8 – 1,6
сталь 08Х18Н10Т	510	205	43	16	возрастает	чернов.	12 – 14	4,0 – 16,0
						чистов.	9 – 11	1,0 – 4,0
						тонк.	6 – 8	0,32 – 1,25
ПТ-3В	700 – 900	600	10	10	возрастает	чернов.	12 – 15	5,355 – 20,237
						чистов.	10 – 12	2,72 – 15,168
						тонк.	7 – 9	1,36 – 9,584
АМг5	300	110 – 120	12 – 13	121	убывает	чернов.	12 – 14	4,382 – 12,783
						чистов.	9 – 11	2,342 – 10,015
						тонк.	7 – 9	1,125 – 7,418

Из табл. 3.27 видим, что квалитет точности размеров *IT* при многопереходном фрезеровании титанового ПТ-3В и алюминиевого сплава АМг5 существенно не меняется по сравнению со углеродистыми и легированными сталями.

Однако высота микропрофиля Ra при многопереходном фрезеровании титанового ПТ-3В и алюминиевого сплава АМг5 существенно изменяется по

сравнению с фрезерованием углеродистых и легированных сталей. Особенно заметно увеличение среднего отклонения высоты микропрофиля *Ra* на каждом этапе фрезерования. Наиболее очевидно, что при чистовом, тонком фрезеровании высота микропрофиля *Ra* титанового сплава ПТ-3В может быть от 1,17 до 7,67 раз больше, чем при фрезеровании углеродистой и легированной стали, алюминиевого сплава АМг5 - от 1,41 до 5,93 раз. В то же время, как следует из табл. 3.27, предел кратковременной прочности σ_B и предел отношения σ_T титанового сплава ПТ-3В существенно не отличаются по величине по сравнению со углеродистой конструкционной и низколегированной сталью. Для алюминиевого сплава АМг5 величины предела кратковременной прочности и предела пропорциональности существенно отличаются по сравнению с углеродистыми и легированными сталями. Коэффициент теплопроводности титанового сплава ПТ-3В пропорционален его температуре при механической обработке, в отличие от коэффициентов теплопроводности алюминиевого сплава АМг5, углеродистых и легированных сталей.

В результате сравнения технологических допусков различных этапов контурного фрезерования выявлена зависимость ширины технологического допуска (рис. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4) от механических и физико свойств обрабатываемого материала во взаимосвязи с этапом обработки.

Таким образом, приходим к следующему заключению, что шероховатость поверхности при многопереходном фрезеровании титанового сплава ПТ-3В существенно зависит от коэффициента теплопроводности λ, а при многопереходном фрезеровании алюминиевого сплава АМг5 шероховатость поверхности существенно зависит от предела кратковременной прочности σ_B и предела пропорциональности σ_T. При формализованном проектировании технологических маршрутов фрезерования заготовок следует обеспечивать однородность информационного обеспечения, что требует обязательной адаптации технологических справочников к условиям производства и конкретизации условий обработки – не только по этапу обработки и конструкционному материалу, но и с у ч е

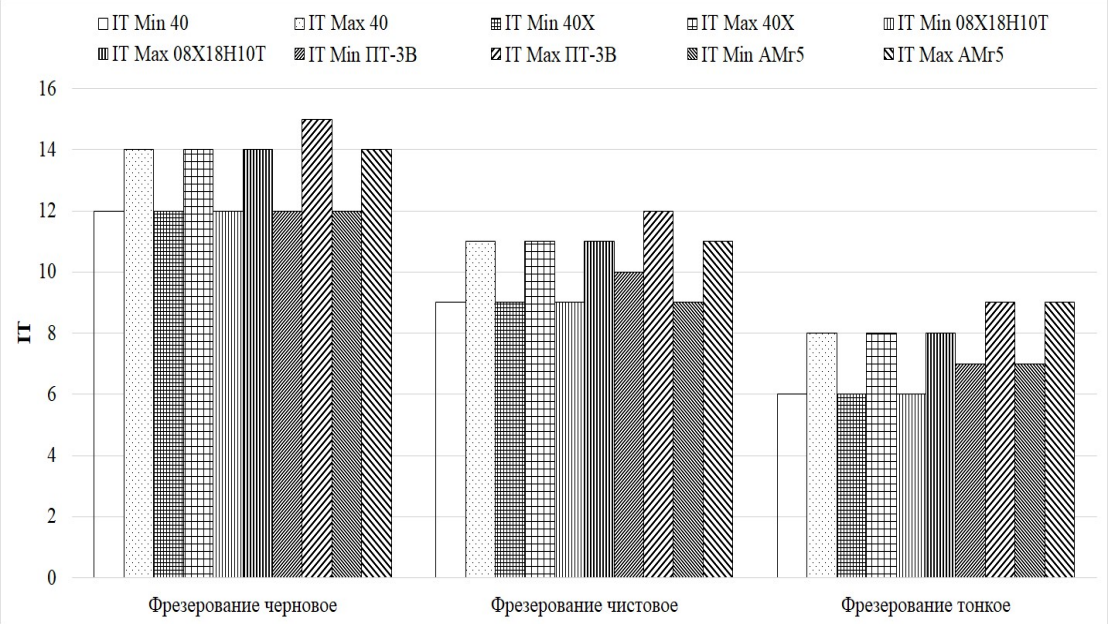


Рис. 3.1– Технологические допуски точности обработки сплава ПТ-3В, АМг5 и аустенитной стали, конструкционных сталей

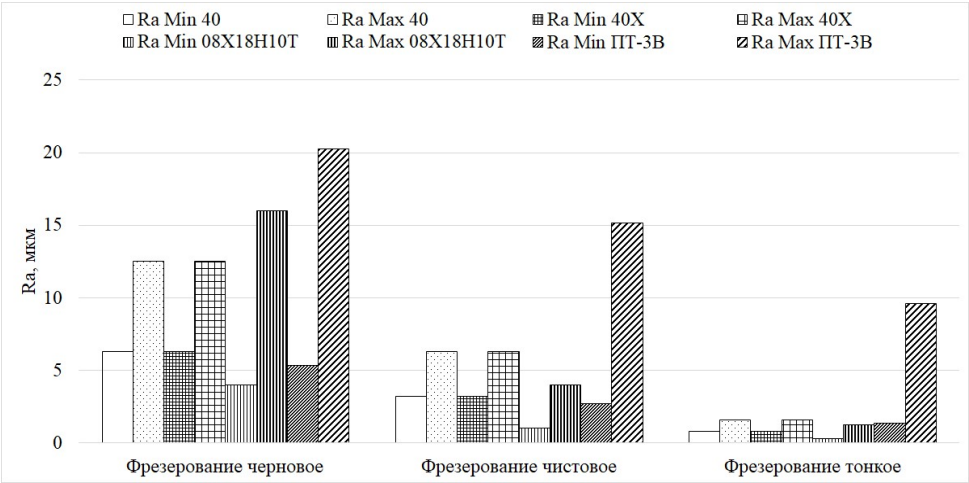


Рис. 3.2 – Технологический допуск качества поверхности титанового сплава ПТ-3В зависит от коэффициента теплопроводности

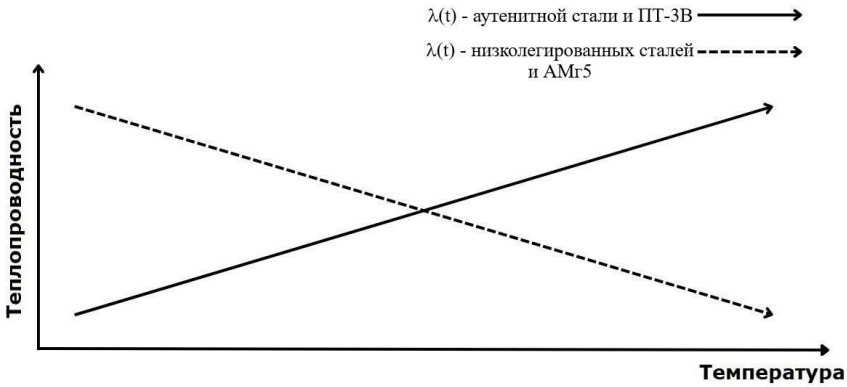


Рис. 3.3 – Качественная оценка взаимосвязи коэффициента теплопроводности конструкционного материала с температурой

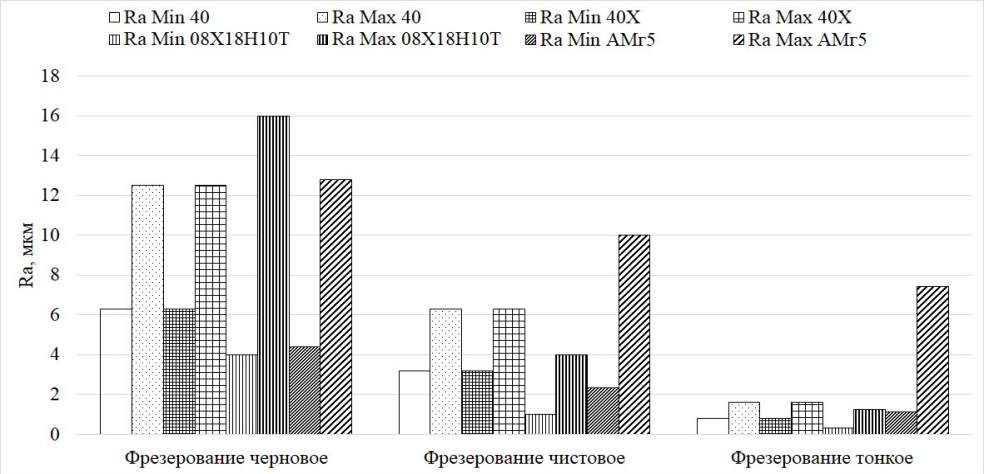


Рис. 3.4 –Технологический допуск качества поверхности титанового сплава АМг5 зависят от пределов кратковременной прочности σ_B и предела пропорциональности σ_T

В качестве «эталонных» – используемых для сравнения с результатами производственного эксперимента, – данных (табл. 3.28) рассмотрены обобщенные [87] справочные рекомендации [2, 15, 56, 58, 59]. Погрешность параметра, характеризующего точность / качество перехода фрезерной обработки оценивается по фактической величине технологического допуска [89].

Таблица 3.28. Технологические возможности фрезерных переходов при обработке стали (справочные рекомендации)

Технологический переход	Шероховатость, *Ra*, мкм		Точность, *IT*	
	минимум	максимум	минимум	максимум
Фрезерование черновое	4,40	13,0	11,0	12,0
Фрезерование чистовое	1,76	5,15	9,5	10,0
Фрезерование тонкое	0,48	1,43	7,0	8,5

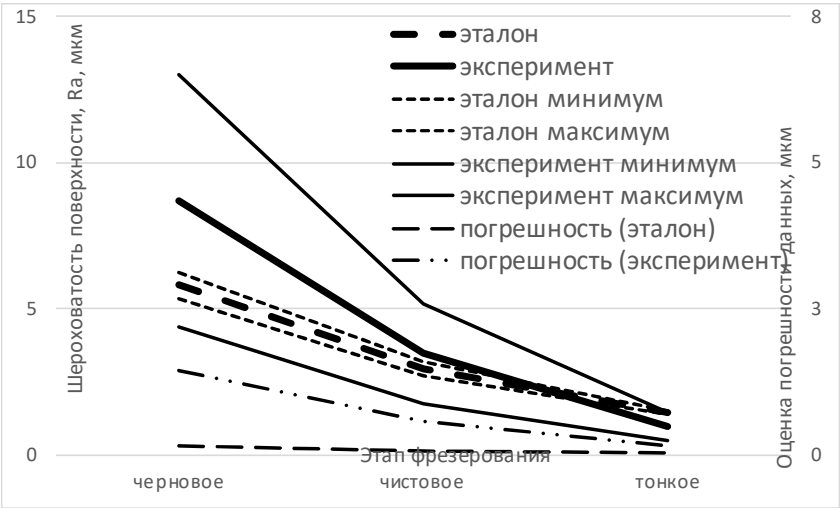


Рис. 3.5 – Изменение показателя качества поверхности при многопереходном фрезеровании

Таблица 3.29. Технологические возможности фрезерных переходов при обработке цветных сплавов и металлов (производственный эксперимент)

Технологический переход	Шероховатость, *Ra*, мкм		Точность, *IT*	
	минимум	максимум	минимум	максимум
Фрезерование черновое	5,36	6,24	12	15
Фрезерование чистовое	2,72	3,17	10	12
Фрезерование тонкое	1,36	1,48	7	9

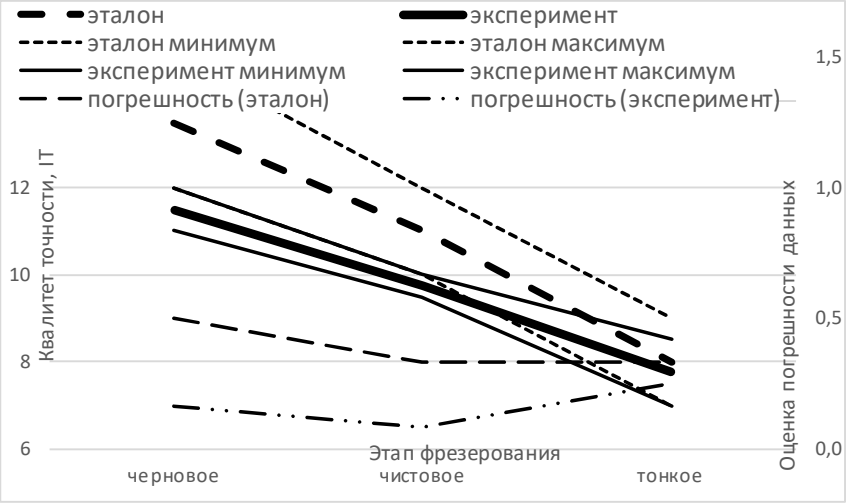


Рис. 3.6 – Изменение показателя точности при фрезеровании

Вероятностную оценку стабильности (табл. 3.30) технологических переходов фрезерования в условиях реального производства (табл. 3.28) и однородность обобщенных справочных данных (табл. 3.29) оценим [87] по величине коэффициента вариации *V*, исходя из предположения о равновероятном – т. наз., «пессимистический» [87] прогноз, – распределении данных в пределах технологических допусков [89].

Таблица 3.30. Оценка стабильности и однородности данных по величине коэффициента вариации

Технологический переход	Эксперимент		Справочник	
	v_{IT}	v_{Ra}	v_{IT}	v_{Ra}
Фрезерование черновое	0,035	0,400	0,090	0,061
Фрезерование чистовое	0,021	0,397	0,074	0,062
Фрезерование тонкое	0,078	0,403	0,101	0,034

Анализируя полученные результаты по точности обработки (табл. 3.30), видно что при фрезеровании черновом V_{IT} по эксперименту равен 0,035, а по справочнику $V_{IT} = 0{,}09$, что означает, что данные различаются в 2,5 раза. При чистовом фрезеровании V_{IT} по эксперименту равен 0,021, а по справочнику $V_{IT} = 0{,}074$, что

означает, что данные различаются в 3,5 раза. При тонком фрезеровании V_{IT} по эксперименту равен 0,078, а по справочнику $V_{IT} = 0{,}101$, что означает, что данные различаются в 1,3 раза.

То есть с точки зрения достижимой точности обработки при обработке цветных металлов и сплавов, показатели существенно отличаются. Коэффициент вариации V, который оценивает надёжность, показывает, что разброс результатов отличается в 1,3 – 3,5 раза.

По качеству поверхности, обратная ситуация: для цветных металлов и сплавов, коэффициент вариации по параметру шероховатости варьируется от 0,397 до 0,403, что показывает, что это заведомо неоднородные нестабильные процессы, которым нельзя доверять. А с точки зрения справочников коэффициент вариации по параметру шероховатости, показывает, что процессы являются однородными и стабильными.

В отношении квалитета точности, коэффициент вариации в 1,3 – 3,5 раза меньше, чем аналогичный параметр для справочника для чёрных металлов, то есть процесс формирования точности на титановых и алюминиевых сплавах является более стабильным, более однородным, чем на сталях.

В отношении параметра шероховатости, справочник для чёрных металлов даёт очень стабильные данные (от 0,03 до 0,06), а эксперимент даёт заведомо неоднородные данные. Это говорит о том, что здесь требуются дополнительные исследования, и что может быть нельзя совмещать в одной группе названия цветные металлы и сплавы – алюминий и титан, хотя они относятся к одной группе по таблице Менделеева, всё равно нельзя. Именно поэтому получается неоднородность экспериментальных данных.

Рассматриваемые технологические переходы следует считать достаточно стабильными с точки зрения обеспечения геометрической точности (для коэффициента вариации $V \leq 0{,}17$ вероятностная оценка однородности [87] $P \geq$

0,999). Также, однородными и для параметра точности и для параметра качества обработанной поверхности являются обобщенные справочные данные.

Вместе с тем следует отметить, что значения коэффициента вариации для процессов формирования микропрофиля в реальном производстве свидетельствуют о неоднородности данных ($V \geq 0{,}33$), т. е., о нестабильности ($P \leq 0{,}95$) технологических переходов фрезерования плоских поверхностей заготовок из цветных металлов и сплавов. Такой же заключение можно сделать из анализа экспериментальных кривых на диаграмме качества поверхности (рис. 3.6). Сопоставление технологических допусков эталонных (штриховые линии) и экспериментальных (сплошные линии) данных показывает, что погрешности оценки качества обработанной поверхности в условиях реального производства существенно – в 7...10 раз, – превышают аналогичные справочные данные.

Очевидно, что достаточно высокая однородность результатов обработки в отношении показателя точности геометрических размеров объясняется несущественными различиями в силовой нагруженности процесса фрезерования материалов со сходными прочностными характеристиками. В то же время, существенные различия теплофизических характеристик обрабатываемых материалов обуславливают различные контактные процессы в зоне резания и, соответственно, различную физическую природу формирования микрорельефа обработанной поверхности. Эти различия следует учитывать при назначении последовательности обработки [89].

В качестве «эталонных» – используемых для сравнения с результатами производственного эксперимента, – данных (табл. 3.32) рассмотрены обобщенные [87] справочные рекомендации. Погрешность параметра, характеризующего качество перехода фрезерной обработки оценивается по фактической величине технологического допуска [93].

Таблица 3.31. Технологические возможности фрезерных переходов при обработке стали (вероятностная таблица)

Метод обработки	Качество, *Ra*, мкм		переход		последующий			Вариация, ν	Стабильность, %	Станд. отклон.
	высокое	низкое			1	2	3			
Фрезерование черновое	2,5	2,5	предыдущий	1		0,29	0,76	∞	0	–
Фрезерование чистовое	4,27	12,83		2			1,52	0,421	98,23	2,756
Фрезерование тонкое	1,51	5,1		3				0,522	94,50	1,221

В табл. 3.31 и следующих критерии «высокое» и «низкое» качество рассчитаны с учетом случайного рассеивания величин и округлены до 10^{-2}. Для оценки стабильности метода обработки мы используем рекомендации [113, 116]. Вероятностная оценка устойчивости рассчитана по величине коэффициента вариации ν в соответствии с методикой оценки однородности (стабильности) справочных данных [87]. Стабильность методов фрезерной обработки в части обеспечения качества поверхности следует оценить, в-целом, как недостаточно высокую ($\nu > 0{,}33$ [116]), средняя оценка вероятности [87] 97,274 % < 99,973 % [113]), что косвенно подтверждает известный тезис о структурной сложности и явно выраженном стохастическом характере процессов формирования качества поверхностного слоя [93].

Аналогичные данные, полученные по результатам производственных исследований контурного фрезерования концевой фрезой, представлены ниже в табл. 3.32, 3.33 для сплава ПТ-3В и в табл. 3.34, 3.35 – для сплава АМг5 [93].

Таблица 3.32. Точность обработки изделий из титанового сплава ПТ-3В

Метод обработки	Точность		Вариация, ν	Устойчивость, %	СтандОтклонение
	высокая	низкая			
Фрезерование черновое	12	15	0,148	100	0,612
Фрезерование чистовое	10	12	0,223	99,98	0,408
Фрезерование тонкое	7	9	0,306	99,23	0,408

Таблица 3.33. Шероховатость поверхности изделий из титанового сплава ПТ-3В после обработки

Метод обработки	Качество, *Ra*, мкм		Вариация, ν	Устойчивость, %	СтандОтклонение
	высокое	низкое			
Фрезерование черновое	5,355	20,237	0,425	99,92	4.296
Фрезерование чистовое	2,72	15,168	0,474	98,08	3,594
Фрезерование тонкое	1,36	9,584	0,495	97,22	2,374

Таблица 3.34. Точность обработки изделий из алюминиевого сплава АМг5

Метод обработки	Точность		Вариация, ν	Устойчивость, %	СтандОтклонение
	высокая	низкая			
Фрезерование черновое	12	14	0,44	100	0,577
Фрезерование чистовое	9	11	0,58	100	0,577
Фрезерование тонкое	7	9	0,72	100	0,577

Таблица 3.35. Шероховатость поверхности изделий из алюминиевого сплава АМг5 после обработки

Метод обработки	Качество, *Ra*, мкм		Вариация, ν	Устойчивость, %	СтандОтклонение
	высокое	низкое			
Фрезерование черновое	4,382	12,783	0,379	100,00	2,425
Фрезерование чистовое	2,342	10,015	0,442	99,42	2,215
Фрезерование тонкое	1,125	7,418	0,490	97,22	1,817

В табл. 3.36, 3.37, 3.38, 3.39 и следующих критерии «высокое» и «низкое» качество рассчитаны с учетом случайного рассеивания величин и округлены до 10^{-2}

Таблица 3.36. Точность изделий из титанового сплава ПТ-3В (вероятностная таблица)

Метод обработки	Точность		переход		последующий			Вариация, ν	Станд. отклон.
	высокое	низкое			1	2	3		
Фрезерование черновое	12	15	предыдущий	1		2,5	5.5	0,148	0,612
Фрезерование чистовое	10	12		2	100		3,0	0,273	0,408
Фрезерование тонкое	7	9		3	99,23	99,98		0,375	0,408

Таблица 3.37. Шероховатость поверхности изделий из титанового сплава ПТ-3В (вероятностная таблица)

Метод обработки	Качество, Ra, мкм		переход		последующий			Вариация, ν	Станд. отклон.
	высокое	низкое			1	2	3		
Фрезерование черновое	5,36	20,24	предыдущий	1		0,67	1,08	0,425	4,296
Фрезерование чистовое	2,72	15,19		2	98,13		1,81	0,474	3,594
Фрезерование тонкое	1,36	9,58		3	95,66	96,51		0,495	2,374

Таблица 3.38. Точность изделий из алюминиевого сплава АМг5 (вероятностная таблица)

Метод обработки	Точность		переход		последующий			Вариация, ν	Станд. отклон.
	высокое	низкое			1	2	3		
Фрезерование черновое	12	14	предыдущий	1		3,0	5,0	0,44	0,577
Фрезерование чистовое	9	11		2	100		2,0	0,58	0,577
Фрезерование тонкое	7	9		3	100	100		0,72	0,577

Таблица 3.39. Шероховатость поверхности изделий из алюминиевого сплава АМг5 (вероятностная таблица)

Метод обработки	Качество, Ra, мкм		переход		последующий			Вариация, ν	Станд. отклон.
	высокое	низкое			1	2	3		
Фрезерование черновое	4,38	12,78	предыдущий	1		0,81	1,12	0,379	2,425
Фрезерование чистовое	2,34	10,02		2	99,17		1,64	0,442	2,215
Фрезерование тонкое	1,13	7,42		3	95,87	97,63		0,49	1,817

Сравнивая величины и изменение технологических допусков (рис. 3.5, 3.6) по шероховатости поверхности и вероятностные оценки стабильности технологических переходов фрезерования заготовок из цветных сплавов (табл. 3.32,…,3.39) и однородность справочных данных (табл. 3.31), приходим к следующему заключению.

1. Технологические допуски по шероховатости поверхности заготовок из цветных сплавов существенно отличаются от рекомендуемых справочных данных. Причем эти отличия относятся не только к ширине поля допуска, но и к расположению границ – высота микронеровностей при обработке цветных сплавов существенно выше [93].

2. Формирование качества поверхностного слоя обусловлено не только геометрическими параметрами инструмента и метода обработки, как принято считать, но и, в существенной мере, физико-химическими процессами, протекающими в зоне контакта «инструмент-заготовка» и, следовательно, физико-механическими свойствами и химическим составом конструкционного материала [93].

3. При формализованном проектировании технологических маршрутов фрезерования заготовок следует обеспечивать однородность информационного обеспечения, что требует обязательной адаптации технологических справочников к условиям производства и конкретизации условий обработки – не только по этапу обработки и конструкционному материалу, но и с учетом инструментального материала и технологических режимов [93].

3.4. Проектирование маршрута обработки с помощью вероятностных таблиц точности

Маршрут обработки отдельной поверхности проектируют, исходя из требований рабочего чертежа и характеристик принятой заготовки. По заданному квалитету точности и шероховатости поверхности с учетом размера, массы и формы детали выбирают возможные методы окончательной обработки [4, 7].

При проектировании маршрута обработки детали мы стремимся значительно повысить точность и качество поверхности в каждом технологическом проходе.

В справочнике нет данных, характеризующих повышение точности и качества, а только на основе опыта и рекомендаций справочников, может дать рекомендуемые значения точности размеров и качества обрабатываемой поверхности, но эти значения могут быть только предварительными. Отсюда следует, что такие значения не могут использоваться для формализации проектирования маршрута обработки. Таким образом, одной из задач, является определение величины, характеризующей степень улучшения рассматриваемых параметров [72].

Рассмотрим технологическую цепочку из двух последовательно выполняемых переходов: чернового и чистового фрезерования, а также чистового и тонкого фрезерования (рис. 3.7, 3.8).

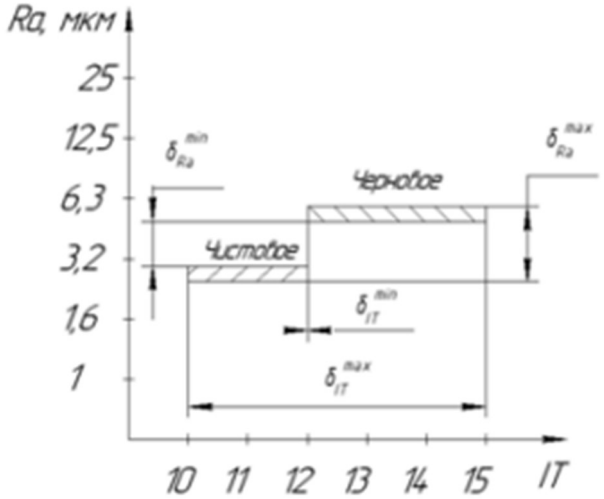


Рис. 3.7 – Технологические допуски методов обработки: чернового и чистового фрезерования

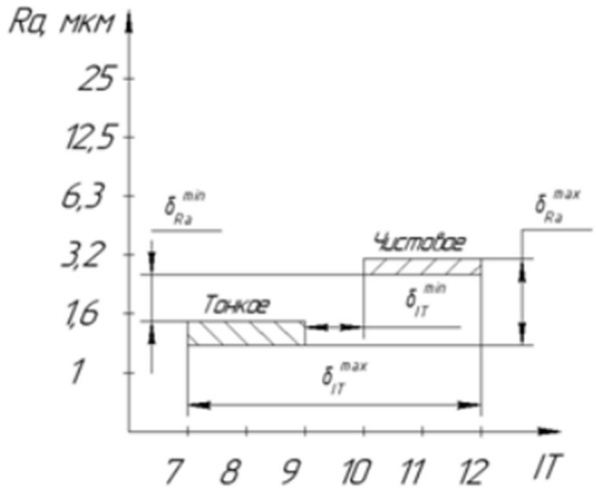


Рис. 3.8 – Технологические допуски методов обработки: чистового и тонкого фрезерования

Для эффективного использования при проектировании математического аппарата необходимо дополнить справочную информацию значениями, определяющими достоверные величины изменения технологических показателей при каждом последующем переходе обработки.

Известно, что последовательность обработки проектируется таким образом [7, 82], чтобы каждая последующая технологическая операция существенно улучшала показатели [63] качества и точности изделия. В то же время, в нормативно-справочной информации отсутствуют значения величин повышения качества.

Существует много методик оценки степени улучшения технологических параметров обрабатываемой детали. Например, измерение состояния поверхностей детали после обработки или вероятность предположения получения качества детали. Воспользуемся приближёнными математическими вычислениями, которые позволят более точно оценить степень улучшения [72]:

Применительно к данным полученным в ходе экспериментальных исследований, сравнивая (3.7) вероятные значения по правилам [53, 97] приближенных вычислений, можно сделать вывод, что высота микронеровностей обработанной поверхности на чистовом этапе может снизиться в 2 раза, а точность получаемых размеров до 3 квалитетов точности.

$$\begin{matrix} \delta_{IT}^{min} = IT_i^{min} - IT_{i-1}^{max} \\ \delta_{IT}^{max} = IT_i^{max} - IT_{i-1}^{min} \end{matrix} \text{ или } \delta_{Ra}^{min} = \frac{Ra_i^{min}}{Ra_{i-1}^{max}};\ \delta_{Ra}^{max} = \frac{Ra_i^{max}}{Ra_{i-1}^{min}} \quad (3.7)$$

где δ_{IT}^{min} , δ_{IT}^{max} – улучшение точности поверхности детали;

δ_{Ra}^{min}, δ_{Ra}^{max} – улучшение качества поверхности детали, мкм.

Будем рассматривать не всю последовательность обработки, а любую смежную пару технологических методов или этапов обработки, показателем каждого из которых является случайная величина.

В первую очередь необходимо произвести сортировку методов обработки согласно этапу технологического проектирования. Обобщенный интервал возможностей технологических методов механической обработки детали с удалением слоя металла представлен в табл. 3.40. В качестве минимальных и максимальных значений приняты усредненные границы технологических допусков.

Таблица 3.40. Технологические возможности методов обработки плоских поверхностей

Метод обработки	Шероховатость поверхности, Ra, мкм		Точность размеров, IT	
	высокое	низкое	высокая	низкая
Фрезерование черновое	5,355	20,237	12	15
Фрезерование чистовое	2,72	15,168	10	12
Фрезерование тонкое	1,36	9,584	7	9

Проанализируем изменение качества поверхности в процессе многостадийной (многоэтапной, многопереходной) механической обработки с привязкой к обобщенным границам технологических допусков этапов обработки. В качестве оцениваемого параметра качества поверхности рассмотрим среднее арифметическое отклонение профиля обрабатываемой поверхности *Ra.*

Поскольку значение шероховатости по параметру *Ra* определяется в результате прямых измерений, в соответствии с рассуждениями, случайная величина *Ra* является непрерывной.

Изменение такой величины в процессе механической обработки следует [80, 83, 88, 92] оценивать по величине отношения средних значений:

$$\Delta Ra_{ij} = \frac{Ra_j}{Ra_i}, \tag{3.8}$$

где Ra_j – среднее значение параметра *Ra*, полученное на предыдущем этапе обработки;

Ra_i – среднее значение параметра Ra, полученное на выполняемом (текущем) этапе обработки.

Поскольку значение квалитета точности определяется сравнением результатов прямых измерений погрешности обработки с предварительно определенными «стандартными» величинами то, в соответствии с рассуждениями, случайная величина IT является дискретной. Изменение такой величины в процессе механической обработки следует [80, 83, 88, 92] оценивать по величине разности средних значений:

$$\Delta IT_{ij} = IT_j - IT_{i,} \tag{3.9}$$

где IT_j – среднее значение параметра IT, полученное на предыдущем этапе обработки;

IT_i – среднее значение параметра $IT,$ полученное на выполняемом (текущем) этапе обработки.

Матрица смежности для графа обработки, определяемого одним показателем качества / точности обработки, формируется на основе вероятностной таблицы точности по контролируемому параметру [90]. Для значимых величин изменения показателя точности в матрице смежности графа обработки отмечается наличие логической связи между соответствующими вершинами графа (значение равно 1). Элемент матрицы смежности, соответствующий несущественному или недостоверному изменению показателя, равен нулю.

Пример построения матриц смежности для переходов обработки плоских поверхностей приведен в табл. 3.41, 3.42.

Таблица 3.41. Изменение показателя точности *IT* и матрицы смежности технологических методо

№	Предыдущий этап обработки	Повышение точности (разность)			Матрица смежности		
		Следующий этап обработки			Следующий этап обработки		
		1	2	3	1	2	3
1	Черновое		**2,46**	**3,96**		**1**	**1**
2	Чистовое	99,2		**1,50**			**1**
3	Тонкое	100	100				
Значения, выделенные жирным, приблизительно соответствуют общепринятым представлениям о структуре технологического процесса (ΔIT<4, ΔRa<4).							

Таблица 3.42. Изменение показателя шероховатости *Ra* и матрицы смежности технологических методов

№	Предыдущий этап обработки	Повышение качества (отношение)			Матрица смежности		
		Следующий этап обработки			Следующий этап обработки		
		1	2	3	1	2	3
1	Черновое		**1,97**	**3,94**		**1**	**1**
2	Чистовое	100		**2,00**			**1**
3	Тонкое	100	100				
Значения, выделенные жирным, приблизительно соответствуют общепринятым представлениям о структуре технологического процесса ($\Delta IT<4$, $\Delta Ra<4$).							

Для формализации задачи технологического проектирования маршрута обработки плоских поверхностей, необходимо произвести оценку степени изменения каждого из анализируемых переходов. В качестве оценки надежности будем использовать показатели вероятности, рассчитанные с помощью коэффициента вариации, только для тех методов обработки, для которых определены все технологические параметры полученные экспериментально (табл. 3.40). Рассмотрим точность обработки и качество поверхности цветных металлов, на примере титановых ПТ-3В и алюминиевых АМг5 сплавов.

Рассмотрим маршрут обработки, для анализируемого показателя точности обработки (квалитет точности *IT*). Результаты определения разности средних значений и коэффициенты вариации представлены в табл. 3.43.

Таблица 3.43. Расчёт величины изменения квалитета

Выше главной диагонали – изменение IT Ниже главной диагонали – коэффициент вариации				
№	Предыдущий этап обработки	Следующий этап обработки		
		2	3	4
2	Черновое		2,46	3,96
3	Чистовое	0,416		1,50
4	Тонкое	0,189	0,272	

Очевидно, что закономерности, установленные раннее, остаются справедливыми и для рассматриваемой таблицы, так как допустимые варианты технологических переходов сгруппировались относительно главной диагонали.

Надежность каждого из переходов, возможно определить с помощью интегральной вероятности, которую необходимо сравнить с доверительной вероятностью. Значение доверительной вероятности должно быть больше 99,73%.

Граф отражающий структуру составленной табличной матрицы изображен на рис. 3.9

На представленном рисунке тонкой линией обозначен переход (2-4) противоречащий общепринятой структуре технологического процесса (после этапа черновой обработки выполняется этап тонкого фрезерования).

Аналогичной методикой будем пользоваться и для составления вероятностных таблиц точности для шероховатости поверхности (табл. 3.44).

Граф отражающий структуру составленной табличной матрицы изображен на рис. 3.9

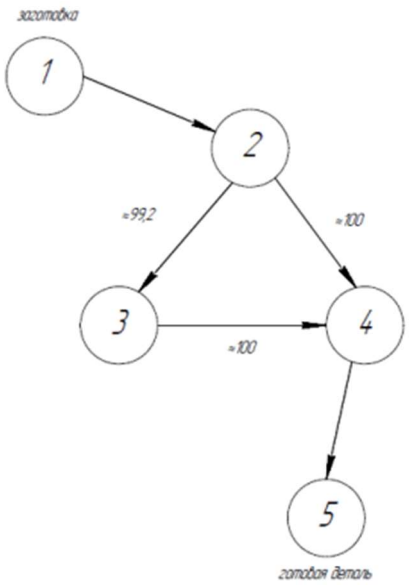


Рис. 3.9 – Граф обработки плоской поверхности по параметру квалитет точности (IT)

Таблица 3.44. Расчёт величины изменения шероховатости

Выше главной диагонали – изменение шероховатости Ниже главной диагонали – коэффициент вариации				
№	Предыдущий этап обработки	Следующий этап обработки		
		2	3	4
2	Черновое		1,97	3,94
3	Чистовое	0,1		2,00
4	Тонкое	0,061	0,098	

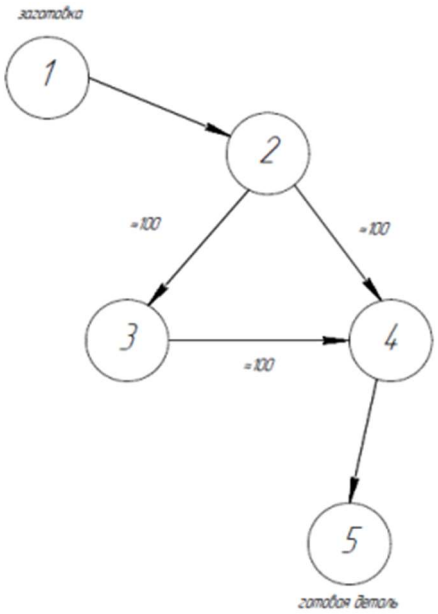


Рис. 3.10 – Граф обработки плоской поверхности по параметру качества поверхности (Ra)

Оценить надёжность каждого перехода, можно с помощью интегральной вероятности, которую необходимо сравнить с доверительной вероятностью.

Надёжность плана обработки по точности для экспериментальных данных определим по формуле (2.17). Для фрезерования чернового интегральная вероятность равна 0,992; для чистового интегральная вероятность равна 1,0; для тонкого интегральная вероятность равна 1,0.

Тогда

$$P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^{n} \Phi(V_i) = 0{,}992 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 = 0{,}992$$

Таким образом, надёжность плана обработки составляет 99,2%, что позволяет сказать, что план обработки является нестабильным, поскольку вероятностная оценка надёжности меньше доверительной вероятности.

Надёжность плана обработки по качеству поверхности определяем аналогично. Для фрезерования чернового интегральная вероятность равна 1,0; для чистового интегральная вероятность равна 1,0; для тонкого интегральная вероятность равна 1,0.

Тогда

$$P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^{n} \Phi(V_i) = 1{,}0 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 = 1{,}0$$

Таким образом, надёжность плана обработки составляет 100%, что позволяет сказать, что план обработки является стабильным.

Далее определим надёжность плана обработки для справочных данных.

Надёжность плана обработки по точности для справочников определим по формуле (2.17). Для фрезерования чернового интегральная вероятность равна 0,835; для чистового интегральная вероятность равна 0,981; для тонкого интегральная вероятность равна 0,915.

Тогда

$$P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^{n} \Phi(V_i) = 0{,}835 \cdot 0{,}981 \cdot 0{,}915 = 0{,}75$$

Таким образом, надёжность плана обработки составляет 75 %, что позволяет сказать, что процесс является нестабильным, поскольку вероятностная оценка надёжности меньше доверительной вероятности.

Надёжность плана обработки по качеству поверхности определяем аналогично. Для фрезерования чернового интегральная вероятность равна 0,902; для чистового интегральная вероятность равна 0,984; для тонкого интегральная вероятность равна 0,895.

Тогда

$$P_{\Sigma} = \prod_{i=1}^{n} \Phi(V_i) = 0{,}902 \cdot 0{,}984 \cdot 0{,}895 = 0{,}79$$

Таким образом, надёжность плана обработки составляет 79 %, что позволяет сказать, что процесс является нестабильным, поскольку вероятностная оценка надёжности меньше доверительной вероятности.

Выводы по 3 главе

1. В результате экспериментального исследования геометрической точности и микропрофиля поверхности заготовок из титанового сплава ПТ-3В и алюмомагниевого сплава АМг5 определены технологические допуски основных этапов фрезерной обработки.
   1.1. Рассчитаны средние значения и вероятность изменения показателей качества обработки для различных комбинаций этапов обработки.

1.2. Построены вероятностные таблицы точности для каждого из исследованных цветных сплавов.

2. В результате анализа нормативно-справочных данных построены вероятностные таблицы точности обработки углеродистых и низколегированных сталей.
3. Выявлены и обоснованы с позиций теории вероятностей существенные – в 1,17…7,67 крат для сплава ПТ-3В, в 1,4…5,9 крат для сплава АМг5, в зависимости от этапа обработки, – различия в качестве обработанной поверхности, оцениваемом по среднему отклонению высоты микропрофиля Ra, в сравнении с аналогичным показателем качества поверхности из углеродистых и низколегированных сталей.
4. Показано, что показатели геометрической точности достижимые при многопереходном фрезеровании заготовок из цветных сплавов в сравнении с углеродистыми и низколегированными сталями различаются несущественно – в пределах погрешности измерений.
5. Показано, что на качество фрезерованной поверхности заготовок из алюминиевых сплавов наиболее существенное влияние оказывают прочностные характеристики обрабатываемого материала – аналогично свойствам и механизму формирования микропрофиля у углеродистых и низколегированных сталей перлитного и феррито-перлитного классов.
6. Показано, что на качество фрезерованной поверхности заготовок из титанового сплава ПТ-3В наиболее существенное влияние оказывают теплофизические свойства обрабатываемого материала, что объясняется увеличением коэффициента теплопроводности сплава с ростом температуры – аналогично свойствам и механизму формирования микропрофиля у аустенитных коррозионностойких сталей.
7. Показано, что повышение надежности технологических маршрутов требует проектирования по таблицам точности, адаптированным к условиям конкретного производства.

Результаты исследования и выводы

1- Проведён анализ справочной литературы с целью дополнения имеющихся таблиц точности по черным металлам, данными по цветным сплавам и металлам, которые способствуют более точному проектированию маршрута обработки детали.

2- Показано, что технологические допуски точности обработки исследованных цветных сплавов незначительно (в пределах 3...5 %) отличаются от технологических допусков углеродистых низколегированных сталей.

3- Показано, что технологические допуски качества обработанной поверхности исследованных цветных сплавов существенно (в 1,02...7,67 раз) превышают допуски для углеродистых низколегированных сталей, следовательно, использование традиционных рекомендаций справочной литературы даст некорректные результаты проектирования маршрута обработки.

3.1. Технологические допуски шероховатости поверхности, получаемые на различных стадиях обработки заготовок из титанового сплава ПТ-3В отличаются от соответствующих технологических допусков обработки углеродистых низколегированных сталей в 1,17...1,61 раз (черновое фрезерование), в 1,17...3,79 раз (чистовое фрезерование), в 1,7...7,66 раз (тонкое фрезерование). Различие определяется особенностями теплофизических свойств сплава ПТ-3В. в частности, возрастанием коэффициента теплопроводности с увеличением температуры.

3.2. Технологические допуски шероховатости поверхности, получаемые на различных стадиях обработки заготовок из алюмомагниевого сплава АМГ5 отличаются от соответствующих технологических допусков обработки углеродистых низколегированных сталей в 1,02...1,44 раз (черновое фрезерование), в 1,37... 2,5 раз (чистовое фрезерование), в 1,41...5,93 раз (тонкое фрезерование). Различие определяется повышенной пластичностью и пониженными прочностными свойствами сплава АМГ5 по сравнению с углеродистыми низколегированными сталями.

4- Определены величины изменения показателей точности и качества обработки

заготовок из титановых (ПТ-3В) и алюмомагниевых (АМГ5) сплавов в зависимости от последовательности переходов в технологическом маршруте и статистические оценки достоверности этих изменений.

5- Разработаны таблицы точности, которые могут быть применены на производстве для построения маршрута обработки.

6- Информация об изменении качества обработки структурирована и оформлена в виде вероятностных таблиц точности – информационного обеспечения формализованного маршрутного проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аршинов В. А., Алексеев Г. А. Резание металлов и режущий инструмент. Изд. 3-е, перераб. И доп. Учебник для машиностроительных техникумов. М., «Машиностроение», 1975. – 440 с. С ил.
2. Балабанов А. Н. Краткий справочник технолога-машиностроителя. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 464 с.
3. Берлинер Э. М.. Повышение точности обработки заготовок на станках с ЧПУ./ Горвый информационного-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. - № 6. – С. 219-222.
4. Васильев А. С. Направленное формирование свойств изделий машиностроения / А. С. Васильев, А. М. Дальский, Ю. М. Золотаревский, А. И. Кондаков / Под ред. дра техн. наук А. И. Кондакова. – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
5. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М.: Физматгиз, 1969. – 576 с.
6. Виттингтон К., В. Власов «Высокоскоростная механообработка». Журнал «САПР и графика». 11/2002.
7. Волков С. А. Разработка методики автоматизации проектирования технологических процессов / С. А. Волков // СТИН, 2008, № 5. – с. 22-26.
8. Вульф А. М. Резание металлов. Изд. 2-е. Л., «Машиностроение» (Ленингр. Отд-ние), 1973, 496 с.
9. Горнев В. Ф. Проблемы и технология комплексной автоматизации / В. Ф. Горнев // Автоматизация проектирования. – 1998, № 4 (10). – С. 40-44; – 1999, № 1 (11). – С. 28-36.
10. ГОСТ 17232-99. Плиты из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия – М. : Мехгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 15 с.
11. ГОСТ 19807-91. Титан и титановые сплавы деформируемые. Марки. – Министерство авиационной промышленности СССР, 1991. – 3 с. (ХИМ СОСТАВ Титан).

12. ГОСТ 4784-2017. Алюминий и алюминиевые сплавы деформируемые. Марки. – М. : Стандартинформ, 2019. – 30 с.
13. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. И приборостр. Спец. Вузов. – М.: Высш. Шк., 1985. – 304 с., ил.
14. Данилевский В. В. Справочник молодого машиностроителя / В. В. Данилевский, – М.: Высшая школа, 1973. – 648 с.
15. Долматовский Г. А. Справочник технолога по обработке металлов резанием – М: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. – 608 с.
16. Дунин-Барковский, И. В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – М. : Машиностроение, 1978.
17. Ермолаев В. В. Обработка металлов резанием, станки и инструменты : учебник : [для программы среднего профессионального образования по специальности "Монтаж, техническое обслуживание и ремонт промышленного оборудования (по отраслям)"] / В. В. Ермолаев. - Москва : Академия, 2019. – 266 с.
18. Ермолаев В. В. Разработка технологических процессов изготовления деталей машин [Текст]: учебник: [для образовательных учреждений, реализующих программы среднего профессионального образования по специальности "Технология машиностроения"] / В. В. Ермолаев, А. И. Ильянков. - 2-е изд. стер. - Москва: Академия, 2017. – 330 с.
19. Ермолаев В. В. Разработка технологических процессов изготовления деталей машин: учебник для студ. Учреждений сред. Проф. Образования / В. В. Ермолаев, А. И. Ильянков. – М. : Издательский центр «Академия», 2015. – 336 с.
20. Ильин А. А., Колачёв Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства, Справочник. - М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. - 520 с.: ил.
21. Ильянков А. И. Технология машиностроения: учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по

специальности "Технология металлообрабатывающего производства" / А. И. Ильянков. - Москва: Академия, 2018. – 349 с.

22. Ингеманссон А. Р. Определение теплопроводности твердосплавного режущего инструмента с многослойными износостойкими покрытиями / А. Р. Ингеманссон, А. А. Бондарев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 97-105.
23. Инструменты конструктора-технолога : спецвыпуск // САПР и Графика. – 2011. – № 1. – 98 с.
24. Кане М. М. Основы научных исследований в технологии машиностроения / М. М. Кане. – Мн. : Вышэйшая школа, 1987. – 232 с.
25. Качество машин : справочник: в 2 Т. Т. 1 / А. Г. Суслов, Э. Д. Браун, Н. А. Виткевич, А. А. Гусев. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с.
26. Качество машин: Справочник. 2 т. Т1/ А. Г. Суслов, Э. Д. Браун, Н. А. Виткевич и др.- М.: Машиностроение, 1995.-256 с.:ил. ISBN 5-217-02707-X.
27. Козлов А. М., Е. В. Кирющенко. Технологическое обеспечение точности фрезерной обработки крупногабаритных деталей/ Известия Орловского государственного технического университета. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», 2012. - № 3 (293). – С. 65-73.
28. Козлов Сергей Вадимович. Повышение качества фрезерованной поверхности деталей из титана / Козлов Сергей Вадимович // Инновации в науке: научный журнал – № 9(85). – Новосибирск, Изд. АНС «СибАК», 2018. – 52 с.
29. Костецкий Б. И. Качество поверхности и трение в машинах / Б. И. Костецкий Н. Ф. Колесниченко. – Киев : Техніка, 1969. – 216 с.
30. Кравцов А. Н. Моделирование технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин / А. Н. Кравцов Н. В. Кравцов; ЗАО «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур). – Изд. 1-е. – Ирбит : ОНИКС, 2010. – 171 с.
31. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 648 с.

32. Кривоухов В. А., Чубаров А. Д. Обработка резанием титановых сплавов. М. : Машиностроение, 1970. 184 с.
33. Лакирев С. Г. Обработка отверстий : Справочник / С. Г. Лакирев. – М. : Машиностроение, 1984. – 206 с.
34. Лемешко Б. Ю. Проверка гипотез о математических ожиданиях и дисперсиях в задачах метрологии и контроля качества при вероятностных законах, отличающихся от нормального / Б. Ю. Лемешко С. С. Помадин // Метрология. 2004. – № 3. – С. 3- 15.
35. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента - М.: Машиностроение, 1982. - 320 с., ил.
36. Маталин А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 511 с.
37. Машиностроение. Энциклопедия. Т. II–3. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. /Под общей редакцией И.Н. Фридляндера. М.: Машиностроение, 2001. 880 с.
38. Металин А. А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». – Л.: Машиностроение, Леннингр. отд-ние, 1985. – 496 с., ил.
39. МИ 2222-92. ГСИ. Рекомендация. Виды измерений. Классификация. – М. : ВНИИМС, 1992.
40. Обеспечение эксплуатационных свойств изделий при автоматизированном проектировании / О. И. Драчев, А. Н. Кравцов, Н. В. Кравцов ; Под ред. Ю. М. Соломенцева ; ЗАО «ОНИКС» (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур). – Ирбит : ОНИКС, 2011. – 257 с.
41. Овсянников В. Е., Некрасов Р. Ю., Темпель Ю. А., Васильев В. И. Использование нейро-нечетких моделей обеспечение точности обработки на станках с ЧПУ./ Известия тульского государственного университета. Технических науки. 2021. - № 3. - С. 249-253.

42. Орлов А. И. Метрика подобия: аксиоматическое введение, асимптотическая нормальность / А. И. Орлов, Г. В. Раушенбах // «Статистические методы оценивания и проверки гипотез» межвуз. сб. науч. ст. – Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 1986. – с. 148-157.
43. Орлов А. И. Нечисловая статистика / А. И. Орлов. – М. : МЗ-Пресс, 2004. – 513 с.
44. Плотников А. Л. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования на основе оперативной информации о свойствах инструмента и детали : дисс... докт. техн. наук : 05.03.01 / А. Л. Плотников. – Саратов, 2001.
45. Повышение эффективности лезвийной и абразивной обработки / В. М. Оробинский, А. И. Курченко, Ю. Н. Полянчиков, Ю. Л. Чигиринский // Наука − производству. − 2000. − № 1. − С. 49–51.
46. Прогнозирование точности и качества при проектировании технологических процессов механической обработки: Учебное пособие. / Компьютерная версия. – 2-е изд., перер. и доп. / С. Н. Корчак, В. И. Гузеев, Г. И. Буторин, др. ; Под общ. ред. В. И. Гузеева. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 66 с.
47. Промышленные цветные металлы и сплавы. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. – М. : Металлургия, 1974. – 488 с.
48. Р-50-601-20-91. Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов (оборудования). – М. : Изд. стандартов, 1991.
49. Радкевич Я. М. Метрология, стандартизация и сертификация / Я. М. Радкевич и др. – М. : Высш. шк., 2006. – 800 с.
50. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. – Киев, 1984. – 272 с.
51. Свойства конструкционных материалов атомной промышленности. Справочник в 8 т. Т. 3. Стали и сплавы для трубопроводов АЭС. /Дегтярев А.Ф., Каширский Ю.В., Козлов Вл.В. и др. Под ред. Вл.В. Козлова, С.В. Стрелкова. М.: ИЦ „Филин”, 2006. 256 с.

52. Сергеев А. С. Проблемы управления качеством механообработки на станках с ЧПУ / А. С. Сергеев, А. Л. Плотников // Современные инновации в науке и технике : матер. междунар. науч.-практ. конф. (14 апр. 2011 г.) / Юго-Западный гос. ун-т, Фак-т инноваций и управления. – Курск, 2011. – С. 107-110.
53. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Корн Г., Корн Т. – М. : Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы, 1984. – 833 с.
54. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королюк, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, А. Ф. Турбин. –М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. литературы, 1985. – 40 с.
55. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. С74 Т.1/Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. 656 с., ил.
56. Справочник технолога / под общей ред. А. Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. – 800 с.
57. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / Дальский А. М., Суслов А. Г., Косилова А. Г., Мещеряков Р. К.; под ред. А. М. Дальского. – 5-е изд., испр. – М. : Машиностроение, 2001, 2003. – 910+943 с.
58. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.1 / под ред. А. Н. Малова. – Москва : Машиностроение, 1973. – 695 с.
59. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т.1 / под ред. П. В. Сыроватченко. – Москва : Машиностроение, 1980. – 607 с.
60. Стали и сплавы. Марочник. Справ. изд. /Сорокин В.Г. и др. Науч. ред. В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 608 с.
61. Суслов А. Г. Качество машин: справочник: в 2 Т. Т. 1 / А. Г. Суслов, Ю. В. Гуляев, А. М. Дальский, Э. Я. Абашин ; под общ. ред. А. Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 1995. – 430+430 с.
62. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.

63. Суслов А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – М. : Машиностроение, 2002. – 684 с.
64. Суслов А. Г. Организационно-технологическое обеспечение оптимальной долговечности изделий машиностроения на всех этапах их жизненного цикла / А. Г. Суслов, И. В. Говоров : справочник // Инженерный журнал, 2010. – № 6.
65. Суслов А. Г. Основы технологии машиностроения [Электронный ресурс] : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машинострои-тельных производств» / А. Г. Суслов. - Москва : КноРус, 2013. – 286 с.
66. Суслов А. Г. Технология машиностроения : [Электронный ресурс] : учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению подгот. бакалавров и магистров «Технология, оборудование и автоматизация машиностроит. пр-в» и направлению подгот. дипломир. специалистов «Конструкторско-технол. обеспечение машиностроит. пр-в» / А.Г. Суслов. - Москва : КноРус, 2013. - 336 с.
67. Суслов А. Г., Дальский А. М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с. С илл.
68. Суслов А.Г., Петрешин Д. И. , Федонин О.Н. , Хандожко В.А. Автоматизация управления параметрами качества поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами деталей машин при обработке резанием // Наукоѐмкие технологии в машиностроении. – 2019. – № 8(98). – С. 28-36.
69. Технология машиностроения: учеб. Пособие /М.Ф. Пашкевич [и др.]; под. Ред. М. Ф. Пашкевича. – Минск: Новое знание, 2008. – 478 с. : ил. – (Техническое образование). ISBN 978-985-475-299-0.
70. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. 496 с., ил.
71. Федотиков А. П. Краткий справочник технолога-машиностроителя / А. П. Федотиков. – М.: Оборонгиз, 1960. – 405 с.

72. Фирсов И. В. Обеспечение точности и качества плоских поверхностей при многопереходной механической обработке сложнолегированной стали : дис. ... канд. техн. наук / И. В. Фирсов ; ВолгГТУ. - Волгоград, 2019. - 134 с.
73. Фролов Е. М. Повышение надежности определения режимов резания в САПР ТП механической обработки : дисс… канд. техн. наук 05.03.01 / Е. М. Фролов. – Волгоград, 2009. – 145 с.
74. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 960 с.
75. Холодкова А. Г. Общая технология машиностроения: Учеб. пособие для нач. проф. образования / А. Г. Холодкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 224 с. ISBN 5-7695-1923-1.
76. Холодкова А. Г. Общие основы технологии металлообработки и работ на металлорежущих станках : учебник / А. Г. Холодкова. - Москва : Академия, 2018. – 255 с.
77. Цельный твердосплавный инструмент. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mega-tec.ru (Дата обращения 10.04.23).
78. Чигиринская Н. В. Методика статистического оценивания надежности процесса / Н. В. Чигиринская, Ю. Л. Чигиринский // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып. 5: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 8. – С. 53–57.
79. Чигиринская Н. В. Планирование эксперимента в задачах техники и экономики : учеб. пособие / Н. В. Чигиринская, Ю. Л. Чигиринский, А. С. Горобцов; ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – 93 с.
80. Чигиринский Ю. Л. Refining the permissible parameter ranges in formalizing path design / Ю. Л. Чигиринский, Ю. Н. Полянчиков // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32, № 2. – С. 189-191. – Англ.
81. Чигиринский Ю. Л. Анализ границ диапазонов достижимых значений параметров качества и точности механической обработки / Ю. Л. Чигиринский // Инновации в машиностроении : матер. I междунар. науч.-практ. конф. (7–9 окт. 2010 г.) : межвуз. сб. / Бийский технол. ин-т (филиал)

Алтайского гос. техн. ун-та им. И. И. Ползунова [и др.]. – Бийск, 2010. – С. 21–25.

82. Чигиринский Ю. Л. Возможность формализованного решения задач технологического проектирования / Ю. Л. Чигиринский // СТИН, 2009 – № 12 – с. 26-29.
83. Чигиринский Ю. Л. Критерии отличия технологических методов механической обработки / Ю. Л. Чигиринский // СТИН. – 2011. – № 12. – С. 17-21.
84. Чигиринский Ю. Л. Математические методы управления процессами механической обработки : монография / Ю. Л. Чигиринский ; Волгогр. гос. техн. ун-т. – Волгоград, 2010. – 139 с.
85. Чигиринский Ю. Л. Методика повышения надежности справочных данных / Ю. Л. Чигиринский // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении», 2011. – № 13. – С. 55-61.
86. Чигиринский Ю. Л. Надежность справочных данных, применяемых в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский / Известия ОрелГТУ. Сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 2-2/274(560). – С. 103–108.
87. Чигиринский Ю. Л. Обеспечение точности и качества поверхностей при многопереходной механической обработке на основе совершенствования информационных и математических средств проектирующей подсистемы САПР ТП : дисс. ... докт. техн. наук : 05.02.08, 05.13.06. – Саратовский гос. техн. университет, Саратов, 2014. – 373 с.
88. Чигиринский Ю. Л. Оценка различия достижимых показателей качества поверхности, обработанной различными технологическими методами / Ю. Л. Чигиринский // СТИН. – № 5, 2011. – С. 32-36.
89. Чигиринский Ю. Л. Повышение точности и качества обработки при многопереходном фрезеровании цветных металлов и сплавов / Ю. Л. Чигиринский, Н. И. Грибанова, В. З. Ву // Известия Волгоградского

государственного технического университета. – 2022. – № 3(262). – С. 43-46. – DOI : 10.35211/1990-5297-2022-3-262-43-46. – EDN : IGSYGF.

90. Чигиринский Ю. Л. Подход к формализации индивидуального маршрутного проектирования / Ю. Л. Чигиринский, С. А. Соловьева, Р. Е. Бехтер // Известия Самарского научного центра РАН. – 2010. – Т. 12, № 1. – С. 581–584.
91. Чигиринский Ю. Л. Статистическая оценка надежности справочных данных в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский // СТИН. – 2010, № 5 – С. 28–30.
92. Чигиринский Ю.Л. Distinguishing between machining methods / Ю. Л. Чигиринский // Russian Engineering Research. – 2012. – Vol. 32, № 3. – С. 291-295. – Англ.
93. Чигиринский Ю.Л. Вероятностная модель изменения микрогеометрии при многопереходном фрезеровании цветных сплавов / Ю.Л. Чигиринский, Ван Занг Ву, Н.В. Чигиринская // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2023. - № 8 (279). - С. 44-47. - DOI: 10.35211/1990-5297-2023-8-279-44-47.
94. Чудаков Е. А. (гл. ред). Машиностроение. Энциклопедический справочник в 15 т. Т. 1 в 2-х кн. Инженерные расчеты в машиностроении. – М. : Машгиз, 1947 – 548 с.+456 с.
95. Чудаков Е. А. (гл. ред). Машиностроение. Энциклопедический справочник в 15 т. Т. 7. Технология производства машин. – М.: Машгиз, 1948. – 708 с.
96. Шамин В. Ю. Теория и практика размерно-точностного проектирования: монография / В. Ю. Шамин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГу, 2007. – 520 с.
97. Элементы прикладной математики / Я. Б. Зельдович, А. Д. Мышкис. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы, 1972. – 592 с.
98. Ящерицын П. И. и др. Основы резания материалов и режущий инструмент: [Учебник для машиностроит. Спец. вузов]/П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко. – 2-е изд., доп. И перераб. – Мн.: Выш. Школа, 1981. – 560 с., ил.

99. A. Matrasa, R. Kowalczyka. Analysis of machining accuracy during free form surface milling simulation for different milling strategies. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2014, edited by Ryszard S. Romaniuk, Proc. of SPIE Vol. 9290, 929019.

100. Ajitanshu Vedrtnam. Shashi Kant Chaturvedi. Optimizing Machining Process of E31 Steel for Improved Surface Roughness. Invertis Journal of Science & Technology Vol. 12, No. 4, October-December 2019, pp- 153-164.

101. Cheng Q, Sun B, Zhao Y, Gu P. A method to analyze the machining accuracy reliability sensitivity of machine tools based on Fast Markov Chain simulation. Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2016; 18 (4): 552–564,

102. Ebelia Del Angell,* , Rosa Vera2 , Francisco Corvo3. Atmospheric Corrosion of Galvanised Steel in Different Environments in Chile and Mexico. Int. J. Electrochem. Sci., 10 (2015) 7985 – 8004, http://www.mapadecorrosionatmosfericadechile.cl/uploads/publicaciones/Atmospheric%20Corrosion%20of%20Galvanised%20Steel%20in%20Different%20Environments%20in%20Chile%20and%20Mexico.pdf.

103. F. Corvo a , T. Perez b,*, L.R. Dzib b , Y. Martin c , A. Castan˜eda c , E. Gonzalez c , J. Perez c. Outdoor–indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. Corrosion Science 50 (2008) 220–230, https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.06.011.

104. Fang Xiaolong. Zou Xianghe. Zhang Pengfei. Zeng Yongbin. Qu Ningsong. Improving machining accuracy in wire electrochemical micromachining using a rotary helical electrode. Article in The International Journal of Advanced Manufacturing Technology · September 2015.

105. Fritz Klocke E., Kuchie A. (2009) Honing. In: Manufacturing Processes 2. RWTHedition. Springer, Berlin, Heidelberg.

106. H. B. Liu, B. Hou , J. Zhang, and Y.Q. Wang. Improving Machining Accuracy of Thin-Wall Parts Using the Information-Localizing Technology. ICIRA 2015, Part II, LNAI 9245, pp. 701–709, 2015.

107. J. G. Castaño *, C. A. Botero, A.H. Restrepo, E. A. Agudelo, E. Correa, F. Echeverría. Atmospheric corrosion of carbon steel in Colombia. Corrosion Science 52 (2010) 216–223, https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.09.006.
108. João Eduardo Ribeiro, Manuel Braz César, Hernâni Lopes. Optimization of machining parameters to improve the surface quality. Procedia Structural Integrity 5 (2017) 355–362.
109. K. G. Swift and J.D. Booker. Manufacturing Process Selection Handbook. – Butterworth-Heinemann, 2013. – 456 p. Англ.
110. Mateusz Wąsik, Arkadiusz Kolka. Machining accuracy improvement by compensation of machine and workpiece deformation. Procedia Manufacturing 11 (2017) 2187 – 2194.
111. Multidimensional Model of Product Quality Formation / Ю.Л. Чигиринский, Н. Грибанова, А.П. Гонтарь, Н.В. Чигиринская // MATEC Web of Conferences. Vol. 346 : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2021) (Sevastopol, Russia, September 6- 10, 2021) / ed. by S. Bratan, S. Roshchupkin ; Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISIS», Bauman Moscow State Technical University [et al.]. – [Publisher: EDP Sciences],
112. N. V. Yemelyanov, I. V. Yemelyanova, V. L. Zubenko. Improving machining accuracy of CNC machines with innovative design methods. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 042028.
113. Ronald A. Fisher (1954). Statistical Methods for Research Workers (12th ed.). Edinburgh : Oliver and Boyd. 978-0-05-002170-5. ISBN : 978-0-05-002170-5.
114. Sandvik Coromant Catalog solid metal cutting tools. CoroMILL Plura, 2020. – 529p.
115. Shewhart W. A. Statistical Methods from the Viewpoint of Quality Control. – Lancaster Press, Lancaster, PA, 1939. – 501 p.
116. Shewhart, W. A. Statistical Methods from the Viewpoint of Quality Control. – Lancaster Press, Lancaster, PA, 1939. – 501 p. – URL :

https://deming.pro/assets/statistical-method-from-the-viewpoint-of-quality-control-shewhart-walter.pdf.

117. Technology of metal cutting: Guideline / Sandvik Coromant. – Sweden : Elanders Publ., 2009. – 359p.
118. Vadim V. Silberschmidta, Sameh M. A. Mahdyb, Moustafa A. Goudab, Ahmed Naseera, Agostino Maurottoa, Anish Roya. Surface-roughness improvement in ultrasonically assisted turning. Procedia CIRP 13 (2014) 49 – 54.
119. Widia. Turning tool: Catalogue. – Germany : Widia Publ., 2017. – 657 p.
120. Yuanyuan Qian1 , Yongxin Li1,4,*, Scott Jungwirth4 , Nicholas Seely4 , Yida Fang4 , Xianming Shi3,2,4,*. The Application of Anti-Corrosion Coating for Preserving the Value of Equipment Asset in Chloride-Laden Environments: A Review. Int. J. Electrochem. Sci., 10 (2015) 10756 – 10780, http://electrochemsci.org/papers/vol10/101210756.pdf.
121. Hoàng Lâm Hồng. Nghiên cứ sự hình thành lớp bảo vệ và khả năng chống mòn của thép bền thời tiết trong điều kiện khí hậu nhiệt đới Viết Nam : дисс. … канд. техн. наук: 9.44.01.29. – Академия наук и технологий, ХаНой 2019. – 113с.

Приложение А

Таблица А1. Замеры по цветным металлам точности

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ											Измерерные						IT	Измерерные						Ra
№	Деталь	Заготовка	IT заг.	Ra заг.	№ тол-щины	Метод обработки	Р-р по чертежу, мм	IT черт.	Ra черт.	Измеряемый р-р, мм	Диаметр 1			Диаметр 2				Диаметр 1			Диаметр 2			
											I	II	III	I	II	III		I	II	III	I	II	III	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	Фланец	Лист ВТ1-0 5,0 ГОСТ 22178-76	16	25	1	Фрезерование черновое	4	14	6,3	4	3,78	3,99	3,82	3,88	3,80	3,78	14	5,67	5,36	5,61	5,36	5,67	5,48	5,52
2	Крышка	Плита ВТ1-0 13х450х900 ГОСТ 23755-79	18	25	2	Фрезерование черновое	11	14	6,3	12	11,74	11,85	11,77	11,69	11,63	11,76	14							
							11	14	6,3	11	11,00	10,90	10,81	10,98	10,90	10,96	13	6,05	5,61	5,42	5,92	5,48	5,48	5,66
					3	Фрезерование черновое	6	14	6,3	6	5,86	5,80	5,89	5,81	5,75	5,85	14	5,42	5,80	5,67	5,80	6,17	6,11	5,83
					4	Фрезерование черновое	4	14	6,3	6	5,88	5,89	5,98	-	-	-	12							
							4	14	6,3	4	3,76	3,82	3,85	-	-	-	14	5,73	6,11	6,24	5,61	5,54	5,67	5,82
3	Кольцо	Плита ВТ1-0 13х450х900 ГОСТ 23755-79	18	25	5	Фрезерование черновое	10	14	6,3	12	11,69	11,82	11,82	11,81	11,84	11,83	14							
						Фрезерование черновое	10	14	6,3	10,5	10,30	10,27	10,13	10,29	10,14	10,23	14	5,73	5,73	5,92	6,24	5,67	6,05	5,89
						Фрезерование чистовое	10	14	3,2	10	9,96	9,98	9,99	9,97	9,98	10,00	10	2,78	2,75	3,01	3,14	3,07	2,75	2,92
					6	Фрезерование черновое	3	14	6,3	4	3,93	3,92	3,84	-	-	-	14	6,24	5,54	6,24	5,86	5,86	6,05	5,96
						Фрезерование чистовое	3	14	3,2	3	2,95	2,99	2,95	-	-	-	11	3,04	2,82	3,10	2,94	2,82	3,17	2,98
					7	Фрезерование черновое	1	14	6,3	1,5	1,33	1,29	1,28	1,38	1,37	1,38	14	6,05	5,80	5,36	5,75	5,42	6,24	5,76
						Фрезерование чистовое	1	14	3,2	1	0,99	0,97	0,96	0,96	0,98	0,95	11	2,72	3,17	3,01	2,88	3,17	2,75	2,95

Продолжение табл. А1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
4	Корпус	Плита ВТ1-0 13х450х900 ГОСТ23755-79	18	25	8	Фрезерование черновое	10	14	6,3	12	11,84	11,80	11,86	11,81	11,94	11,85	13							
						Фрезерование черновое	10	14	6,3	11,5	11,43	11,37	11,45	11,43	11,50	11,31	13	6,11	5,99	6,05	6,05	5,99	5,92	6,02
						Фрезерование чистовое	10	14	3,2	10,2	9,89	9,96	9,93	9,89	9,87	9,88	12	2,75	2,88	3,07	3,01	2,91	2,78	2,9
						Фрезерование тонкое	10	14	1,6	10	10,000	9,970	9,980	9,970	9,990	10,000	9	1,57	1,57	1,38	1,57	1,50	1,39	1,5
					10	Фрезерование черновое	6	14	6,3	6	5,87	5,95	5,94	5,90	5,97	5,85	13	5,54	5,67	5,86	5,99	5,48	5,42	5,66
					11	Фрезерование черновое	3	14	6,3	2	1,92	1,98	1,99	1,99	1,99	1,93	12	6,11	6,05	5,86	5,73	5,61	5,80	5,86
						Фрезерование чистовое	3	14	3,2	2,8	2,78	2,76	2,80	2,80	2,77	2,79	10	3,14	3,17	3,07	3,04	2,85	2,85	3,02
						Фрезерование тонкое	3	14	1,6	3	2,990	3,000	2,980	2,980	2,980	2,980	9	1,42	1,47	1,39	1,50	1,58	1,49	1,48
5	Кольцо	Плита ВТ1-0 13х450х900 ГОСТ 23755-79	18	25	12	Фрезерование черновое	22	14	6,3	23	22,74	22,93	22,89	22,77	22,88	22,74	13							
						Фрезерование черновое	22	14	6,3	22	21,67	21,67	21,63	21,84	21,86	21,81	14	5,36	5,36	6,17	6,11	5,86	5,61	5,74
6	Крышка	Лист ВТ1-0-5,0 ГОСТ 22178-76	16	25	13	Фрезерование черновое	4	14	6,3	4,5	4,27	4,26	4,24	4,42	4,39	4,46	14							
						Фрезерование черновое	4	14	6,3	4	3,97	3,75	3,83	3,80	3,91	3,97	14	5,61	5,99	6,24	5,99	5,36	5,48	5,78
7	Крышка	Лист ВТ1-0-5,0 ГОСТ 22178-76	16	25	14	Фрезерование черновое	4	14	6,3	4,5	4,29	4,27	4,31	4,35	4,41	4,43	14							
						Фрезерование черновое	4	14	6,3	4	3,74	3,89	3,75	3,97	3,87	3,81	14	6,17	5,99	5,48	5,67	5,54	5,48	5,72
8	Фланец	Лист ВТ1-0-5,0 ГОСТ 22178-76	16	25	15	Фрезерование черновое	4	14	6,3	4,5	4,35	4,45	4,46	4,42	4,48	4,39	13							
						Фрезерование черновое	4	14	6,3	4	3,91	3,96	3,91	3,98	3,95	3,96	12	5,73	5,48	5,99	5,80	5,92	5,80	5,79

Продолжение табл. А1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
9	Крышка	Лист ВТ1-0-6,0 ГОСТ 22178-76	16	25	16	Фрезерование черновое	4	14	6,3	4,5	4,27	4,41	4,39	4,39	4,35	4,3	14							
						Фрезерование черновое	4	14	6,3	4	4	3,85	3,87	4	3,98	3,97	13	5,48	6,24	5,73	5,67	5,80	5,54	5,74
10	Крышка	Плита ВТ1-0 10х450х900 ГОСТ 23755-79	18	25	17	Фрезерование черновое	4	14	6,3	19	18,7	18,61	18,81	18,56	18,67,18,65	14								
						Фрезерование черновое	4	14	6,3	18	17,8	17,95	17,94	17,94	17,89	17,89	13	5,54	5,67	5,99	6,17	5,48	5,42	5,71
					18	Фрезерование черновое	4	14	6,3	12	11,73	11,77	11,85	11,76	11,92	11,93	13							
						Фрезерование черновое	4	14	6,3	6	5,79	5,82	5,85	5,83	5,76	5,86	14	5,86	6,11	5,54	5,48	5,99	5,86	5,81
11	Фланец	Плита ВТ1-0 8,0х450х900 ГОСТ 23755-79	18	25	19	Фрезерование черновое	4	14	6,3	31	30,69	30,83	30,73	30,73	30,85	30,65	13							
						Фрезерование черновое	4	14	6,3	30	29,85	29,93	29,79	29,72	29,8	29,71	13	6,05	6,11	6,11	6,17	5,86	5,61	5,99
					20	Фрезерование черновое	4	14	6,3	20	19,96	19,93	19,93	19,96	19,91	20	11	5,92	5,61	5,92	5,36	5,73	6,05	5,76
12	Щека	Лист ВТ1-0-5,0 ГОСТ 22178-76	16	25	21	Фрезерование черновое	4	14	6,3	4	3,99	3,82	3,96	3,81	3,96	3,84	14							
						Фрезерование черновое	4	14	6,3	3,5	3,42	3,36	3,42	3,45	3,49	3,5	13	5,61	5,36	6,11	5,61	6,24	5,80	5,79
13	Крышка	Плита ВТ1-0 16,0 ГОСТ 23755-79	18	25	22	Фрезерование черновое	4	14	6,3	15	14,81	14,99	14,96	14,84	14,93	14,94	13							
						Фрезерование черновое	4	14	6,3	14	13,91	13,81	13,89	13,85	13,92	13,93	13	5,73	5,61	6,17	6,11	5,67	5,92	5,87
					23	Фрезерование черновое	4	14	6,3	11	11	10,99	10,93	10,91	10,94	10,98	11	5,48	6,11	5,73	5,73	5,42	5,48	5,66
					24	Фрезерование черновое	4	14	6,3	3	2,97	2,91	2,91	3	2,95	2,96	12	6,05	5,54	5,73	5,61	6,05	5,86	5,81
					25	Фрезерование черновое	4	14	6,3	5	4,95	4,95	4,93	4,96	4,92	4,94	12	5,36	5,61	5,67	5,67	6,05	6,05	5,73

Продолжение табл. А1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
14	Втулка	Плита ВТ1-0 16,0 ГОСТ 23755-79	18	25	26	Фрезерование черновое	14	14	6,3	15	14,84	14,76	14,68	14,91	14,64	14,65	14	5,54	5,54	5,73	5,67	5,36	5,80	5,61
					27	Фрезерование черновое	14	14	6,3	14	14	13,86	13,9	13,96	13,96	13,92	12	6,05	5,42	6,11	6,24	5,42	5,86	5,85
15	Корпус	Плита ВТ1-0 12,0 ГОСТ 23755-79	18	25	28	Фрезерование черновое	10	14	6,3	11,5	11,47	11,26	11,35	11,32	11,33	11,48	13	5,80	5,92	5,36	5,67	6,17	5,92	5,81
						Фрезерование чистовое	10	14	3,2	10,2	10,11	10,12	10,19	10,14	10,16	10,11	11	2,78	2,78	2,75	2,85	2,91	2,75	2,81
						Фрезерование тонкое	10	14	1,6	10	9,950	9,960	9,990	9,970	9,970	9,960	10	1,55	1,47	1,36	1,38	1,55	1,47	1,46
					29	Фрезерование черновое	6	14	6,3	6	5,98	5,91	5,85	5,99	5,91	5,94	13	5,86	5,36	6,05	6,24	5,99	5,67	5,86
16	Крышка	Плита АМг5 18х350х650 ГОСТ 17232-99	16	25	30	Фрезерование черновое	7	14	6,3	16	15,8	15,87	15,7	15,85	15,71	15,82	14	5,48	5,42	6,05	5,99	5,99	5,99	5,82
17	Бобышка	Лист АМг5.М 10,0 ГОСТ 21631-2019	15	1,25	31	Фрезерование черновое	5	14	6,3	5	4,89	4,99	4,87	4,86	4,98	4,94	13	5,86	6,05	5,67	6,11	6,05	5,48	5,87
18	Бонка	Лист АМг5 10,0х300х600 ГОСТ 21631-2019	15	1,25	32	Фрезерование черновое	6	14	6,3	6	5,82	5,9	5,94	5,97	5,94	5,9	13	5,73	5,67	5,99	5,73	6,24	5,36	5,79
19	Кольцо	Плита АМг5.М 13х350х650 ГОСТ 17232-99	16	25	33	Фрезерование черновое	3	14	6,3	8	7,86	7,91	7,81	7,94	7,95	7,85	13							
					34	Фрезерование черновое	3	14	6,3	3	2,86	2,93	2,82	2,88	2,81	2,82	14	6,05	6,17	5,86	6,11	5,99	5,73	5,99
20	Планка	ист ВТ1-0 8,0 ГОСТ 22178-76	16	25	35	Фрезерование черновое	6	14	6,3	7	6,86	6,83	6,59	6,51	6,59	6,96	15	5,80	5,67	6,24	6,11	5,48	5,61	5,82
21	Втулка	Лист ВТ1-0 2,5 ГОСТ 22178-76	16	25	36	Фрезерование черновое	2,4	14	6,3	2,45	2,3	2,29	2,37	2,39	2,32	2,35	14							
						Фрезерование черновое	2,4	14	6,3	2,4	2,23	2,21	2,22	2,3	2,21	2,24	14	5,73	6,17	5,86	6,05	5,80	6,05	5,94

Продолжение табл. А1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
22	Диск	Лист ВТ1-0 3,0 ГОСТ 22178-76	16	25	37	Фрезерование черновое	1	14	6,3	2	1,92	1,86	1,87	1,83	1,85	1,94	14							
						Фрезерование черновое	1	14	6,3	1	0,97	0,88	0,87	0,96	0,87	0,94	13	5,99	5,99	5,48	5,86	5,92	5,92	5,86
23	Фланец	Лист ВТ1-0 3,0х200х450 ГОСТ 22178-76	16	25	38	Фрезерование черновое	1	14	6,3	2	1,84	1,82	1,92	1,91	1,87	1,84	14							
						Фрезерование черновое	1	14	6,3	1	0,9	0,88	0,89	0,85	0,79	0,84	14	6,24	6,05	5,61	5,73	6,24	6,24	6,02
24	Основание	Лист ВТ1-0 7,0 ГОСТ 22178-76	16	25	39	Фрезерование черновое	4	14	6,3	4	3,87	3,92	3,87	3,84	3,84	3,8	14	5,99	5,61	5,36	6,11	5,73	5,61	5,73
25	Крышка	Лист АМг5.М 5х300х700 ГОСТ 21631- 2019	15	1,25	40	Фрезерование черновое	3	14	6,3	4	3,76	3,78	3,81	3,75	3,86	3,81	14							
						Фрезерование черновое	3	14	6,3	3	2,81	2,86	2,89	2,81	2,33	2,89	14	5,86	5,42	6,05	5,86	6,17	6,17	5,92
26	Корпус	Лист ВТ1-0 10,0 ГОСТ 22178-76	16	25	41	Фрезерование черновое	6	14	6,3	6	5,73	5,77	5,85	5,76	5,75	5,8	14	5,36	5,48	6,24	5,73	5,54	5,80	5,69
27	Корпус	Плита ПТ-3В 38,0 ГОСТ 23755-79	18	25	42	Фрезерование черновое	36	14	6,3	37	36,71	36,63	36,64	36,83	36,97	36,98	13							
						Фрезерование черновое	36	14	6,3	36	35,98	35,93	35,94	35,82	35,88	35,85	12	5,86	6,05	5,86	5,92	6,11	5,99	5,96
					43	Фрезерование черновое	5,5	14	6,3	5,5	5,4	5,45	5,45	5,46	5,43	5,4	12	5,67	6,11	5,99	6,05	5,61	6,17	5,93
28	Диск	Плита ПТ-3В 16,0 ГОСТ 23755-79	18	25	45	Фрезерование черновое	8	14	6,3	8	7,89	7,95	7,82	8	7,82	8	13	5,42	6,17	5,54	5,73	5,42	5,92	5,7
29	Втулка	Плита ВТ1-0 15,0 ГОСТ 23755-79	18	25	45	Фрезерование черновое	14	14	6,3	14,5	14,45	14,47	14,32	14,49	14,34	14,35	12							
						Фрезерование черновое	14	14	6,3	14	13,96	13,81	13,85	13,88	13,96	13,82	13	5,54	5,67	5,54	6,11	5,73	6,11	5,79
30	Крышка	Лист Амг5.М 4,0 ГОСТ 21631-2019	16	1,25	46	Фрезерование черновое	2	14	6,3	2	1,92	1,93	1,88	1,87	1,91	1,81	14	6,05	5,92	5,99	6,11	5,42	5,67	5,86

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДАННОЙ РАБОТЫ

CÔNG TY TNHH JMC
Địa chỉ: Số nhà 8 – Ngõ 2 – Khu phố Hoàng Quốc Việt – P. Đông Ngàn – TP. Bắc Ninh – Việt Nam
Điện thoại: (024) 3698.3570
Fax: (024) 3698.3570
Web: http://www.jmcvietnam.vn - cokhikhuonmaujmc.vn

CHỨNG CHỈ

Về việc triển khai kết quả khoa học luận án tiến sĩ của Vũ Văn Giang

Chứng chỉ này chứng nhận kết quả nghiên cứu luận văn "Nâng cao độ chính xác và chất lượng gia công khi phay nhiều giai đoạn kim loại màu và hợp kim" của Vũ Văn Giang đã được áp dụng cho Công ty TNHH JMC để phát triển và tạo ra các bảng độ chính xác có thể được sử dụng trong quá trình chuẩn bị công nghệ sản xuất các sản phẩm từ hợp kim titan Ti4Al2V và hợp kim nhôm AlMg4.5Mn0.7 để thiết kế hợp lý các trình tự công nghệ để gia công. Các kết quả thu được là khá đầy đủ cho việc sử dụng thực tế của các phương pháp đề xuất.

Bắc Ninh, ngày 20 tháng 4 năm 2023

Giám đốc

CÔNG TY TNHH JMC

Nguyễn Thế Cử

КОМПАНИЯ С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕСТВЕННОСТЮ JMC
(JMC Limited Liability Company)

Адрес: Вьетнам, г. Тусон (Бакнинь), подрайон Донг Нган, квартал Хоанг Куок Вьет, переулок 2, дом №8 (Address: No. 8, Alley 2, Hoang Quoc Viet Quarter, Dong Ngan Ward, Tu Son City, Bac Ninh, Vietnam)
Тел./Tel.: (024) 3698.3570
Факс/Fax: (024) 3698.3570
Web: http://www.jmcvietnam.vn - cokhikhuonmaujmc.vn

«20» апреля 2023 г.

АКТ

О внедрении научных результатов кандидатской диссертационной работы

Ву Ван Занга

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационного исследования Ву Ван Занга «Повышение точности и качества обработки при многопереходном фрезеровании цветных металлов и сплавов» были применены к компание JMC Co., Ltd. для разработки и создания таблиц точности, которые можно использовать при технологической подготовке производства изделий из титанового сплава Ti4Al2V и алюминиевого сплаво AlMg4.5Mn0.7 для рационального проектирования технологических маршрутов механической обработки. Полученные результаты вполне адекватны для практического использования предложенных подходов.

Директор _____Нгуен Тхе Кы