

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт металлургии, машиностроения и транспорта

Кафедра «Технологические процессы и оборудование автоматизированных
машиностроительных производств»

Допускаю к защите

И.О. Зав.кафедрой _____ А.В. Приемышев

«_____» _____ 2015 г.

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Тема: Разработка оптимальных режимов резания при сверлении
труднообрабатываемых материалов

Специальность: 151002 – "МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИЕ СТАНКИ И
КОМПЛЕКСЫ"

Выполнил
студент группы в63329/3

А.А. Дробный

Руководитель
ст. преподаватель

А.В. Никитин

Консультанты:

по экономической части
к.в.н., доцент

В.И. Петрович

по вопросам БЖД
к.т.н., доцент

А.И. Демидов

Рецензент
д.т.н., профессор

Е.П. Калинин

Санкт-Петербург
2015г.

Содержание

	<i>стр.</i>
Введение.....	3
1. Состояние вопроса и задачи исследования.....	6
1.1 Сверление отверстий твердосплавным инструментом.....	6
1.2 Износ инструмента и основные факторы на него влияющие.....	16
1.3 Оптимизация элементов режима резания.....	36
1.4 Выводы и задачи исследования.....	40
2. Методика и условия проведения экспериментальных исследований.....	41
2.1 Оборудование.....	41
2.2 Инструмент.....	42
2.3 Обрабатываемые заготовки.....	43
2.4 Режимы резания и применяемые смазочно-охлаждающие технологические среды.....	44
2.5 Измеряемые параметры и измерительные приборы.....	45
2.6 Математическая обработка результатов экспериментов.....	47
3. Экспериментальные исследования стойкостных зависимостей.....	49
4. Оптимизация элементов режима резания.....	55
5. Рекомендации по внедрению оптимальных режимов резания и технико-экономические показатели обработки.....	66
6. Безопасность жизнедеятельности.....	68
7. Экономическое обоснование исследования.....	80
Заключение - общие выводы.....	90
Литература.....	91

Введение.

По сравнению с другими методами получения деталей машин обработка резанием обеспечивает наибольшую их точность и наибольшую гибкость производственного процесса, создает возможности быстрее перехода от обработки заготовок одного размера к обработке заготовок другого размера.

Режущий инструмент, срезая сравнительно тонкие слои материала, придает заготовке нужную форму и размеры. Работоспособность режущего инструмента, его надежность оказывают существенное влияние на экономическую эффективность процесса производства.

Потребность в режущем инструменте колоссальна. По некоторым операциям обработки заготовки резанием стоимость инструмента составляет значительную часть стоимости операции.

Режущий инструмент обеспечивает внутренние связи процесса обработки. Качество и стойкость инструмента во многом определяют производительность и эффективность процесса обработки, а в некоторых случаях вообще возможность получения деталей требуемых форм, качества и точности. Повышение качества и надежности режущего инструмента способствуют повышению производительности обработки металлов резанием.

Повышение эффективности режущих инструментов и их работоспособность взаимосвязаны и во многом зависят от материала режущей части инструмента. Появление новых инструментальных материалов способствует повышению производительности обработки и требует создания новых конструкций металлорежущих станков.

В настоящее время, в России, имеется свыше 500 стандартов на все виды режущих инструментов массового применения. В стандартах установлены основные конструктивные рабочие размеры инструментов, определяющие их служебное назначение, базовые и присоединительные размеры установки инструмента на станке, параметры и технические требования, определяющие качество и работоспособность инструмента.

При массовом и крупносерийном производстве деталей, в особенности в условиях ГПС, рационально применять инструменты, спроектированные с учетом конкретных условий обработки и оборудования; так называемое адресное проектирование. С развитием производства в условиях ГПС адресное проектирование расширяется.

Исходными для проектирования инструментов являются данные об обрабатываемой заготовке, форма и размеры обработанных поверхностей, их требуемая точность и допустимая шероховатость, материал и его технологические свойства, а также технические данные оборудования, на котором будет производиться обработка, необходимая производительность. По этим данным устанавливают вид инструмента, его конструкцию, материал режущей части и основные параметры.

Для обеспечения требуемой формы и точности обрабатываемых поверхностей, необходимо выполнять сложные расчеты, при проектировании режущих инструментов, расчеты по обеспечению прочности и жесткости инструмента, наименьшему расходу материала, наименьшей потребной для обработки мощности и пр. Эти расчеты необходимо проводить с использованием теоретических положений фундаментальных наук и новейших средств вычислительной техники.

Требования, предъявляемые к режущим инструментам, определяются их служебным положением: обеспечением работоспособного состояния инструмента, т.е. состояния, при котором он способен выполнять обработку резанием, получением требуемой формы, размеров и качества обработанной поверхности заготовок, наибольшей производительностью процесса обработки с наименьшими затратами (экономическая эффективность); кроме того, необходимо выполнить следующие дополнительные требования: возможность и технологичность изготовления и восстановления режущих свойств в процессе эксплуатации, экономия или минимальный расход дефицитных (дорогостоящих) материалов. Возможности обработки резанием обеспечиваются материалом режущей части инструмента, его физико-механическими свойствами, термической обработкой (при необходимости) и

геометрическими параметрами. Получение требуемой формы, размеров и качества обработанных поверхностей детали обеспечивается конструкцией инструмента, формой его режущих кромок. Это требование относится не только к новым, но и к переточенным инструментам, а поэтому следует в конструкции инструмента предусмотреть возможность и технологичность его восстановления (заточки и переточки) или переналадки. Качество поверхности, полученной после обработки, зависит от схемы резания, и последовательности образования требуемой поверхности, геометрических параметров инструмента, шероховатости его режущих кромок. Условий и режима обработки.

Производительность процесса обработки зависит от режимов резания (скорости, глубины, подачи), а, следовательно, от материала режущей части инструмента, его конструкции, геометрических параметров лезвий инструмента, способа отвода теплоты от режущих кромок, зоны резания, условий образования и отвода стружки из рабочей зоны инструмента, числа одновременно работающих режущих кромок и других конструктивных параметров и условий обработки.

Экономическая эффективность процесса обработки зависит от стойкости инструмента и удельных приведенных затрат на единицу продукции. Последние определяются в зависимости от стоимости материала и периода стойкости инструмента, трудоемкости его изготовления и восстановления режущих свойств в процессе эксплуатации и др. Условия эксплуатации инструмента, одна из основных составляющих при разработке его конструкции.

Учет всех вышеперечисленных параметров при проектировании и эксплуатации металлорежущего инструмента, возможно, осуществлять только на базе применения современных методов науки о резании металлов.

1. Состояние вопроса и задачи исследования

1.1 Сверление отверстий твердосплавным инструментом.

Для получения неглубоких отверстий в листовом материале, используются различные способы, обработки металла:

- резка пламенем
- плазменная резка
- лазерная резка
- получение отверстий координатно-пробивными прессами
- получение отверстий гидроабразивными установками
- сверление

В данной работе, рассматриваются вопросы получения точных посадочных отверстий в труднообрабатываемых материалах, в условиях невозможности использования стационарного оборудования.

Данные аспекты, накладывают определенные ограничения на способ получения отверстий. Становится невозможным использование плазменной и лазерной резки, гидроабразивных установок и координатно-пробивных прессов, в связи с отсутствием переносных установок, использующих эти способы получения отверстий, достаточной мощности и энергопотребления.

Единственным видом получения точных посадочных отверстий в труднообрабатываемых материалах, в условиях невозможности использования стационарного оборудования, является процесс сверления.

Сверление – одна из наиболее распространенных операция обработки металлов резанием. Кинематически сверление это сочетание двух движений – главного вращательного и поступательного движения подачи. Вращательное движение может сообщаться как инструменту, так и заготовке. Наиболее общим является сплошное сверление, когда отверстие формируется в сплошном материале установленным диаметром за одну операцию.

Сверление неглубоких отверстий охватывает относительно небольшое отношение глубины отверстия к диаметру. Для отверстий диаметром до 30

мм это $5 - 7 \times D_c$ (где D_c – диаметр отверстия), для небольших диаметров – $2,5 \times D_c$.

К параметрам режима резания при сверлении относятся:

- ✓ частота вращения шпинделя (n), в мин^{-1} ;
- ✓ скорость резания (V_c) – скорость перемещения режущей кромки относительно обрабатываемой поверхности. При известной частоте вращения шпинделя скорость резания определяется следующим образом. На протяжении одного оборота точки, лежащие на периферии сверел описывают окружность длиной $\pi \cdot D_c$. Если диаметр сверла D_c выражен в мм, то результат должен быть разделен на 1000 для того, чтобы обеспечить единицы измерения м/мин. Таким образом получаем известную формулу $V_c = \frac{\pi \cdot D_c \cdot n}{1000}$. Скорость резания изменяется вдоль режущей кромки от максимума на периферии до нуля на оси сверла.
- ✓ подача на оборот (s_n), в мм/об. – выражает движение инструмента или заготовки за один оборот.
- ✓ осевая минутная подача (s_f) в мм/мин – подача инструмента в отношении заготовки или скорость заготовки в отношении инструмента, выраженная длиной перемещения ко времени, за которое это перемещение произошло. Эта величина известна также как машинная подача или подача стола. Очевидно $s_f = s_n \cdot n$.
- ✓ глубина резания (радиальная глубина резания) h_p в мм – часть заготовки, которую перекрывает инструмент. Измеряется, как и при точении, половиной диаметра, т.е. $h_p = \frac{D_c}{2}$.

Если сверлильный инструмент оснащен несколькими режущими кромками (z – количество кромок) используют подачу на кромку (зуб) $s_z = \frac{s_n}{z}$ (мм/зуб).

Очевидно, что определив глубину сверления ($L + h$ в мм) и разделив ее на скорость подачи, получим основное время обработки $T = \frac{(L + h)}{s_f}$ мин.

Большинство сверл для неглубокого сверления имеют две винтовые стружечные канавки для отвода стружки и два режущих лезвия. Стружка, как правило, удаляется подачей смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) через внутренние каналы.

Стружкообразование определяется видом обрабатываемого материала, СОТС и рядом других факторов.

Обычно увеличение подачи или снижение скорости резания уменьшает длину стружки. Длина стружки определяется возможностью ее простого удаления из зоны резания.

Выбор эффективных элементов режима резания обеспечивается в пределах стружколомающей зоны, получаемой экспериментально.

Как известно в процессе резания углы сверла изменяются – передний увеличивается, а задний – уменьшается. Уменьшение заднего угла наибольшее в центре, а, следовательно, он должен быть увеличен от периферии к центру для избежания трения между инструментом и стенкой отверстия.

Передний угол переменен по длине режущей кромки и уменьшается в направлении от периферии к центру. Так как скорость резания имеет такой же характер изменения, что и передний угол, то режущая кромка будет работать в центре очень неэффективно (пластическая деформация происходит при отрицательном переднем угле и скорости резания приближающейся к нулю). Поперечная кромка в центре сжимает и скребет материал, что вызывает появление относительно высокой осевой силы.

Результатом такого нагружения шпинделя может быть получение отверстия с погрешностью (овального). Вследствие этого поперечная режущая кромка значительно уменьшается или совершенно исключается и режущая кромка продлевается по радиусу к центру.

Сверление инструментом, оснащенным современными инструментальными материалами обеспечивает высокую скорость удаления металла и создает большой объем стружки, которая вымывается СОТС, подающейся внутренне или внешне под высоким давлением.

Требуемое давление (МПа) и расход (л/мин.) определяется прежде всего диаметром отверстия, но и также зависит от условий обработки, например, материала заготовки.

При внутренней подаче СОТС (через каналы в инструменте) вращающееся сверло требует более высокого давления, чем не вращающееся, вследствие падения давления от центробежной силы. Расход СОТС с увеличением диаметра сверления растет, а давление падает.

Для расчета требуемой мощности сверления, осевой силы, момента вводится удельная сила резания F_c (Н/мм²). Она определяется как тангенциальная сила, необходимая для снятия стружки сечением 1 мм². Для углеродистой стали (0,8 % С) она составляет 2700 Н/мм², а для алюминиевого сплава – 750 Н/мм².

Удельная сила резания количественно оценивает обрабатываемость материалов при обработке с определенной толщиной стружки и передним углом режущей пластины. F_c уменьшается при увеличении положительного переднего угла и средней толщины стружки. На каждый градус увеличение переднего угла удельная сила резания падает на 1 – 1,5 %. Сила резания при сверлении возникает на режущих кромках, перемычке, поверхности стружки, на ленточках, на периферии сверла.

Сила резания раскладывается на три составляющие – тангенциальную, радиальную и осевую. Величины этих составляющих определяются видом обрабатываемого материала, глубиной резания, подачей и геометрическими параметрами инструмента.

Осевая сила F_p (Н) представляет собой сумму осевых сил F_{pi} , действующих на режущую кромку. Определение осевой силы при сверлении обязательно, так как позволяет убедиться в возможностях механизма подачи станка. Осевая сила увеличивается с увеличением угла в плане φ в соответствии с формулой:

$$F_p = 0,5 \cdot F_c \cdot h_p \cdot s \cdot \sin \varphi.$$

Сила резания раскладывается на три составляющие – тангенциальную, радиальную и осевую. Величины этих составляющих определяются видом

обрабатываемого материала, глубиной резания, подачей и геометрическими параметрами инструмента.

Сила резания раскладывается на три составляющие – тангенциальную, радиальную и осевую. Величины этих составляющих определяются видом обрабатываемого материала, глубиной резания, подачей и геометрическими параметрами инструмента.

Осевая сила F_p (Н) представляет собой сумму осевых сил F_{pi} , действующих на режущую кромку. Определение осевой силы при сверлении обязательно, так как позволяет убедиться в возможностях механизма подачи станка. Осевая сила увеличивается с увеличением угла в плане φ в соответствии с формулой:

$$F_p = 0,5 \cdot F_c \cdot h_p \cdot s \cdot \sin \varphi.$$

Общая тангенциальная сила $F_t = F_c \cdot h_p \cdot s$ (Н) или главная составляющая сила резания обуславливает нагрузку инструмента моментом M в (Н·м). В общем случае, если D_c и d – диаметр отверстия и сердцевины, то при s в мм/об., момент определяется формулой:

$$M = \frac{F_c \cdot s}{1000} \cdot \frac{(D_c^2 - d^2)}{8}, \text{ (Н·м)}.$$

Мощность резания при этом очевидно составляет:

$$N_c = M \cdot \omega;$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n;$$

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D};$$

$$N_c = F_c + \frac{V_c \cdot (D^2 - d^2)}{D \cdot 240000}, \text{ (кВт)}.$$

Зачастую для обработки отверстий используются сверла с устаревшей геометрией, что позволяет обеспечить допуски на размер отверстия лишь в пределах 11 – 13 квалитетов. Достигаемый при этом параметр шероховатости R_a составляет 6,3 – 12,5 мкм.

Применение твердосплавного инструмента повышает скорость резания до четырех раз по сравнению с быстрорежущим. Стойкость такого

инструмента возрастает до 20 раз. При этом обеспечивается шероховатость $Ra = 1 - 2$ мкм и допуски в пределах 8 – 9 квалитетов при глубине сверления $3 \cdot D_c$ (D_c – диаметр сверла) и 9 – 10 квалитетов при большей глубине.

Экспериментальное сравнение работоспособности сверл фирм – ведущих производителей, дало следующие результаты: максимальное количество отверстий просверленное сверлом фирмы Gühring составило 39, при высоком потреблении мощности. Фирмы SST – 25 отверстий со значительными флуктуациями мощности, а затем произошла поломка инструмента. Kennametal – 15 отверстий с поломкой инструмента. Только сверла фирмы Sandvik R840 обеспечили обработку 44 отверстий с постоянной мощностью. При этом режущая способность сверла R840 не была утрачена.

Таким образом, было подтверждено преимущество инструментов фирмы Sandvik и далее в работе рассматриваются инструменты этой фирмы.

При получении посадочных отверстий в алюминиевых, нержавеющей, жаропрочных и титановых сталях и сплавах, встречаются несколько типов отверстий: крепежные отверстия без резьбы и с резьбой, а также точные посадочные отверстия. Такие отверстия подразделяются также на сквозные и глухие.

При сверлении необходимо учитывать следующие основные факторы:

- ✓ отношение диаметра отверстия и его глубины;
- ✓ требуемая точность и качество обработки;
- ✓ тип материала заготовки, его твердость и состояние;
- ✓ возможности станка и оснастки.

Перечисленные факторы влияют на выбор инструмента и способы сверления, а жесткость станка и качество оснастки при получении высокой точности отверстий, в условиях невозможности использования стационарного оборудования, зачастую имеют определяющее значение.

Сверление посадочных отверстий, в листовом материале, сегодня производится на переносных магнитных сверлильных станках с ЧПУ. Это, как правило, достаточно мощные и жесткие станки (применительно к данным

условиям обработки). Широко распространены станки фирмы MAGTRON (U.D.C.E.), HiTech Evolution, Mazak, Nakamura Tome, Okuma Mac, SMT, New Century, Mori Seiki, Tsugami.

- Главная особенность магнитных сверлильных станков — установка и закрепление станка на рабочей поверхности при помощи магнитной подошвы.
- Магнитная подошва позволяет надежно закрепить магнитный сверлильный станок на поверхности обрабатываемой детали в требуемом положении.
- Сила примагничивания достаточна для фиксирования станка на вертикальной поверхности, что еще больше расширяет возможность применения.
- Встроенный микропроцессор не позволит включить сверлильный станок, пока не активирована магнитная подошва.
- Металл рабочей поверхности должен обладать парамагнитными свойствами (притягиваться магнитом) и толщиной не менее 9мм. Если толщина металла недостаточна, то рекомендуется с обратной стороны закрепить лист металла толщиной 8-10мм

Биение системы сверло-патрон не должно превышать 20 мкм во избежание резкого снижения стойкости. Применение патронов CoroGrip обеспечивают биение в пределах 3 – 10 мкм.

Диаметр сверла накладывает определенные ограничения на выбор типа сверла.

Наименьшее отверстие, которое можно получить сверлом с неперетачиваемыми многогранными пластинами имеет диаметр 12,7 мм. Для сверления меньших отверстий нужно использовать цельные спиральные сверла CoroDrill Delta – C. Напайные сверла Coromant Delta применяют для нестабильных условий обработки в диапазоне диаметров 9,5 – 30,4 мм. Максимальные диаметр обработки для сверл Coromant U – 58 мм. Сверла T-

MAX U обеспечивают обработку для сплошного сверления диаметры 60 – 80 мм, для трепанации – 60 – 110 мм.

Анализ возможных диаметров обработки показывает, что для условий данной работы в наибольшей степени подходят сверла CoroDrill Delta – C R 840 и R 850. Сверла R 840 выпускаются в диапазоне диаметров 1,5 – 20 мм (обработка материалов групп ISO P, K, N, S, H). Сверла R840 выпускаются как с наружным подводом СОТС (обрабатываемые материалами P, K, N) так и с внутренним (P, M, K, S, H, N).

Возможности по точности и шероховатости обработки у сверл R 840 и R 850 аналогичны. Эти сверла предназначены для обычного сверления, но обеспечивают хорошее сверление пакетов, и удовлетворительное наклонных поверхностей и пересекающихся отверстий. Работоспособность сверл R 840 по глубине до 5 диаметров, R 850 – до 7 диаметров. Сверла R 840 для обработки стали изготавливают из сплавов GC 1010, GC 1220 и нового комбинированного сплава Twin Grade GC 1030 с покрытием PVD, обеспечивающим высокую стойкость наружного слоя сверла при больших скоростях резания и достаточную прочность внутреннего слоя при низких скоростях резания; для обработки чугунов применяют сплавы GC 1010 и 1220, последний сплав применяют при обработке жаропрочных и титановых сплавов, материалов высокой твердости, а также алюминия. Для обработки алюминия, кроме того, применяют сплавы GC 1010 и GC N20D. Угол в плане φ у сверл R 840 – 70° , у сверл R850 – 110° .

Сверла CoroDrill Delta – C R 850 применяют при сверлении алюминия с содержанием Si менее 12 %. Диапазон диаметров 3 – 14 мм при шаге 0,1 мм. Изготавливают сверла R 850 из твердого сплава – GC N20D.

Сверло R 840 и R 850 имеют одинаковую форму стружечной канавки, которая на 10 % шире и 1,5 % глубже по сравнению со стружечной канавкой сверла R415.5, что обеспечивает хорошую эвакуацию стружки. Это подтверждается характером изменения осевой силы резания, полученным при обработке низколегированной стали в состоянии поставки (HB 175) при скорости $V = 100$ м/мин. и подаче $S = 0,2$ мм/об.

Сверление алюминиевых образцов (*Al* 4007-00, 20 – 27 НВ) сверлами различных конструкций: трехканавочным сверлом, с прямыми канавками, PCD, R 840 и R 850 показало существенное влияние конструкции и заточки сверла на процесс резания (стружкообразования). Результаты сверления, свидетельствуют о преимуществах сверла R 850.

Анализ алюминиевой стружки (6 фрагментов скоростной киносъемки) при обработке сверлом R 840 показывает, что в ряде случаев может обеспечиваться нерациональное стружкообразование.

Фрагменты скоростной киносъемки работы сверла R 850 в течение 28 секунд при обработке алюминия, свидетельствуют, что при обработке сверлом конструкции R850 обеспечивается устойчивое качественное стружкообразование. Центральный режущий элемент 2, содержащий поперечную режущую кромку 1 обеспечивает первоначальный контакт с обрабатываемой заготовкой и последующее устойчивое резание без зацентровки. При начале резания главной режущей кромкой контакт осуществляется по углам наружного диаметра.

Силы резания при сверлении R 850 направлены к центру, что обеспечивает минимальное биение при резании и снижение радиальной нагрузки на шпиндель станка.

Приведены в работе результаты обработки заготовок из алюминиевого сплава *Al* 6061-T6 сверлом R 850 и существующим сверлом при подаче 0,32 мм/об. Применение сверла R 850 обеспечивает устойчивую качественную обработку без заусенцев. Существующее сверло реализует обработку без заусенцев при подачах не более 0,23 мм/об.

Для наглядности приведены примеры обработки заготовок из алюминиевых сплавов сверлом R 850 при сравнении его с обработкой сверлом R415.5. При обработке заготовки, А обеспечивается увеличение скорости подачи на 39 %, с 0,23 мм/об. до 0,32 мм/об. Скорость резания при этом составила 210 м/мин., стойкость 250 мин.

При обработке заготовки, Б обеспечивается 22 %-ное повышение скорости резания – со 180 м/мин. до 220 м/мин. и 70 %-ное увеличение стойкости – с 857 и до 1484 мин.

Анализ стальной стружки при обработке сверлом R 840 показывает, что при обработке сталей данным сверлом обеспечивается рациональное стружкообразование и данное сверло наиболее выгодно к применению по сталям и их сплавам.

Необходимо отметить, что магнитные сверлильные станки, в основном предназначены для работы корончатыми сверлами, основными достоинствами которых являются:

- существенное снижение время сверления и затрачиваемых усилия.
- Корончатое сверло использует 95% приводного усилия, в отличие от спирального, использующего только 25% усилия.
- Не требуется предварительного засверливания, центровка происходит с помощью выталкивающего штифта.
- Отверстия получаются чистые и ровные, без задиров и заусенцев.
- Возможно сверление отверстий внахлест, на краю обрабатываемой детали и сверление отверстий в многослойных пакетах и сэндвич-конструкциях.
- Экономия мощности, при сверлении, позволяет увеличить ресурс станка на 10-15%.

Однако, min Ø отверстий получаемых корончатыми сверлами с напайными твердосплавными пластинами, фирмы JETBROACH, по своим характеристикам схожих, со сверлами R840 и R850, фирмы Sandvik Coromant, составляет 17,5 мм. Исходя из условий данной работы, получение отверстий малого диаметра (т.е. Ø до 20мм), в труднообрабатываемых материалах, корончатые сверла могут применяться при сверлении отверстий в диапазоне диаметров от 17,5 до 20 мм. Кроме того, применение корончатых сверл затруднено для таких материалов, как высококремнистые алюминии и титановые сплавы, в связи с недостаточными режущими свойствами, данных

инструментов, что приводит к снижению производительности и ухудшению качества обработанной поверхности.

1.2 Физические закономерности износа сверл

При рассмотрении в предыдущем разделе вопросов сверления алюминиевых сплавов мы рассматривали инструмент стабильной формы. Однако в процессе резания под действием механических и тепловых нагрузок режущая часть инструмента изменяет свою форму.

Закономерности и скорость изменения формы – необходимые данные для определения оптимальных режимов резания.

Изменения формы режущего инструмента начинают происходить сразу при реализации процесса резания и продолжаются весь период эксплуатации инструмента. Однако в определенный момент времени такие изменения приводят к потере инструментом режущих свойств – он либо перестает срезать припуск с детали, либо не обеспечивает выполнение технических требований, например, по точности и шероховатости обработки. Независимо от причин его вызвавших такое состояние инструмента называется затуплением.

Режущая способность инструмента должна быть восстановлена путем смены многогранной пластины, переточки. При полном исчерпании ресурса работы инструмент утилизируют.

Время работы инструмента до его затупления называется его стойкостью.

Этот показатель характеризует качество инструмента, его режущую способность и позволяет установить связь физических процессов происходящих при резании (износ, потеря прочности) с экономикой резания.

Потеря стойкости инструмента, делающая дальнейшую его эксплуатацию либо нерациональной, либо невозможной может быть обусловлена следующими причинами:

1. Хрупким разрушением инструмента;

2. Вязким разрушением (пластическая деформация);
3. Износом режущих поверхностей.

Рассмотрим более подробно названные причины.

Хрупкое разрушение инструмента, как правило, вызывается возникновением и развитием трещин.

Как известно, в процессе конденсации элементы вещества стремятся занять места в пространстве, соответствующие минимуму потенциальной энергии. Сконденсированные таким образом упругие вещества называются твердыми телами. Расчеты на прочность реальных тел показывают, что их теоретическая прочность до 1000 раз выше прочности реализуемой на практике. Причиной этого являются дефекты структуры твердых тел. Наиболее распространенными являются точечные и линейные дефекты, поверхностные и объемные неоднородности.

Точечные дефекты представлены – дырками (отсутствие атома в структуре кристаллической решетки), при этом в одном месте кристаллической решетки отсутствует атом; дефектами внедрения – одна из частиц застревает в междоузлии кристаллической решетки; дефектами замещения – место в решетке замещается другой частицей. Каждый из дефектов является при нагружении инструмента концентратором напряжений, уменьшает прочность твердого тела.

Линейные несовершенства формируются в процессе кристаллизации в виде блоков кристаллической решетки, сдвинутых по различным направлениям. Линейные нарушения в расположении атомных плоскостей – дислокации приводят к возникновению дополнительных концентраций напряжений и, следовательно, к значительному изменению прочности.

Поверхностные неоднородности (микротрещины) – поверхность границ зерен и дефекты упаковки. Объемные неоднородности – межкристаллические области, внутренние поры и трещины и т.д.

В зависимости от напряженного состояния напряжения на микроучастках могут колебаться. Такие же явления наблюдаются при неравномерном температурном воздействии, когда механические

напряжения возникают вследствие неодинакового расширения различных участков тела. Это приводит к росту, стабилизации или исчезновению микротрещин, интенсивность этих процессов зависит от свойств материала, характера напряженного состояния, температурной обстановки и т.д.

При циклической (например, тепловой) нагрузке развитие трещин обусловлено усталостными явлениями.

Из примера термических трещин на поверхности сверла (на примере сверла R840) видно, что термотрещины представляют собой мелкие трещины, перпендикулярные к режущей кромке. Часто они приводят к выкрашиванию последней, влекут за собой ухудшение качества обработанной поверхности. Причинами разрушений такого вида являются большие температурные колебания, непостоянство подвода СОТС.

В процессе трещинообразования возможно объединение нескольких трещин в одну – магистральную. Магистральная трещина распространяется обычно с очень большой скоростью, вызывая либо выкрашивание инструментального материала (на примере сверла R840) либо полное разрушение инструмента.

Практически выкрашивание рабочих кромок может вызываться неустойчивыми условиями резания, чрезмерным разреженным предельным износом, слишком большой твердостью инструментального материала.

Выкрашивание по уголкам проявляется вследствие нестабильной фиксации инструмента, значительного радиального биения, прерывистого резания.

Поломка сверла бывает обусловлена ненадежным зажимом инструмента, нерациональным режимом обработки (высокой подачей), высокой мощностью шпинделя, забиванием стружкой, чрезмерным износом.

Как известно, склонность к хрупкому разрушению проявляют менее пластичные марки твердого сплава. Об эксплуатационных свойствах материала судят по результатам лабораторных физико-механических испытаний.

При этом проводят металлографический анализ с целью изучить структуру, фазовый состав, состав кобальтовой фазы, пористость и т.д. Поскольку свойства твердых сплавов существенно зависят от состава и структуры, рассмотрим этот вопрос более подробно.

Для сплавов карбид вольфрамо-кобальт предел прочности при изгибе ($\sigma_{изг.}$) с повышением содержания кобальта сначала возрастает, а затем уменьшается, проходя через экстремум при 15 – 20 % кобальта. С увеличением размера зерна WC и, таким образом, кобальтовых прослоек экстремум сдвигается в сторону меньших содержаний кобальта.

С повышением температуры (470 – 670 К) $\sigma_{изг.}$ в начале несколько увеличивается, затем резко падает. Предел прочности при изгибе зависит от содержания в сплаве углерода – кривая имеет максимум при содержании углерода, соответствующем его стехиометрическому содержанию в карбиде вольфрама (6,12 %).

Прочность твердых сплавов при сжатии ($\sigma_{сж.}$) характеризует в некоторой степени пластические свойства.

С ростом зерен карбидной фазы твердость сплава падает. Для твердости сплавов WC-Co и металлического кобальта справедлив закон Мейера: $p = a \cdot d^n$, где p – нагрузка на индентор; d – диаметр отпечатка; a – сопротивление деформации (параметр пластичности); $n = 2$ – безразмерный параметр. В логарифмических координатах эта прямая линия. С повышением температуры твердость сплавов WC-Co снижается почти линейно.

С увеличением содержания Co модуль упругости твердых сплавов снижается. Для WC-Co:

Co, % (об)	...	10	22	37	50	65	90	100
E, ГПа	...	620,0	510,0	430,0	386,0	330,0	230,0	210,0

Путь разрушающей трещины в сплавах WC-Co проходит, главным образом, по границе между цементирующей фазой и карбидными зернами, обходя зерна WC. Однако, при размере зерен карбида вольфрама свыше 3

мкм, трещина проходит и по кобальту и по зернам WC, разрушая их на своем пути.

Таким образом, разрушение начинается в пластической составляющей, что объясняется локализацией пластической деформации в более мягкой составляющей, торможением пластической составляющей твердой и жесткой структурной составляющей. Деформация происходит в более мягкой составляющей и значительно понижена. Такая блокировка обуславливает быстрое исчерпание пластичности этой составляющей, и, учитывая ее меньшую прочность, она первая разрушается.

Для сплавов WC-TiC-Co $\sigma_{изг.}$ до 15 % (вес.) Co не зависит от содержания Co; при большем содержании кобальта $\sigma_{изг.}$ изменяется аналогично вольфрамокобальтовым сплавам.

С увеличением содержания кобальта (> 6 %) $\sigma_{с.ж.}$ немного падает или остается постоянной. Зависимость ударной вязкости от содержания кобальта похожа на зависимость для предела прочности при изгибе. Твердость с увеличением Co падает почти линейно. С ростом размера зерна происходит рост твердости (до 25 % Co), т.е. наблюдается зависимость обратная зависимости WC-Co. Отмеченные закономерности действительны для двухфазных сплавов TiC-WC-Co.

Для двухфазных сплавов трещина, в основном, идет по карбидному каркасу и пересекает кобальтовую фазу. Но степень торможения трещины мала вследствие ее большой длины. Для трехфазных сплавов трещина также проходит по зернам TiC-WC и огибает зерна WC, что особенно заметно при небольших содержаниях кобальта.

Анализ литературных данных по прочности WC-Co сплавов от состава позволяет отметить:

- ✓ прочность на изгиб WC равна 400 – 650 МПа, прочность спеченного Co еще ниже, в то время как прочность сплава, составленного из этих компонентов существенно выше. Например, для сплава BK15 $\sigma_{изг.} = 2000$ МПа;

- ✓ прочность твердых сплавов с увеличением содержания Со увеличивается, а твердость падает. Для обычных гетерогенных сплавов растет как прочность, так и твердость;
- ✓ твердость твердых сплавов аддитивно складывается из твердости составляющих фаз, зависимость прочности от состава носит другой характер.

Эти особенности, вероятно, объясняются структурой твердого сплава. Литературные данные содержат предположение о трех типах строения: сплошная карбидная основа (скелет), образованная при спекании, с включением в эту основу кобальтовой фазы; кобальтовый скелет, тонкие слои которого обволакиваются зернами WC; карбидный «скелет», переплетенный с кобальтовым «скелетом». Последний вид строения в последние годы рассматривается как наиболее вероятный .

Применение теории Гриффитса-Орована позволяет объяснить прочностные зависимости твердых сплавов.

Для хрупкого разрушения зависимость А.Гриффитса между критической величиной трещины и напряжением для ее распространения имеет вид:

$$\sigma_l = \left(\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot l} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где σ_l – напряжение, нормальное к плоскости двумерной трещины, длиной l ;

E – модуль упругости;

γ – поверхностная энергия.

С учетом пластической деформации слоя, прилегающего к поверхности разрушения, Е.Орован уточнил последнюю зависимость:

$$\sigma_l = \left(\frac{2 \cdot E \cdot P}{\pi \cdot l} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ – уравнение Гриффитса-Орована,}$$

где P – работа пластической деформации.

При хрупком разрушении однокарбидного сплава участки цементирующей фазы, прилегающие к поверхности разрушения, пластически деформируются. Работа пластической деформации пропорциональна

площади этих участков, то есть одному S_0 в сплаве. Таким образом $P = a \cdot c$, где c – содержание S_0 , a – коэффициент пропорциональности.

Допуская, что предел прочности определяется напряжением, необходимым для распространения трещины, имеем $\sigma^2 = A_1 E C + K$, где σ – предел прочности; $A_1 = \frac{2 \cdot a}{\pi \cdot l}$ – const.

Таким образом, предел прочности на левых ветвях зависит только от напряжения, необходимого для распространения трещины. Это отражает два случая: если трещины имеются в материале (пористость) и если трещины появляются при нагружении достаточным для их роста до критического размера. Прочностные особенности двух- и трехкарбидных сплавов объясняются особенностями их строения.

Вероятность появления магистральной трещины в инструменте зависит от характера и величины распределения напряжений в режущей части.

Опытным путем установлено, что для существующего характера распределения напряжений сверл R840 и R850 опасными являются сколы, произведение размеров которых (ширина \times глубина) не превышают на режущей части ($\sim \frac{1}{2}$ диаметра сверла): 0,02 – 0,04 мм; на калибрующей части 0,05 мм и на хвостовике 0,1 – 1 мм.

Чтобы сверлом можно было обрабатывать отверстия, его твердость должна превосходить твердость заготовки. При недостаточной твердости инструмента он под воздействием высоких контактных нагрузок и температур начнет пластически деформироваться, терять свои режущие свойства и резание при этом становится невозможным.

Экспериментальные исследования показали, что пластические деформации инструмента начинаются сразу в процессе резания. Однако дальнейшая работоспособность инструмента существенно зависит от соотношения твердостей инструментального материала ИМ и средней твердости стружки.

Для сохранения формы режущей части инструмента необходимо выполнение условия:

$$\frac{H_u}{H_3} > 1,4 - 1,5$$

Твердость современных инструментальных материалов, особенно твердых сплавов, достаточно высока для выполнения условия $\frac{H_u}{H_3} > 1,4 - 1,5$ при невысоких скоростях. Однако с увеличением скорости резания возрастает температура резания, что приводит к снижению твердости материала.

При этом твердость стружки, как правило, не снижается при увеличении температуры в зоне резания. Следовательно, отношение $\frac{H_u}{H_3}$ с увеличением температуры уменьшается и в определенный момент становится $\frac{H_u}{H_3} > 1,4 - 1,5$, что влечет за собой вязкое разрушение инструмента.

Твердость с повышением температуры снижается плавно и достигает предельного значения только при очень высоких температурах. Вследствие этого мгновенное вязкое разрушение для твердосплавных инструментов наблюдается лишь при резании твердых материалов. Однако, вследствие ползучести медленно протекающее пластическое деформирование наблюдается при напряженных режимах работы режущего инструмента, когда температура резания достигает $850^0 - 950^0\text{C}$. Характер применения формы режущей поверхности зависит от ряда факторов, в том числе и от напряженного состояния.

Пластическое деформирование, как правило, сопровождается снижением твердости участков инструментального материала, что влечет за собой износ контактом поверхностей.

Износ контактных поверхностей сверла – результат трения стружки об инструмент и инструмента о поверхность заготовки.

Износ происходит при любых условиях сверления, интенсивность его, при этом, может быть различной.

Трение при резании имеет ряд особенностей, к которым относятся: высокая частота контактирующих поверхностей, высокие температуры и давления.

В соответствии со сложившимся в настоящее время представлением различают четыре основных вида изнашивания при резании:

- ✓ адгезионное;
- ✓ абразивное;
- ✓ диффузионное;
- ✓ окислительное.

Адгезионное изнашивание является результатом адгезионного взаимодействия контактирующих тел.

Как известно, частицы (атомы, ионы, молекулы), находящиеся внутри твердого тела, испытывают со стороны других частиц силовое воздействие. Частицы, находящиеся на границе раздела фаз имеют частично нескомпенсированные связи и испытывают избыточное силовое воздействие со стороны внутренних частиц.

Наличие нескомпенсированных сил участку поверхностного слоя свидетельствуют о том, что они обладают избыточной свободной энергией, которая при отнесении к единице поверхности называется удельной свободной энергией $\sigma_{св}$. Свободная поверхностная энергия примерно равна 1/6 энергии сублимации (энергии перевода твердого вещества в газообразное). Образование молекулярной связи, перпендикулярной к поверхности раздела тел, между поверхностями твердых тел называется адгезией.

Уровень адгезии, как правило, оценивают либо по силе отрыва одного тела от другого, либо по удельной адгезии – отношению силы отрыва к площади адгезионного шва.

Термодинамическая характеристика адгезии – убыль свободной энергии на 1 см² поверхности адгезионного шва в изотермически обработанном процессе.

Работа обратимого адгезионного отрыва:

$$W_a = \sigma_{10} + \sigma_{20} - \sigma_{12},$$

где σ_{12} – поверхностное натяжение на границах фаз;

σ_{10} и σ_{20} – поверхностное натяжение каждой из фаз с окружающей средой.

Адгезия тел в атмосферных условиях обычно бывает небольшой, так как площади контакта поверхностей обычно незначительны и покрыты адсорбционными слоями. Предельные значения наблюдаются при резании, когда площадь контактирования увеличивается, и десорбируются поверхностные слои, так как происходит контакт ювенильно чистых тел в пластическом состоянии.

Если соприкасающиеся поверхности одинаковы, то говорят о когезии (сцеплении), характеризующем прочность тел. По разлому шва между телами судят о характере молекулярного взаимодействия между поверхностями. Если разрыв происходит по границе раздела между телами – адгезионная связь, если по объему одного из тел – когезионная.

При резании на ряде поверхностей наблюдается точечное схватывание соприкасающихся поверхностей. При перемещении поверхностей образовавшиеся связи разрушаются, в это же время возникают новые связи, которые в ближайшее время будут разрушены и т.д.

Разрушение «костяков» схватывания происходит, как правило, не по поверхности раздела, а внутри одного из них. Это, чаще всего, материал стружки или изделия, но иногда происходит и разрушение в инструментальном материале. Для твердых сплавов отделение частицы износа происходит по границам зерен карбидов, то есть разрушению подвергается кобальтовая связка. Такой вид износа называют адгезионным, хотя правильнее было бы назвать когезионным – так как разрыв происходит по объему инструментального материала.

Как известно, при адгезионном изнашивании значительный вклад вносят усталостные явления.

Интенсивность усталостного изнашивания:

$$I = \frac{\Delta h}{L} = \frac{\Delta V_c}{A_c \cdot L} = i \frac{A_r}{A_c},$$

где Δh – толщина изношенного слоя;

L – путь трения;

ΔV_c – контурный объем изношенного материала;

A_c – контурная площадь поверхности контакта;

A_r – площадь практического контакта;

i – удельный износ (отношение фактического объема изношенного материала к площади фактического касания A_r и путь трения, равный диаметру пятна касания d ; $i = \frac{\Delta V_r}{A_r \cdot d}$).

Фактический объем изношенного материала связан с объемом деформируемого при трении V_2 :

$$\Delta V_2 = \frac{V_r}{n},$$

где n – число циклов взаимодействия, приводящего к разрушению объема ΔV_2 .

Как известно $V_r = \frac{h^*}{\nu + 1} \cdot A_2$,

где h^* – максимальное абсолютное внедрение микронеровностей твердости тела;

R_{max} – максимальная высота микронеровностей;

ν и ν – параметры кривой опорной поверхности.

Таким образом

$$I = \frac{h^* \cdot A_r}{(\nu + 1) \cdot n \cdot d \cdot A_c}.$$

Фактическая площадь касания A_r и максимальная глубина h^* зависят от упругопластических свойств материалов, характера микронеровностей, нагрузки. Число циклов до разрушения зависит от свойств материалов.

Интенсивность износа снижается с повышением пластичного инструментального материала.

Разрыв фрикционной связи происходит по плоскости максимальных касательных напряжений τ и локализуется в теле микронеровностей. Линии скольжения, как правило, не соответствуют расположению адгезионного шва. При сдвиге зона пластической деформации локализуется в

микрообразной области. При этом в зоне пластического деформирования происходит массоперенос.

Характерным признаком адгезионного износа является ячеистый вид изношенной поверхности. При установленном выкрашивании внешне изношенные поверхности имеют вид кратеров с рваными краями и глубокой поверхностью.

Адгезионный износ происходит при температурах в зоне резания ниже 900°C . С повышением температуры размеры частиц износа уменьшаются и поверхность становится более гладкой.

Вторым видом изнашивания является абразивное – механическое изнашивание материала в результате режущего или царапающего действия твердых частиц, обладающих различной структурой, формой, размерами, твердого и незначительной адгезией к контактирующим поверхностям. Частицы инструментального материала могут срезаться выступами поверхности изделия или стружки.

Роль твердых частиц в процессе резания могут, например, выполнять карбиды, нитриды, интерметаллиды и др. Большое количество твердых частиц содержится в обрабатываемых материалах, полученных литьем. Поэтому особенно интенсивный абразивный износ наблюдается при работе «по корке». Характерными признаками абразивного износа являются царапины на изношенной поверхности. Царапины, как правило, ориентированы относительно направления движения стружки.

Абразивный износ происходит в основном при низких температурах. При этом изнашивается в первую очередь мягкая составляющая инструментального материала, ослабляется связь карбидных зерен с материалом и тем самым износ в узлах растет.

Трение при наличии абразивных частиц характеризуется нестационарностью контактов, высокой концентрацией напряжений и физико-химической активацией контактирующих поверхностей.

По характеру силового воздействия твердых частиц можно выделить:

- ✓ скольжение детали по монолитному абразиву;

- ✓ качение детали по абразиву;
- ✓ взаимодействие сопряженных поверхностей в контакте с абразивными частицами.

Каждый вид контакта характеризуется определенным напряженно-деформированным состоянием, спектром активации и последующим разрушением поверхности инструмента.

Разрушение поверхности может быть результатом как срезания стружки, то есть однократного взаимодействия частицы и поверхности, так и многократного процесса деформирования.

Корреляционная связь между износостойкостью и другими свойствами материалов показывает, что относительная износостойкость литых металлов прямо пропорциональна твердости $\varepsilon \sim HB$.

Для термообработанных сталей:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha \cdot (HB - HB_0),$$

где ε_0 – относительная износостойкость стали в отожженном состоянии;

α – коэффициент пропорциональности;

HB_0 – твердость стали в отожженном состоянии.

Абразивное изнашивание зависит от формы и размеров частиц, возможности их закрепления на поверхности, соотношения твердости материала H_m и абразива H_a . При $\frac{H_m}{H_a} < 0,5$ возможно прямое разрушение

материала; при $\frac{H_m}{H_a} < 0,7$ процесс, как правило, переходит в многоцикловой.

При взаимодействии массы зерен с поверхностью процесс носит многоцикловой характер.

К третьему виду изнашивания при обработке резанием относится диффузионное изнашивание. Сущность этого вида изнашивания состоит в процессе атомов инструментального материала в деталь или стружку.

Анализ уравнения Фикса, описывающего процесс диффузии

$$m = -q \cdot D \cdot \frac{dc}{dx},$$

где m – скорость диффузии;

q – площадь контакта;

D – коэффициент диффузии;

$\frac{dc}{dx}$ - градиент концентрации диффузирующего вещества на площадке контакта.

показывает, что основными факторами обуславливающими диффузионное изнашивание являются:

- ✓ ювинильно чистые поверхности контакта стружки и инструмента;
- ✓ высокие скорости относительного перемещения инструмента и заготовки.

Эти факторы, с одной стороны, обеспечивают высокий градиент концентрации в первоначальный момент касания, с другой стороны, постоянное обновление площадки касания.

В твердых сплавах диффузии предшествует диссоциация молекул, связывающих компоненты в карбиды. Сложность процесса диффузии в многокомпонентных твердых сплавах обусловлена неодинаковой интенсивностью диссоциации различных карбидов и разной способностью атомов компонентов к диффузионному переходу. Диффузионные процессы, как правило, интенсивно идут при высоких температурах.

При 850 – 900⁰С Лаладзе Т.Н. обнаружил диффузию углерода твердого сплава в сталь, образование η_1 -фазы и разработал схему диффузионного износа сплавов WC-Co и WC-TiC-Co при резании. WC растворился в стали при температуре 850⁰С, TiC-WC при 1000⁰С. Кроме различной скорости растворения наличие фазы TiC-WC способствует задержке растворения WC в стали. Зерна TiC-WC, растворяясь медленнее зерен WC, выступают над поверхностью контакта. Сталь задерживаясь в углублениях между выступающими зернами, насыщается WC, снижает скорость растворения новых зерен WC, из-за уменьшения градиента концентрации. Такая задержка существует до растворения в стали основания зерен TiC-WC и последующего их среза стружкой.

При этом крупные зерна TiC-WC способствуют повышению износостойкости – увеличивают время растворения в них WC и оснований TiC-WC. Однако, так как цветные металлы (медь, алюминий, бронза) не взаимодействуют с карбидами и низкая твердость не приводит к возникновению высоких температур при резании алюминия диффузия, как правило отсутствует.

Сущность коррозионно-механического изнашивания состоит в протекании химических реакций между компонентами поверхностного слоя инструмента и среды. Продукты этого воздействия образуют тонкие пленки, разрушающиеся при контакте.

При трении в воздушной среде преобладает химическая реакция материала с кислородом и коррозионно-механическое изнашивание приобретает свойства окислительного.

Как известно, кристаллическое состояние металлов термодинамически является неустойчивым и стремится перейти в устойчивое ионное (аморфное) состояние. Этому способствует адсорбирование молекул паров и газов, молекул кислорода, воды, поверхностно-активных веществ. Таким образом на границе раздела фаз создаются условия для возникновения химических процессов, разрушающих металл. Процесс самопроизвольного разрушения металлов вследствие физико-химического взаимодействия с окружающей средой – коррозия металлов.

Коррозия металлов характеризуется в основном на окислении.

По механизму окисления различают химический и электрохимический.

Химический тип окисления и восстановления компонента, коррозионной среды происходит за один цикл:

В результате на поверхности образуется чаще всего оксид, значительно отличающийся по свойствам от исходного материала.

Например, при температурах резания 700 – 800⁰С кислород воздуха вступает в химическую реакцию с кобальтовой фазой твердого сплава и TiC, WC. Продуктами окисления являются, в частности, Co₃O₄, CoO, WO₃, TiO₂. Твердость этих продуктов ~ 40 – 60 раз ниже твердости твердого сплава.

Электрохимический тип окисления определяется переносом ионов под действием электрохимического поля, источником которого, например, может быть контактная поверхностная разность потенциалов, обусловленная атомными структурами материала.

Рост окисных пленок начинается очень быстро и постепенно замедляется. По толщине пленки бывают 0,1 – 40 нм – тонкие, 40 – 500 нм – средние и свыше 500 нм – видимые.

Механохимические процессы при трении существенно влияют на физико-химическую механику трения и износа и значительно изменяют процессы взаимодействия, изменения и разрушения.

Таким образом, мы проанализировали все основные виды изнашивания, протекающие в процессе резания металлов.

Если не учитывать хрупкое и вязкое разрушение, которое, как правило, является результатом направленного выбора режимов обработки или инструментального материала, то адгезионное, диффузионное, коррозионно-механическое и абразивное изнашивания являются составляющими процесса при механической обработке.

Однако удельный вес различных видов изнашивания в общий износ инструмента неодинаков и зависит от условий резания, главным образом от свойств материалов заготовки, а не инструмента, а также от температуры.

Например, при низких температурах причиной потери режущих свойств инструмента, как правило, являются адгезионное и механическое изнашивания. При высоких температурах основное влияние начинают оказывать диффузионный и окислительный износы.

Вследствие неравномерного распределения напряжений, деформаций и температур по рабочим поверхностям лезвия, обусловленных особенностями перечисленных процессов изнашивания, интенсивность и скорость изнашивания на различных участках зависит от условий резания.

Основное значение при сверлении имеет износ по передней и задней поверхности, который вызывает значительное искажение режущей кромки.

Такой износ образуется в результате слишком большой скорости резания и малой подачи, при этом твердость сплава недостаточна. Может также сказываться недостаточная подача СОТС. К распространенному виду относится износ по ленточке и поперечной кромки.

Износ по ленточке может быть обусловлен значительными радиальными биениями сверла, использованием СОТС с малым содержанием масла. Причинами износа по ленточке также могут быть – высокая скорость резания и недостаточная твердость инструментального материала.

Износ по поперечной кромке бывает, как правило, обусловлен низкой скоростью резания и высокой подачей, а также искажением (в сторону уменьшения) размера самой поперечной кромки.

Интенсивность изнашивания передней поверхности в значительной степени определяется закономерностями наростообразования. В зависимости от скорости резания место расположения нароста может перемещаться по режущей кромке. Нарост может защищать заднюю поверхность от износа.

Изменение износа (износ есть результат изнашивания, определяемый в единицах длины, объема, массы) во времени упрощенно характеризуется кривой изнашивания. В зависимости от условий резания кривые изнашивания имеют разный вид. Обобщение значительного количества экспериментального материала позволило установить может быть сведено к типичной кривой.

Скорость изнашивания в каждый момент времени оценивается углом наклона кривой изнашивания:

$$\gamma = \frac{dn}{d\tau}.$$

Наиболее существенно скорость изнашивания зависит от скорости резания.

Так как интенсивность изнашивания I , определяемая отношением износа к пути l , на котором происходило изнашивание, то есть:

$$I = \frac{dn}{dl} = \frac{dn}{V \cdot d\tau} = \frac{\gamma}{V}$$

Интенсивность изнашивания широко используется при оценке влияния на износ различных факторов.

Распределение случайной величины износа при изнашивании (случайный процесс) может быть описано рядом распределений: нормальным, гамма-распределением, Бернштейна, Вейбулла-Гнедедко, логарифмическим нормальным.

Для определения по кривой изнашивания стойкости инструмента необходимо установить предельную величину затупления. Указанная предельно допустимая величина L_{max} называется критерием затупления.

Выбор параметра, применяемого для оценки износа, зависит от температурно-скоростных условий резания.

Для твердосплавных сверл R 850 и R 840 за такой параметр принимают величину износа по передней и задней поверхности, причем она различна для различных участков режущей кромки и зависит от диаметра сверла. Величина h_{max} назначается на основании экономико-технологического обоснования.

Верхним пределом этой величины является значение h_{max} , соответствующее началу участка III – форсированного износа.

При характеристике периода изнашивания средней скорости γ_{cp} , то стойкость T будет изменяться обратно пропорционально величине γ_{cp} .

Сложность процессов изнашивания инструмента определяет зависимость этих процессов от большого числа переменных – свойств инструментального и обрабатываемых материалов, геометрии режущей части инструмента, параметров среды, элементов режима.

Одним из наиболее важных факторов, определяющих процессы износа, является температурно-скоростной фактор. Скоростной фактор, определяющий путь износа в единицу времени, существенно влияет на износ инструмента. Для выяснения температурного влияния скорости резания на износ рассматривают ее воздействие на интенсивность изнашивания, так этот показатель от пути не зависит.

Анализ экспериментальных данных показал, что влияние скорости на интенсивность изнашивания вызывается изменением температуры резания.

Экстремумы и точки перегиба на кривых этих зависимостей ($I = f(\Theta^0)$; $I = f(v)$) связаны, как правило, с изменением превалирующего вида изнашивания. Как правило, адгезионного и механического при низких температурах и преобладанием диффузионного при высоких температурах.

Интенсивность изнашивания и температуры резания являются физическими параметрами, определяющими износ инструмента. Технологическими параметрами, используемыми при различных видах расчетов являются скорость резания и стойкость.

Переход от первых показателей ко вторым может быть произведен с учетом зависимости

$$T = \frac{\gamma_{cp.}}{f_{cp.} \cdot V},$$

выражающей обратно пропорциональную зависимость стойкости от произведения средней интенсивности износа на скорость резания.

Предпринимались попытки описать зависимость формулами:

Сводка зависимостей стойкости скорости резания [41].

Зависимость	Автор, год
$T = \frac{C_T}{V^m}$	Тейлор, 1905
$T = \frac{C_T}{e^{bV}}$	Сафенов, 1933
$T = \frac{C_T}{V_m + \frac{C_T}{T_n}}$	Темчин, 1957
$\frac{1}{b^2} \cdot (\lg V - y_0)^2 + \frac{1}{c^2} \cdot (\lg T - z_0)^2 = H$	Колдинт, 1958
$T = \frac{C_T}{V^{(b_0 + b_1 \cdot V)}}$	Ву, 1963
$T = a_0 + a_1 \cdot \cos y + a_2 \cdot \cos 2y + \dots + a_n \cdot \cos ny + b_1 \cdot \sin y + b_2 \cdot \sin 2y + \dots + b_n \cdot \sin ny,$ $\text{где } y = \frac{2 \cdot \pi \cdot (V - V_0)}{V_n - V_0}; V_0 \leq V \leq V_n$	Грановский, 1963
$T = 100 \cdot e^{a \cdot (1 - \sqrt{1 - b \cdot (\ln V - \ln V_{100})})}$	Коняшов, Ксунина, 1964
$T = \frac{C_T - a \cdot V + b \cdot V^2}{V}$	Метиизен, 1965

Однако описание экспериментальных зависимостей $T=T(V)$ тригонометрическим рядом, сложной экспоненциальной зависимостью, дробно-рациональной функцией и т.д. не получили широкого распространения. Для технологических расчетов до сих пор используется зависимость Ф.Тейлора с учетом конкретных пределов и возможного применения. Это возможно вследствие того, что в диапазоне наиболее благоприятных скоростей резания для твердосплавного инструмента находится ниспадающая ветвь рассматриваемой кривой.

Интенсивность влияния скорости резания на стойкость определяется величиной m , называемой показателем относительной стойкости. Физическое содержание этого показателя состоит в том, что он является мерой влияния температурно-скоростного фактора на процесс изнашивания инструмента. Показатель m зависит от большого числа факторов – свойств инструментального и обрабатываемого инструмента, диапазона скоростей резания, формы поперечного сечения среза, наличия СОТС и других факторов.

Значения показателей при сверлении твердосплавным инструментом стали составляет 4 – 5, чугуна 2,5.

Вторым по влиянию на температуру резания фактором является подача. Изменение подачи оказывает сложное влияние на стойкость, так как при этом изменяется не только температура резания, но и силовое влияние инструмента, изменяется распределение напряжений в инструменте и хрупкая и вязкая прочность инструмента. Поэтому в результате могут наблюдаться как падение, так и повышение стойкости. Значение показателя степени при S колеблется в диапазоне 0,4 – 0,7 .

С увеличением диаметра скорость сверла повышается, что обусловлено повышением жесткости сверла и улучшенными условиями теплоотвода. Значения показателя при диаметре 0,5 – 0,6.

Величина C в формуле $T=T(V)$ зависит от совокупности факторов, влияющих на стойкость инструмента, но явно в формулу не входящих.

Значения показателей степеней для сверл R840 и R850 отсутствуют.

1.3 Оптимизация элементов режима резания

В производственной практике часто возникает задача, когда из некоторой совокупности возможных вариантов элементов режимов резания необходимо выбрать один. В случае, если такой выбор предусматривает проведение количественного анализа путем сравнения различных вариантов с помощью количественной оценки, то возникает задача оптимизации (по латыни *optimus* – наилучший).

Признаки, по которым производится сравнительная оценка альтернатив – критерий оптимальности. Изменяемые при оптимизации величины – это параметры оптимизации, а соотношения, устанавливающие пределы возможно изменения этих параметров – ограничения.

Пусть $f_0(x)$ – целевая функция, количественно выражающая некоторый критерий оптимальности и зависящая от координат x_j , $j = \overline{1, n}$, точки $x \in R^n$.

При математическом решении задачи оптимизации целевую функцию выбирают с таким знаком, чтобы решение задачи соответствовало поиску минимума этой функции.

Таким образом, общая задача математического программирования записывается следующим образом:

$$f_0(x) \rightarrow \min, \quad x \in \Omega,$$

где $\Omega \in R^n$ – множество альтернатив.

Любая точка $x \in \Omega$ является допустимым решением, а само множество – допустимое множество.

Точку $x \in \Omega$, в которой функция $f_0(x)$ достигла минимума, называют оптимальным решением задачи.

Математическая теория в зависимости от вида функции цели разработала большое количество подходов к решению задач оптимизации в последние годы созданы компьютерные программы, позволяющие проводить оптимизацию, например, Maple, MATLAB. Разрабатываются новые методы анализа, например, Natural Computing, включающий в себя генетические алгоритмы (Genetic Algorithms), эволюционное программирование (Evolution

Programming), нейронно-сетевые вычисления (Natural Network Computing), ДНК-вычисления (DNA Computing), клеточные автоматы (Cellular Automata), муравьиные алгоритмы (Ant Colony Algorithmus). Примерами программ, реализующих генетические алгоритмы, являются Evalver фирмы Palisade Corp., Gene Hunter фирмы World System Group, Genetic Training Option фирмы California Scientific Software.

Оптимизация в области обработки металлов резанием, вероятно, ведет свое начало с предложения Ф.Тейлора рассматривать в качестве критерия оптимальности себестоимости изготовления единицы продукции и введения степенных стойкостных зависимостей.

Задача оптимизации элементов режима является задачей экспериментальной, так как зависимости стойкости инструмента от элементов режима можно получить только в эксперименте. Аналитические методы решения данной задачи отсутствуют. Поэтому всякое заявление об аналитической оптимизации, даже декларативное, следует считать несостоятельным.

Практика металлообработки показала, что наиболее распространенными критериями оптимизации являются – наименьшая интенсивность износа и себестоимость, наибольшая производительность обработки, а также некоторые их вариации.

Изнашивание инструмента зависит, главным образом, от температуры резания, и элементы режима влияют на процесс постольку, поскольку они влияют на изменение температуры.

Относительное изнашивание с увеличением температуры изменяется немонотонно: имеет место минимум. Исследования показали, что температура, соответствующая минимальному относительному изнашиванию зависит от марок инструментального и обрабатываемого материала, вида инструментов и некоторых других факторов, но зависят от сочетания элементов режима резания. Изменяя условия обработки, можно добиться минимизации относительного изнашивания. Такое сочетание значений параметров d , S , V называется режимом наименьшего

изнашивания. При этом поскольку диаметр сверления всегда, а подача в большинстве случаев определяются из условий не связанных с износом инструмента, то целесообразно говорить о скорости наименьшей интенсивности изнашивания V_{Imin} .

Режим наименьшей интенсивности изнашивания не является экономичным режимом. Его использование целесообразно, например, при применении дорогостоящего остродефицитного инструмента, необходимости выполнения определенных требований к качеству обработке и в некоторых других случаях.

Соотношение между интенсивностью изнашивания и стойкостью можно установить из следующих соображений:

Если принять за оптимальный износ h_k , и, кроме того, $h_k = h_0$; $l_k = l_T$, где l_T – путь пройденный инструментом за период стойкости.

Так как $h_H = K_n \cdot h_0$ и $l_H = k_l \cdot l_T$, где K_n и k_l – постоянные коэффициенты.

С учетом этого, имеем

$$\Delta l = \frac{h_0 - k_n \cdot h_0}{l_T - k_l \cdot l_T} = \frac{(1 - k_n) \cdot h_0}{(1 - k_l) \cdot l_T} = k \cdot \frac{h_0}{l_T},$$

где $k = \frac{1 - k_n}{1 - k_l}$.

Учитывая, что $l_T = V \cdot T$

$$\Delta l = k \cdot \frac{h_0}{V \cdot T}.$$

Продифференцируем последнее выражение по T:

$$\frac{d\Delta l}{dT} = -\frac{k \cdot h_0}{(V \cdot T)^2} \cdot \left(V + T \cdot \frac{dV}{dT} \right).$$

В точке минимума

$$\frac{d\Delta l}{dT} = 0.$$

Тогда

$$V = -T \cdot \frac{dV}{dT}$$

или

$$\frac{dT}{dV} = -\frac{dV}{V}.$$

Очевидно

$$\frac{d(\lg T)}{d(\lg V)} = 1.$$

Из последнего выражения следует, что в логарифмических координатах минимальному относительному изнашиванию будет соответствовать такая точка, в которой угол наклона касательной равен 135° .

Кроме рассмотренного режима, большое практическое значение имеют режим наибольшей производительности, наименьшей себестоимости операции.

В ряде случаев необходимо учитывать заданную производительность и стойкость.

Для рассматриваемых инструментов (сверл R 850 и R 840), а также обрабатываемых материалов (алюминиевые, нержавеющей, жаропрочные и титановые сплавы) такие задачи не решались.

1.4. Выводы и задачи исследования

На основании опубликованных данных сделаны следующие выводы:

1. Сверление точных посадочных отверстий твердосплавными сверлами одна из наиболее эффективных операций обработки отверстий.
2. Экспериментальные исследования показали высокие эксплуатационные показатели сверл CoroDrill Delta – C R 840 и R 850 фирмы Sandvik Coromant, изготовленных из твердых сплавов.
3. Основным недостатком, тормозящим более широкое внедрение процесса сверления этим типом сверл в промышленное производство, в условиях невозможности использования стационарного оборудования, являются недостаточная изученность процесса износа сверл и отсутствия методики оптимизации элементов режима резания.
4. Стойкость при сверлении существенно зависит от элементов режима обработки, скорости резания и подачи. Значительное влияние на стойкость оказывает диаметр сверла.
5. Исследований, направленных на детальное изучение износа твердосплавных сверл R840 и R850, в условиях невозможности использования стационарного оборудования, а так же разработки на этой основе оптимальных режимов обработки проведено не было.

Целью данной работы - является исследование процессов износа твердосплавных сверл и разработка на этой основе оптимальных режимов резания.

В соответствии с поставленной целью основные задачи исследования могут быть сформулированы следующим образом:

- ✓ исследование зависимостей стойкость – скорость резания, падача при различных диаметрах обработки;
- ✓ выбор и обоснование критерия оптимальности и разработка оптимальных режимов резания;
- ✓ разработка рекомендаций по внедрению в промышленное производство твердосплавных сверл.

2. Методика и условия проведения экспериментальных исследований.

В соответствии с основными задачами исследования, сформированными в параграфе 1.4., необходимо было решить следующие вопросы:

- ✓ выбрать модель станка, являющуюся наиболее типичным представителем оборудования, позволяющего эффективно применять для обработки твердосплавного сверла и обладающую необходимыми для проведения всего комплекса экспериментов техническими возможностями;
- ✓ выбрать инструмент, позволяющий реализовать процесс твердосплавного сверления;
- ✓ выбрать наиболее представительный тип заготовок для обработки и метода контроля технологических показателей;
- ✓ выбрать методы математической обработки экспериментальных данных.

2.1. Оборудование

Исследование процесса сверления проводилось на сверлильном станке с электро-магнитным штативом MAGTRON MBSE-100A с возможностью автоматической подачи сверлильной головки.

Основные технические характеристики

Диапазон сверления:

корончатый сверлом – 12-100 мм

спиральным сверлом – 1-32 мм

Мощность двигателя – 1,8 кВт;

Максимальная частота вращения – 530 об./мин.;

Скорость подачи (в автоматическом режиме)– 10 м/мин.;

Наибольшая осевая нагрузка на шпиндель – 1800 кг;

Прижимная сила магнита – 26000 Н

Подача сверла – 280 мм;

Шпиндель – конус Морзе №3

Габариты:

длина – 280 мм

ширина - 135 мм

высота – 510 мм

Размеры магнита – 110 x 220 мм

Масса станка – 27 кг;

Для переточки сверл использовались пятикоординатные станки: Walter Helitronic Powce.

2.2. Инструмент

Исходя из физических закономерностей процесса сверления, описанных в разделе 1.2., инструмент должен иметь достаточную прочность и, что особенно важно, высокую твердость.

В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют цельнотвердосплавные сверла для обработки алюминия CoroDrill Delta-C R850 ($\varphi = 110^0$), а для обработки нержавеющей сталей, жаропрочных и титановых сплавов R840 ($\varphi = 70^0$), фирмы Sandvik Coromant.

Сверла R850 предназначены для сверления отверстий диаметрами от 3,00 мм до 14,00 мм, а сверла R840 от 1,5 мм до 20,00 мм, и имеют короткое и длинное искажение (соответственно с максимальной глубиной сверления 2-3 и 6-7 диаметров). Точность отверстия при этом обеспечивается по m7. Сверла являются самоцентрирующимися и не требуют предварительной зацентровки. Инструмент изготовлен из твердых сплавов марок GC 1220 и GC N20D соответственно и покрыт TiAlN – физическим покрытием.

Сверла выбирались из 4-х диапазонов 3.00 – 6.00; 6.01 – 10.00; 10.01 - 14.00 и 14.01 - 20.00 мм.

В качестве альтернативы спиральным сверлам R840 и R850, для обработки жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, а так же алюминиевых сплавов, с повышенным содержанием кремния (до 11%), в диапазоне диаметров от 17,5 до 20 мм, могут применяться корончатые сверла Японской фирмы JETBROACH, марки JETBROACH 35L. Это, корончатые

сверла с напайными твердосплавными пластинами, по своим характеристикам схожие, со сверлами R840 и R850, фирмы Sandvik Coromant. Материал режущей части пластин, мелкозернистый твердый сплав ТСТ. Сверла изготавливаются как без покрытия, так и с TiN – физическим покрытием. Сверла применяются с направляющими штифтами, позволяющими использовать их без предварительной зацентровки. Максимальная глубина сверления до 35 мм. Точность отверстия при этом обеспечивается по h9. Сверла выбирались в диапазоне 17.5 – 20 мм

2.3. Обрабатываемые заготовки.

Классификация групп обрабатываемых материалов по Sandvic (НВ/Н/мм²)

Таблица 1.

30.11 Алюминиевые сплавы, деформируемые, в том числе холоднообработанные, не подвергнутые старению (60/500).	Д16
30.21 Алюминиевые сплавы, в том числе подвергнутые старению (100/800).	АЛ3
05.11 Нержавеющая сталь (200/2300). Прутки, поковки (незакаленная).	09Х16Н4Б

Для проведения экспериментов использовались заготовки, изготовленные из деформируемых алюминиевых сплавов, в том числе холоднодеформируемых, не подвергнутых старению (НВ ~ 60) и алюминиевого литья, не подвергнутого старению (НВ ~ 75) (группы обрабатываемом по СМС 30.11 и 30.21).

30.11 – Д16, Д1, В95, АКИ.

30.21 – АА2, АЛ3, АЛ9, АЛ34.

05.11 – 09Х16Н4Б (закалка и отпуск) $\sigma_{\epsilon}=1300$ МПа. Коррозионно-стойкие хромистые и сложнoleгированные стали ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного класса.

Представленные в записке расчеты и диаграммы приведены для экспериментов с использованием сверла R850 и заготовок изготовленных из алюминиевого сплава, деформируемого, холоднообработанного, не подвергнутого старению (60/500) – Д16.

2.4 Режимы резания и СОТС

Режимы резания для сверл R840 и R850 приведены в таблице 2.

Режимы резания для сверл JETBROACH 35L приведены в таблице 3.

Таблица 2.

Режимы резания

ISO	СМС No	НВ/ σ_v	Скорость резания, V_c м/мин.	Диаметр сверления, мм			
				3,00 – 6,00	6,01 – 10,00	10,01 – 14,00	14,01 – 20,00
				Подача S_n мм/об. (Назначенные параметры)			
N	30.11	60	120 – 230	0,15 – 0,35	0,20 – 0,50	0,30 – 0,60	0,40 – 0,70
	30.21	75	120 – 230	0,15 – 0,35	0,20 – 0,50	0,30 – 0,60	0,40 – 0,70
M	05.11	200	40 - 80	0,08 – 0,14	0,08 – 0,15	0,12 – 0,22	0,14 – 0,24

Таблица 3.

Режимы резания

ISO	СМС No	НВ/ σ_v	Скорость резания, V_c м/мин.	Диаметр сверления, мм	
				12,00 – 14,00	14,01 – 20,00
				Подача S_n мм/об. (Назначенные параметры)	
N	30.11	60	30 – 25	-	0,20 – 0,45
	30.21	75	30 – 25	-	0,20 – 0,45
M	05.11	200	20 - 25	-	0,12–0,28

Минимальный расход СОТС составил от 4 до 10 л/мин. в зависимости от диаметра сверла.

В качестве охлаждающей жидкости использовалась 5% эмульсия – на основе минеральных масел не содержащей хлор модели Blasocut – BC 25, артикул 1250.

2.5 Измеряемые параметры и измерительные приборы.

Одним из основных измеряемых параметров являлась величина износа инструмента. Для оценки величины износа можно использовать два существенно различных метода:

1. по объему или весу изношенного инструментального материала;
2. по величине геометрических параметров, характеризующих изменение режущей части при износе.

Первый способ дает полную оценку степени износа инструмента. Однако его осуществление затруднено вследствие точного определения объема изношенного материала из-за сложной формы поверхности износа.

Взвешивание же дает большую относительную ошибку вследствие малости веса продуктов износа.

Второй способ, хотя не позволяет характеризовать износ однозначно, прост в применении и может быть реализован с помощью простых измерительных устройств. Поэтому второй способ получил наибольшее распространение и применяется в данной работе в качестве основного.

Количественно изнашивание характеризуется скоростью изнашивания γ – отношением значения износа h к интервалу времени, в течение которого он возник или интенсивности изнашивания I – отношением износа h к пути l , на котором происходило изнашивание.

Для измерения износа применялись машины фирмы ZOLLER, в частности, измерительная машина «Genius 3». Это универсальная измерительная машина для автоматического комплексного измерения инструментов в проходящем свете (в двух измерениях) и отраженном свете (в трех измерениях) с пятью осями, управляемыми от ЧПУ. Машина

обеспечивает автоматический поиск и распознавание режущих кромок, фотореалистический вывод изображения.

Технические характеристики:

- ✓ Ход оси Z – 600 мм;
- ✓ Ход оси X – 175 мм;
- ✓ Ход оси Y – 100 мм;
- ✓ Диапазон измерения, продольная ось – 570 мм;
- ✓ Измеряемый диаметр (2D) – 340 мм;
- ✓ Стабильность повторяемости – $\pm 0,002$ мм;
- ✓ Точность индикации – 0,001 мм;
- ✓ Точность позиционирования – $\pm 0,001$ мм;
- ✓ Радиальное биение – 0,002 мм.

Кроме того, для измерения износа применялся инструментальный микроскоп и лупа Бринелля.

Допустимые значения износа по передней поверхности (Crater Wear) и задней (Flank wear) для твердосплавного сверл R 840 и K850 приведены в табл.4

Таблица 4

Диаметр сверла D _c	Задняя поверхность мм			Передняя поверхность мм		
	Зона			Зона		
	1	2	3	1	2	3
3.00 – 6.00	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
6.01 – 10.00	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.25
10.01 – 14.00	0.25	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30
14.01 – 17.00	0.25	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30
17.01 – 20.00	0.30	0.30	0.35	0.35	0.35	0.35

2.6 Математическая обработка результатов экспериментов.

Математическая обработка экспериментальных данных по изучению влияния элементов режима резания на стойкость производилась с применением методов нелинейного оценивания. Оценка моделей была произведена по методу наименьших квадратов, который заключается в минимизации суммы квадратов отклонений наблюдаемых значений зависимой переменной от значений, предсказанных моделью.

Для решения задачи нелинейного метода наименьших квадратов применяется алгоритм Левенберга-Марквардта.

Задача минимизации формулируется как:

$$\min \frac{1}{2} \|F(x)\|_2^2 = \frac{1}{2} \sum F_i^2(x)$$

Оценка адекватности модели проводилась с применением объясненной доли дисперсии, анализа графиков, наблюдаемых и предсказываемых значений, нормального и полунормального графика остатков, графика функции подгонки, ковариационной матрицей оценок параметров.

Оценив полную дисперсию зависимой переменной (полную сумму квадратов – total Sum of squares, SST), долю дисперсии, приходящейся на остатки (сумму квадратов ошибок – error sum of squares, SSE) и долю дисперсии относительно регрессионной модели (сумму квадратов относительно регрессии – regression sum of squares, SSR = SST – SSE). Отношение суммы квадратов относительно регрессии к полной сумме квадратов (SSR/SST) называется объясненной долей дисперсии зависимой переменной в регрессионной модели.

Эта доля эквивалентна значению R-квадрат ($0 \leq R\text{-квадрат} \leq 1$), так называемому квадрату смешанной корреляции, позволяющему оценить адекватность полученной модели.

График наблюдаемых и предсказанных значений (диаграмма рассеяния). При адекватности рассматриваемой модели точки располагаются вдоль прямой линии.

Нормальный вероятностный график остатков показывает насколько распределение остатков (ошибок) близко к нормальному.

График функции подгонки возможен при двух или трех переменных. Этот график представляет возможность наглядно оценить адекватность модели и определить расположение выбросов.

Анализ ковариационной матрицы позволяет оценить коррелированность параметров.

Нелинейное оценивание осуществлялось с применением программы STATISTICA компании StatSoft, Inc.

Входные данные анализировались с применением генетического алгоритма (Genetic Algorithm Input Selection).

Нейронные сети строились с применением программы ST Neural Networks компании StatSoft, Inc.

Оптимизация осуществлялась с помощью математической программы Maple компании Waterloo Maple, Inc.

3. Экспериментальные исследования стойкостных зависимостей.
алюминиевых 30.11; 30.21 и нержавеющей 05.11 сплавов по СМС.

Как отмечалось в разделе 1.2, стойкостные зависимости, то есть зависимости стойкости инструмента от элементов режима резания и диаметра сверла, являются базовыми при оптимизации режимов. Поэтому первым этапом проведенных исследований было установление экспериментальных стойкостных зависимостей для основных групп авиационных материалов по СМС: алюминиевых 30.11; 30.21 и нержавеющей 05.11 сталей и сплавов. Исследуемая модель имела вид $V = \frac{C \cdot d \wedge x}{((T \wedge m) \cdot (s \wedge y))}$. Оценивалось четыре параметра c ; x ; m ; y . В качестве зависимой переменной принималась скорость резания V . Независимые переменные диаметр, стойкость T , подача S . Функция потерь – наименьшие квадраты.

Для построения функции было проведено семнадцать экспериментов, результаты которых представлены в табл. 5.

Таблица 5

*Результаты экспериментальных исследований
 исследования зависимости стойкости
 от элементов режима и диаметра сверла для алюминиевого сплава Д16.*

<i>№ п/п</i>	<i>Диаметр сверла, d, мм</i>	<i>Скорость резания, V, мм/мин.</i>	<i>Подача, S, мм/об.</i>	<i>Стойкость, T, мин.</i>
1.	3	40	0,1	48
2.	10	40	0,1	375
3.	20	80	0,15	430
4.	15	40	0,1	1614
5.	10	60	0,1	167
6.	6	80	0,08	77
7.	20	80	0,24	139
8.	10	60	0,15	243
9.	10	80	0,08	85
10.	15	60	0,15	758
11.	15	80	0,08	121
12.	15	40	0,08	515

Суммарные результаты оценивания приведены в табл.6. Как следует из данных, приведенных в таблице, оценки параметров c , x , m , y проведены с p -уровнем ниже 1%, что свидетельствует о высокой надежности полученных оценок.

Таблица 6

Суммарные результаты параметров оценивания.

<i>Оцениваемые параметры</i>	<i>Оценка параметра</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-критерий</i>	<i>p-уровень</i>	<i>Нижняя граница доверительного интервала</i>	<i>Верхняя граница доверительного интервала</i>
C	174,4644	0,091309	1910,708	0,00	174,2672	174,6617
X	0,4504	0,000267	1686,978	0,00	0,4498	0,4510
m	0,1998	0,000077	2603,344	0,00	0,1996	0,1999
y	0,3002	0,000181	1657,207	0,00	0,2998	0,3006

Графические расположения остатков в зависимости от предсказанных величин, гистограмма распределения частот величин остатков позволили предположить, что частоты величин остатков распределены нормально. Для подтверждения этого был построен нормальный вероятностный график.

Так как значения на графике практически попадают на прямую линию, то распределение является нормальным. Этот вывод подтверждается графиком наблюдаемых и предсказанных значений (диаграммой рассеяния).

Значения оцениваемых параметров $c = 174,46$; $x = 0,45$; $m = 0,2$; $y = 0,3$ были получены за тридцать четыре итерации. Последнее значение функции потерь равна 0,1197 (табл.7).

Таблица 7.

Значения функции потерь при оценке параметров c , x , m , y .

<i>№ n/n</i>	<i>Функция потерь</i>	<i>c</i>	<i>x</i>	<i>m</i>	<i>Y</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1.	767,6832	0,1000	0,100000	0,100000	0,100000
2.	764,9935	0,1618	0,373290	0,006717	0,591273
3.	763,2145	0,1818	0,427296	-0,011081	0,681955
4.	759,4948	0,2098	0,494346	-0,033029	0,793206
5.	751,9762	0,2455	0,568446	0,057084	0,914411
6.	737,2679	0,2888	0,644933	-0,081686	1,037628
7.	709,4571	0,3395	0,721080	-0,105939	1,158390
8.	659,6174	0,3972	0,794722	-0,129134	1,273199
9.	564,3117	0,4690	0,872846	-0,153351	1,392146
10.	411,3942	0,5576	0,954148	-0,177442	1,507898
11.	341,8940	0,7198	1,059630	-0,174507	1,437286
12.	316,3559	0,9672	1,133682	-0,136176	1,248587
13.	286,8386	1,5388	1,277990	-0,051967	1,046441
14.	247,5545	2,1487	1,438637	0,028278	0,997481
15.	241,2774	3,6548	1,515240	0,140584	0,962757
16.	201,5332	4,4337	1,577227	0,172590	1,003777
17.	191,1160	6,0323	1,510890	0,193627	0,956456
18.	176,7522	7,6362	1,454623	0,198989	0,924850

Дисперсионный анализ показал адекватность полученных оценок.

Таблица 8

Дисперсионный анализ

<i>Эффект</i>	<i>Сумма квадратов</i>	<i>DF</i>	<i>Среднее квадратов</i>	<i>F-значение</i>	<i>P-уровень</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>Регрессия</i>	589800,0	4,00000	147450,0	133767805	0,000000
<i>Остатки</i>	0,0	13,00000	0,0		

<i>Общее</i>	589800,0	17,00000			
<i>Скорректированное общее</i>	9823,5	16,00000			
<i>Регрессия против скорректированного общего</i>	589800,0	4,00000	147450,0	240	0,000000

Как следует из данных, приведенных в таблице, вероятность регрессионной связи очень велика (р-уровень менее 1%).

Зависимости между оцениваемыми параметрами можно оценить по ковариациям и корреляциям параметров, приведенных соответственно в табл. 9 и 10.

Таблица 9

Ковариации параметров

	<i>c</i>	<i>x</i>	<i>m</i>	<i>y</i>
<i>c</i>	0,008337	-0,000017	-0,000001	-0,000011
<i>x</i>	-0,000017	0,000000	0,000000	0,000000
<i>m</i>	-0,000001	0,000000	0,000000	0,000000
<i>y</i>	-0,000011	0,000000	0,000000	0,000000

Таблица 10

Корреляции параметров

	<i>c</i>	<i>x</i>	<i>m</i>	<i>y</i>
<i>c</i>	1,000000	-0,690438	-0,075842	-0,667059
<i>x</i>	-0,690438	1,000000	0,734189	0,583615
<i>m</i>	-0,075842	0,734189	1,000000	0,438373
<i>y</i>	-0,667059	0,583615	0,438373	1,000000

Значение коэффициента $R = 0,999$.

Гистограмма двух переменных T и d ; T и V ; T и S показывают реальную оценку предложенных параметров измерения.

Характер и степень влияния параметров d , V , S на стойкость инструмента можно оценить по диаграммам.

Линейные оценки степени влияния могут быть представлены:

$$T = -314,3068 + 153,7558 \cdot d$$

$$T = 10964,515 - 52,8862 \cdot V$$

$$T = 1298,8567 - 317,557 \cdot S$$

Очевидно, что наибольшее отрицательное влияние оказывает скорость резания, следующее по величине положительное – диаметр сверла и наименьшее отрицательное – подача S .

Таким образом, формула имеет вид:

$$T = \frac{1,62 \cdot 10^{11} \cdot d^{2,25}}{V^5 \cdot S^{1,5}}$$

Формула для расчета скорости:

$$V = \frac{174,46 \cdot d^{0,45}}{T^{0,2} \cdot S^{0,3}}$$

Аналогично были проанализированы значения параметров для других материалов. Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 11.

Таблица 11

Значения параметров в формуле $V = \frac{C_v \cdot d^{x_v}}{T^{m_v} \cdot S^{y_v}}$.

Группа обрабатываемости СМС	Материал	Параметры				Диапазон применимости параметров					
		c_v	x_v	m_v	y_v	V_{min}	V_{max}	S_{min}	S_{max}	d_{min}	d_{max}
30.11	Д16	174,46	0,45	0,2	0,3	120	230	0,2	0,5	5	14
30.21	АЛЗ	141	0,5	0,26	0,4						
05.11	09Х16Н45	0,1	1,8	0,5	1,2	40	80	0,08	0,2	3	20

Анализ показателей степеней m_T и y_T в табл. 12. показывает, что для сплавов групп 30.11, 30.21 $m_T > y_T$. Следовательно, скорость оказывает большее влияние на стойкость по сравнению с подачей. Для сплавов групп 05.11 подача влияет на стойкость в большей степени, чем скорость $m_T = 2$ и $y_T = 2,4$.

Это существенным образом поменяет вид функции цели, которая будет рассматривается в разделе 4, и значительно повлияет на порядок назначения элементов режима.

Значения стойкости могут определяться не только с применением коэффициентов табл. 11, но также с помощью нейронных сетей.

ВЫВОДЫ:

1. Экспериментально определены закономерности для расчета стойкости в зависимости от элементов режима резания и диаметра сверла.
2. Установлено, что для алюминиевых сплавов, жаропрочных сталей на никелевой основе и титановых сплавов наибольшее влияние на стойкость оказывает скорость резания, а для нержавеющей – подача инструмента.
3. Получена топология и обучены нейронные сети MLP для определения стойкости инструмента в зависимости от элементов режима и диаметра сверла.

4. Оптимизация элементов режима резания

Оптимизация режимов работы инструмента является важнейшей технико-экономической задачей в области авиастроения. Значение правильного решения этой задачи возрастает все в большей степени в связи с широким использованием новых материалов, обладающих, как правило, низкой обрабатываемостью.

Оптимизация процессов обработки может быть осуществлена только на основе изучения физической сущности явлений, проявляющихся при резании и на основе закономерностей износа инструмента. Указанные закономерности были описаны в разделе 1.2. и являются основой производимых расчетов.

Оптимизация проводилась для следующих групп материалов: алюминиевых сплавов 30.11 и 30.21; нержавеющей стали – 05.11.

Для полностью получаемой картины оптимизацию необходимо производить по следующим основным критериям – износ инструмента, производительность и себестоимость обработки.

Вопросы обеспечения минимального износа инструмента были рассмотрены нами в разделе 1.3. и в дальнейшем обсуждаться не будут.

Важнейшей характеристикой процесса обработки металлов резанием является производительность. Этот показатель существенно зависит от режимов обработки и каждая операция характеризуется своим значением производительности.

Производительность определяется как количество деталей, обработанных на рассматриваемой операции в единицу времени. Для анализа факторов, влияющих на производительность, ее целесообразно оценивать величиной обработки – штучным временем. Как известно, штучное время состоит из следующих составляющих: τ_0 – основного времени; τ_g – вспомогательного времени; $\tau_{т.обсл.}$ – время на техническое обслуживание;

$\tau_{орг.обсл.}$ – время на организационное обслуживание и $\tau_{физ.}$ – время на физиологические потребности и отдых.

Таким образом

$$\tau_{шт.} = \tau_0 + \tau_в. + \tau_{м.обсл.} + \tau_{орг.обсл.} + \tau_{физ.}$$

Основное время при сверлении

$$\tau_0 = \frac{L}{n \cdot S},$$

где L – общая длина прохода сверла на рабочей подаче;

n – частота вращения шпинделя;

S – подача в оборот шпинделя.

Так как длина прохода складывается из участков, на которых происходит резание, и участков на которых врезание и выход инструмента, то очевидно

$$\tau_0 = \tau_{рез.} + \tau_{хол.},$$

где $\tau_{рез.}$ – время, затрачиваемое на резание;

$\tau_{хол.}$ – время на холостой передаче.

Положим, что $\tau_{хол.} = \alpha \cdot \tau_{рез.}$, тогда

$$\tau_0 = (1 + \alpha) \cdot \tau_{рез.}$$

Вспомогательное время $\tau_в.$, время на организационное обслуживание рабочего места $\tau_{орг.обсл.}$, физиологические потребности и отдых $\tau_{физ.}$, а также часть времени технического обслуживания рабочего места $\tau_{тех.обсл.}$ не зависят от элементов режима и их можно суммировать и обозначить $\tau'_{шт.}$.

Если смена затупившегося инструмента производится после обработки n деталей, то часть $\tau_{орг.обсл.}^{тех.}$, зависящую от элементов режима, можно выразить

$$\tau_{орг.обсл.}^{тех.} = \frac{\tau_{см.}}{n}$$

и так как

$$n = \frac{T}{\tau_{рез.}},$$

где T – период стойкости, то имеем

$$\tau_{орг.обсл.}^{тех.} = \frac{\tau_{см.}}{T} \cdot \tau_{рез.}.$$

Тогда формула штучного времени

$$\tau_{шт.} = (1 + \alpha) \cdot \tau_{рез.} + \frac{\tau_{см.}}{T} \cdot \tau_{рез.} + \tau'_{шт.}$$

или

$$\tau_{шт.} = \left(1 + \alpha + \frac{\tau_{см.}}{T}\right) \cdot \tau_{рез.} + \tau'_{шт.}$$

Рассмотренный показатель $\tau_{шт.}$ является технологической характеристикой процесса обработки. Он зависит не только от показателей резания ($T_{рез.}$, T), но и, например, от степени автоматизации оборудования ($\tau_{см.}$, $\tau'_{шт.}$).

Производительность самого процесса резания определяется временем резания $\tau_{рез.}$

$$\tau_{рез.} = \frac{\kappa \cdot l}{n \cdot S},$$

где κ – число проходов, зависящее от припуска δ .

$$\text{Так как } n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} \text{ и } \kappa = \frac{\delta}{t},$$

где V – скорость резания, d – диаметр обработки

$$\tau_{рез.} = \frac{\delta \cdot l \cdot \pi \cdot d}{t \cdot 1000 \cdot V \cdot S} = \frac{\beta_1}{V \cdot S \cdot t}$$

Числитель последней формулы β_1 зависит только от размеров обработки и припуска. Знаменатель представляет собой объем материала, удаляемого инструментом в единицу времени. Величина $V \cdot S \cdot t$ являются физической характеристикой процесса резания и возможностей инструмента. Например, можно сопоставить по этому показателю возможности сверл серии R850 из сплава GC N20D и сверл R415.5 из твердых сплавов GC 1010, GC 1020, GC 1040 при сверлении алюминиевых сплавов. Сверла серии R850 превосходят инструмент R415.5 по производительности резания в 2 – 2,5 раза. Технологическая реализация столь высокого потенциала зависит от применяемого оборудования.

Так как при сверлении $t = \delta = \frac{d}{2}$, то формула для $\tau_{рез.}$ примет вид

$$\tau_{рез.} = \frac{\pi \cdot d \cdot l}{V \cdot S} = \frac{\beta}{V \cdot S}$$

и для штучного времени будем иметь

$$\tau_{ум.} = (1 + \alpha) \cdot \frac{\beta}{V \cdot S} + \frac{\tau_{см.} \cdot \beta}{T \cdot V \cdot S} + \tau'_{ум.}$$

Как уже отмечалось, преимущественное распространение получила степенная аппроксимация зависимости стойкости от элементов режима

$$T = \frac{C_T}{V^{m_T} \cdot S^{y_T}}$$

Представив уравнение для штучного времени в виде

$$\tau_{ум.} = \beta \cdot \varphi_{VS}^{np.} + \tau'_{ум.},$$

где $\varphi_{VS}^{np.} = \frac{1 + \alpha}{V \cdot S} + \frac{\tau_{см.}}{T \cdot V \cdot S}$

Поскольку коэффициент β и $\tau'_{ум.}$ от параметров V и S не зависят, то для оценки их влияния на величину штучного времени достаточно рассмотреть функцию φ_{VS} . Эта функция называется функцией цели. Подставив в целевую функцию выражение для стойкости, получим

$$\varphi_{np.}^{VS} = \frac{1 + \alpha}{V \cdot S} + \frac{\tau_{см.}}{C_T} \cdot V^{m_T - 1} \cdot S^{y_T - 1}$$

По литературным данным поведение функции целиком определяется значениями показателей m_T и y_T . Детальный анализ такого влияния приведен в работе.

Для постановки задачи оптимизации необходимо рассмотреть функцию цели φ_{VV} совместно с ограничениями по величинам скорости резания, подачи и диаметра сверления.

Рассмотрим численный пример оптимизации. Примем $\alpha = 0,05$; $\tau_{см.} = 1$.

Как следует из представленных данных, приведенных при обработке алюминиевых сплавов, оптимальными являются максимальные значения скоростей $V_{opt.} = 230$ м/мин. и подача $S_{opt.} = 0,5$ мм/об. Для нержавеющей сталей и сплавов отмечаются установленные ранее закономерности: при $m_T > y_T$ оптимальной является наибольшая подача, значение скорости имеет экстремум в середине диапазона. При $m_T < y_T$ оптимальными являются

максимальные значения скоростей, значения подач имеют оптимум внутри диапазона. Для материала 05.11 –нержавеющая сталь $V_{opt.} = 80$ м/мин.; $S_{opt.} = 0,11$ мм/об.

Таким образом, в результате проведенных исследований не подтвердилось существование мнения об определяющем влиянии на режимы параметров m_T и u_T . Существенное влияние оказывает параметр C_T , а в ряде случаев τ_{cm} и α . Важную роль играют такие ограничения по скоростям, подачам и диаметрам.

Следовательно, учитывая простоту применения существующих математических компьютерных программных комплексов, необходимо рекомендовать расчетное определение элементов режима в каждом конкретном случае.

В разделе 1.3 нами был рассмотрен критерий оптимизации – наименьшая интенсивность износа инструмента, а в донном разделе – наибольшая производительность.

Однако, более обоснованно подходить к оптимизации режимов обработки с общих экономических позиций, то есть минимизируя затраты средств на выполнение операции.

Наибольшее распространение об этом отношении получил критерий минимальной себестоимости, впервые рассмотренный еще в начале XIX века Ф. Тейлором.

Полная себестоимость технологической операции складывается из следующих затрат: зарплаты станочника и наладчика, амортизационных отчислений, затрат на ремонт станка, силовую электроэнергию, расходов на вспомогательные материалы, амортизационные отчисления и ремонт универсальных приспособлений, на ремонт и заточку режущих инструментов, затрат, связанных с ремонтом измерительных инструментов, использованием производственного помещения, цеховыми, заводскими и внепроизводственными накладными расходами, а также с потерями от брака.

Все слагаемые себестоимости, за исключением расходов на ремонт и заточку режущего инструмента ($C_{ин}$), пропорциональны времени,

затраченному на операцию. Их сумма $C'_{on.}$ может быть выражена следующим образом:

$$C'_{on.} = C_{nn} - C_{ин} = \varepsilon \cdot \tau_{инт.},$$

где C_{nn} – полная себестоимость технологической операции;

ε – затраты отнесенные к минуте штучного времени (станкоминута).

Подставив в последнюю формулу выражение для $\tau_{инт.} = (1 + \alpha) \cdot \tau_{рез.} + \frac{\tau_{см.}}{T} \cdot \tau_{рез.} + \tau'_{инт.}$, получим

$$C'_{on.} = (1 + \alpha) \cdot \varepsilon \cdot \tau_{рез.} + \frac{\varepsilon \cdot \tau_{см.}}{T} \cdot \tau_{рез.} + \varepsilon \cdot \tau'_{инт.}$$

Слагаемое $C_{ин.}$ – инструментальная составляющая себестоимости, можно выразить формулой:

$$C_{ин.} = \frac{v}{n},$$

где v – затраты на эксплуатацию режущего инструмента, отнесенные к его стойкости.

Таким образом,

$$C_{on.} = C'_{on.} + C_{ин.} = (1 + \alpha) \cdot \varepsilon \cdot \tau_{рез.} + (\varepsilon \cdot \tau_{см.} + v) \cdot \frac{\tau_{рез.}}{T} + \varepsilon \cdot \tau'_{инт.}$$

или принимая $\tau_{рез.} = \frac{\beta}{V \cdot S}$

$$C_{on.} = (1 + \alpha) \cdot \frac{\beta \cdot \varepsilon}{V \cdot S} + (\varepsilon \cdot \tau_{см.} + v) \cdot \frac{\beta}{T \cdot V \cdot S} + \varepsilon \cdot \tau'_{инт.}$$

Сопоставив полученное выражение с уравнением для штучного времени, можно установить, что они различаются лишь величиной постоянного коэффициента b_0 во втором члене. Очевидно, что все рассуждения для уравнения штучного времени применимы к выражению для $\frac{C_{on.}}{\varepsilon}$. По аналогии получается выражение для цеховой функции.

$$\varphi_{VS}^C = \frac{1 + \alpha}{V \cdot S} + \frac{\tau_{см.} + \frac{v}{\varepsilon}}{T \cdot V \cdot S}$$

Порядок минимизации целевой функции остается прежним. Рассмотрим пример:

$d = 10$ мм; $\alpha = 0,05$; $\tau_{см.} = 1$; $v/\varepsilon = 0,8$.

Анализ приведенных данных показывает, что для материалов группы 30.11 и 30.21 оптимальные значения скоростей и подач являются предельными максимально допустимыми и совпадают с соответствующими значениями при оптимизации по критерию максимальной производительности.

Оптимальные скорости по критерию наименьшей себестоимости называются экономическими скоростями. То есть для материалов групп 30.11 и 30.21 $V_{эк.} = V_{пр.}$.

Для материалов групп 05.11 $V_{опт.} = 80$, $S_{опт.} = 0,084$. Таким образом, для 05.11 $V_{эк.} = V_{пр.}$ при этом $S_{эк.} < S_{пр.}$

Как известно, критерий наименьшей себестоимости имеет тот недостаток, что он не учитывает общие затраты на выпуск данного вида продукции. Следовательно, этот критерий позволяет получить режимы, обуславливающие только локальный минимум расходов.

Учет общих расходов может быть осуществлен с применением критерия наименьших приведенных затрат.

Приведенные затраты

$$C_{нз.} = C_{полн.} \cdot \Sigma + E_n \cdot \kappa,$$

где $C_{полн.}$ – полная себестоимость одного изделия;

Σ – годовое количество изделий;

κ – дополнительные капитальные вложения;

E_n – норма эффективности.

Решение задачи об оптимизации режимов резания по приведенным затратам на операцию приводит к следующему выражению функции цели:

$$\varphi_{VS}^{нз.} = \frac{(1 + \alpha) \cdot (\varepsilon + E_n \cdot \kappa)}{V \cdot S} + \frac{((\varepsilon + TE_n \cdot \kappa) \cdot \tau_{см.} + V)}{V \cdot S \cdot T}$$

Очевидно, что характер поведения функции $\varphi_{VS}^{нз.}$ аналогичен поведению функции φ_{VS}^C . При этом должно выполняться $V_{нз.} < V_{пр.}$. Соотношение между $V_{нз.}$ и $V_{пр.}$ зависит от конкретных значений коэффициентов.

При заданной производительности, когда такт технологического процесса задан, рассчитывается режим постоянной производительности. Для такого режима

$$\tau_{um.} = \tau_{zy}$$

или имеем

$$(\alpha + 1) \cdot \frac{\beta}{V \cdot S} + \frac{\tau_{cm.} \cdot \beta}{T \cdot V \cdot S} + \tau'_{um.} = \tau_{зад.}$$

Последнее уравнение выражает дополнительную связь между параметрами T , V , S . Используя эту закономерность и уравнение стойкости, и используя, например, экономический критерий оптимальности, определяются значения элементов режима V и S .

После подстановки имеем

$$\frac{\tau_{cm.}}{C_T} \cdot V^{m_T} \cdot S^{y_T} - \frac{\tau_{зад.} - \tau'_{um.}}{\beta} \cdot V \cdot S + 1 + x \cdot \alpha = 0$$

Преобразовав последнее выражение получаем

$$\frac{C_{on.}}{\varepsilon} = \tau_{зад.} + \frac{v}{\varepsilon} \cdot \frac{\beta^{y_T}}{C_T} \cdot \left(\frac{1 + \alpha}{\tau_{зад.} - \tau'_{um.}} \right)^{y_T - 1} \cdot V^{m_T - y_T}$$

$$\frac{C_{on.}}{\varepsilon} = \tau_{зад.} + \frac{v}{\varepsilon} \cdot \frac{\beta^{m_T}}{C_T} \cdot \left(\frac{1 + \alpha}{\tau_{зад.} - \tau'_{um.}} \right)^{m_T - 1} \cdot \frac{1}{S^{m_T - y_T}}$$

Объединяя два последних выражения, получим функцию цели по критерию минимальной себестоимости (с учетом постоянной производительности).

$$\varphi_{VS}^{C(Pr-const)} = 2\tau_{зад.} + \frac{v}{\varepsilon \cdot C} \cdot \left(\beta^{y_T} \cdot \left(\frac{1 + \alpha}{\tau_{зад.} - \tau'_{um.}} \right)^{y_T - 1} \cdot V^{m_T - y_T} + \beta^{m_T} \cdot \left(\frac{1 + \alpha}{\tau_{зад.} - \tau'_{um.}} \right) \cdot \frac{1}{S^{m_T - y_T}} \right)$$

Очевидно, что значения оптимальных режимов в этом случае будет существенно зависеть от соотношения m_T и S_T .

При $m_T > S_T$ оптимальными будут V_{min} и S_{max} . При расчетах принималось $\tau_{зад.} = 1,5$; $\tau'_{um.} = 0,5$. Оптимальные значения $V_{onm.} = V_{min} = 120$ м/мин.; $S_{onm.} = S_{max} = 0,5$ об./мин.

Картина существенно меняется при $m_T < y_T$, для материала группы 05.11 при $m_T = 2$; $y_T = 2.4$. Оптимальные значения $V_{opt.} = V_{max} = 80$ м/мин.; $S_{opt.} = S_{min} = 0,08$ мм/об.

В ряде случаев необходимо сохранить постоянство стойкости инструмента. Стойкость, например, может жестко регламентироваться организационными соображениями (сменой инструмента в определенное время).

Анализ режима постоянной стойкости проведем, используя функцию цели

$$\varphi_{VS}^{np} = \frac{1 + \alpha}{V \cdot S} + \frac{\tau_{cm}}{T \cdot S \cdot V}$$

Условие постоянства стойкости выражает дополнительную связь между элементами режима, аналогично предыдущему случаю.

Анализ можно проводить, используя любую из рассмотренных ранее функций, цели – результаты будут принципиально одинаковыми.

Так как $T = \tau_{зад.}$, то

$$V = \left(\frac{C_T}{\tau_{зад.}} \right)^{\frac{1}{m_T}} \cdot \frac{1}{S^{\frac{y_T}{m_T}}}$$

Подставив последние зависимости в уравнение целевой функции, получим

$$\varphi_{VS}^{np(T-const)} = \left(1 + \alpha + \frac{\tau_{cm}}{\tau_{зад.}} \right) \cdot \left(\left(\frac{\tau_{зад.}}{C_T} \right)^{\frac{1}{m_T}} \cdot \frac{1}{S^{\frac{y_T}{m_T}}} + \left(\frac{\tau_{зад.}}{C_T} \right)^{\frac{1}{y_T}} \cdot \frac{V^{m_T}}{y_T - 1} \right)$$

Очевидно, что характер изменения функции $\varphi_{VS}^{np(T-const)}$ аналогичен характеру изменения $\varphi_{VS}^{C(np-const)}$.

В ряде случаев необходимо выполнить одновременно два требования: постоянство стойкости и производительности ($T = \tau_{зад.}$ и $\tau_{шт.} = \tau_{зад.}$).

В этом случае необходимо решить совместно уравнение

$$T = \frac{C_T}{V^{m_T} \cdot S^{y_T}}$$

и уравнение

$$V \cdot S = \frac{\beta \cdot (1 + \alpha)}{\tau_{зод.} - \tau'_{ум.}}$$

Решив, относительно S получим

$$S = l \left\{ \frac{\ln \left(\frac{\tau_{зод.} - \tau'_{ум.}}{\beta \cdot (1 + \alpha)} \right) \cdot m_T - \ln \tau_{зод.} + \ln C_T}{-m_T + y_T} \right\},$$

Скорость при этом определяется

$$V = \frac{\beta \cdot (1 + \alpha)}{(\tau_{зод.} - \tau'_{ум.}) \cdot S}.$$

Совместно решение указанных уравнений однозначно определяет значения искомых параметров. Необходимо проверить не превосходят ли значения полученных элементов режима допустимых.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны функции цели для оптимизации элементов режима резания материалов групп обрабатываемости 30.11, 30.21, 05.11 по критериям наибольшей производительности, наименьшей себестоимости, приведенных затрат и наименьшей себестоимости при заданной производительности, а также наибольшей производительности при постоянной стойкости. Получение формулы для определения элементов режима при постоянной стойкости и производительности.
2. В качестве ограничений принимаем минимальные и максимальные скорости резания и подачи, обеспечивающие устойчивое стружкообразование.
3. Разработаны оптимальные элементы режима резания по перечисленным критериям для алюминиевых и коррозионностойких сплавов.
4. Установлено, что при оптимизации элементов режима по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости для алюминиевых сплавов, оптимальные скорости и подачи совпадают. Оптимальными при этом являются максимальные значения скоростей и подач.
5. При обработке на оптимальных режимах нержавеющей сталей $V_{эк.} = V_{пр.}$, но $S_{эк.} < S_{пр.}$ (для $m_T < y_T$).
6. При оптимизации по критериям наименьшей себестоимости при заданной производительности и наибольшей производительности при заданной стойкости оптимальными являются: $V_{opt.} = V_{min}$ и $S_{opt.} = S_{max}$ (при $m_T > S_T$) и $V_{opt.} = V_{max}$ и $S_{opt.} = S_{min}$ (при $m_T < S_T$).

5. Рекомендации по внедрению оптимальных режимов резания и технико-экономические показатели обработки.

Предварительными требованиями для полного использования высоких потенциальных возможностей цельного твердосплавного инструмента являются:

- хорошее качество всей технологической системы шпиндель - приспособление-сверло;
 - высокая жесткость;
 - точность;
 - низкое радиальное биение;
 - подача СОТС.
- Резание становится прерывистым и подача должна быть уменьшена на 1/3 от нормальной при обработке полного диаметра.
- Необходима центровочная операция

Сквозное отверстие

- При выходе из отверстия подача снижается на 1/3

Нерегулярная поверхность

- При входе подаче должна быть уменьшена до 1/4 от нормальной для избежания выкрашивания.

Вогнутая поверхность

- Обработка возможна, если радиус $r > 15 \times D_c$. Подача при входе должна быть снижена на 1/3 от нормальной.

Выпуклая поверхность

- Обработка возможна при радиусе $r > 4 \times D_c$ и расположении отверстия перпендикулярно радиусу. Подача должна быть снижена на 1/2 при входе сверла.

Расверливание отверстия

- Операция по расверливанию невозможна.

Пересечение отверстий

- Пересекающиеся отверстия могут быть обработаны при снижении подачи до 1/4 от нормальной при пересечении.

Сверление пакета

- Возможно с полной подачей при соблюдении следующих правил:

1. Хороший зажим пластин;
2. Размещение промышленной бумаги толщиной 0,5 – 1 мм для демпфирования колебаний и защиты сверла.

6. Безопасность жизнедеятельности

6.1. Охрана труда.

Требования к размещению, условиям труда и безопасности организации рабочего места пользователя ПЭВМ

При работе с компьютером человек подвергается воздействию ряда опасных и вредных производственных факторов: электромагнитных полей (диапазон радиочастот: ВЧ, УВЧ и СВЧ), инфракрасного и ионизирующего излучения, шума и вибрации, статического электричества и др.

Работа с компьютером характеризуется значительным умственным напряжением и нервно-эмоциональной нагрузкой операторов, высокой напряженностью зрительной работы и достаточно большой нагрузкой на мышцы рук при работе с клавиатурой ЭВМ. Большое значение имеет рациональная конструкция и расположение элементов рабочего места, что важно для поддержания оптимальной рабочей позы человека-оператора.

В процессе работы с компьютером необходимо соблюдать правильный режим труда и отдыха. В противном случае у персонала отмечаются значительное напряжение зрительного аппарата с проявлением жалоб на неудовлетворенность работой, головные боли, раздражительность, нарушение сна, усталость и болезненные ощущения в глазах, в пояснице, в области шеи и руках.

Рассмотрим основные требования к помещениям, где установлены компьютеры. В зависимости от ориентации окон рекомендуется следующая окраска стен и пола помещения:

- окна ориентированы на юг – стены зеленовато-голубого ил светло-голубого цвета; пол – зеленый.
- окна ориентированы на север – стены светло-оранжевого или оранжево-желтого цвета; пол – зеленый;

- окна ориентированы на восток – стены желто-зеленого цвета; пол – зеленый или красновато-оранжевый;
- окна ориентированы на запад – стены желто-зеленого цвета; пол – красновато-оранжевый.

В помещениях, где находится компьютер, необходимо обеспечить следующие величины коэффициента отражения, %

- для потолка – 60-70.
- для стен – 40-50.
- для пола – 30.
- для других поверхностей и рабочей мебели – 30-40.

Освещение помещений вычислительных центров должно быть смешанным.

При выполнении работ категории высокой зрительной точности (наименьший размер объекта различения 0,3-0,5 мм) величины коэффициента естественного освещения (КЕО) должно быть не ниже 1,5%, а при зрительной работе средней точности (наименьший размер объекта различения 0,5-1,0 мм) КЕО должен быть не ниже 1,0%. В качестве источников искусственного освещения обычно используются люминесцентные лампы типа ЛБ или ДРЛ, располагаться над рабочими поверхностями в равномерно-прямоугольном порядке. Требования к освещенности в помещениях, где установлены компьютеры, следующие: при выполнении зрительных работ высокой точности общая освещенность должна составлять 300 лк, а комбинированная – 750 лк; аналогичные требования при выполнении работ средней точности – 200 и 300 лк соответственно.

Вычислительная техника является источником существенных тепловыделений, что может привести к повышению температуры и снижению относительной влажности в помещении. В помещениях, где

установлены компьютеры, должны соблюдаться определенные параметры микроклимата (табл.1).

Объем помещения, в которых размещены работники вычислительных центров, не должен быть меньше 19,5 м³/человека с учетом максимального числа одновременно работающих в смену. Нормы подачи свежего воздуха в помещениях, где расположены компьютеры, приведены в табл.2.

Таблица 1

Параметры микроклимата для помещений, где установлены компьютеры

Период года	Параметры микроклимата	Величина
Холодный и переходный	Температура воздуха в помещении	22-24 ⁰ С
	Относительная влажность	40-60%
	Скорость движения воздуха	до 0,1 м/с
Теплый	Температура воздуха в помещении	23-25 ⁰ С
	Относительная влажность	40-60%
	Скорость движения воздуха	до 0,1-0,2 м/с

Таблица 2

Нормы подачи свежего воздуха в помещения, где расположены компьютеры

Характеристика помещения	Объем расход подаваемого в помещение свежего воздуха, м ³ /на одного человека в час
Объем до 20 м ³ на человека	Не менее 30
20-40 м ³ на человека	Не менее 20
Более 40 м ³ на человека	Естественная вентиляция
Помещение без окон и световых фонарей	Не менее 60

Для подачи в помещение воздуха используются системы механической вентиляции и кондиционирования, а также естественная вентиляция.

Уровень шума на рабочем месте математиков-программистов и операторов видеоматериалов не должен превышать 50 дБ, а в залах обработки информации на вычислительных машинах – 65 дБ. Для снижения

шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, должны быть облицованы звукопоглощающими материалами. Уровень вибрации в помещениях вычислительных центров может быть снижен путем установки оборудования на специальные фундаменты и виброизоляторы.

Установлено, что максимальная напряженность электрической составляющей электромагнитного поля достигается на коже дисплея. Допускаемые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений от монитора компьютера представлены в табл.3.

Таблица 3

Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений (в соответствии с СанПиН 2.2.2.542-96)

Наименование параметра	Допустимые значения
Напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора.	10 В/м
Напряженность электромагнитного поля по магнитной составляющей на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора.	0,3 А/м
Напряженность электромагнитного поля не должна превышать:	
Для взрослых пользователей	20 кВ/м
Для детей дошкольных учреждений и учащихся средних специальных и высших учебных заведений	15 кВ/м

Максимальный уровень рентгеновского излучения на рабочем месте оператора обычно не превышает 10 мкбэр/ч, а интенсивность ультрафиолетового и инфракрасного излучения от экрана монитора лежит в пределах 10-100 мВт/м².

Большинство ученых считают, что как кратковременное, так и длительное воздействие всех видов излучения от экрана монитора не опасно для здоровья персонала, обслуживающего компьютеры. Однако исчерпывающих данных относительно опасности воздействия излучения от мониторов на работающих с компьютерами не существует и исследования в этом направлении продолжаются.

Для снижения воздействия перечисленных видов излучения на операторов компьютеров рекомендуется применять мониторы с пониженной излучательной способностью, устанавливать защитные экраны, а также соблюдать регламентированные режимы работы и отдыха.

Требования к организации рабочего места и отдыха.

- высота стола с клавиатурой должна составлять 62 – 68 см над уровнем пола; а высота экрана (над полом) – 90 – 128 см;
- расстояние от экрана до края стола – 40 – 115 см;
- наклон экрана – от -15° до $+20^{\circ}$ по отношению к нормальному его положению;
- положение спинки кресла оператора должно обеспечивать наклон тела назад от 97° – 121° .

Клавиатуру следует сделать отдельной от экрана и подвижной. Усилие нажима на клавиши должно лежать в пределах 0,25-1,5 Н, а ход клавишей – 1 – 5 мм.

Существенное значение для производительной и качественной работы на компьютере имеют размеры знаков, плотность их размещения, контраст и соотношение яркостей символов и фона экрана. Если расстояние от глаз оператора до экрана дисплея составляет 60-80 см, то высота знака должна быть не менее 3 мм, оптимальное соотношение ширины и высоты знака составляет 3:4, а расстояние между знаками – 15-20% их высоты. Соотношение яркости фона экрана и символов – от 1:2 – 1:5 до 1:10 – 1:15.

В таблице 4 представлены сведения о регламентированных перерывах, которые необходимо делать при работе на компьютере, в зависимости от продолжительности рабочей смены, видов и категорий трудовой деятельности с видеодисплейным терминалом и персональной электро-вычислительной машиной (в соответствии СанПиН 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам и персональным электро-вычислительным машинам и организации работ»).

Таблица 4

Категория Работы с ВДТ или ПЭВМ	Уровень нагрузки за рабочую смену. При видах работы с ВДТ			Суммарное время регламентированных перерывов, мин	
	Группа А количество знаков	Группа Б количество знаков	Группа В, час	При 8- часовой смене	При 12- часовой смене
I	До 20 000	До 15 000	До 2,0	30	70
II	До 40 000	До 30 000	До 4,0	50	90
III	До 60 000	До 40 000	До 6,0	70	120

В соответствии со СанПиН 2.2.2.542-96 все виды трудовой деятельности, связанные с использованием компьютера, разделяют на три группы:

- группа А – работа по считыванию информации с экрана ВДТ или ПЭВМ с предварительным запросом;
- группа Б – работа по вводу информации.
- группа В – творческая работа в режиме диалог с ЭВМ.

Эффективность перерывов повышается при сочетании с производственной гимнастикой.

6.2. Охрана труда

Расчет искусственного освещения в машинном зале

Расчет освещения по методу коэффициента использования.

Машинный зал вычислительного центра имеет размеры: длина (А) – 22 м, ширина (В) – 9 м, высота (Н) – 3,5 м. Высота рабочих столов $h_{pm} = 0,8$ м.

Требуется рассчитать равномерное освещение на уровне рабочей плоскости при использовании светильников типа ЛСП 01 и составить схему размещения светильников.

Определяем нормированную освещенность лампы $E = 400$ лк (из табл.1). Определяем коэффициент запаса $K_z = 1,5$, исходя из

рекомендуемых значений $h_{св} \leq 2$ м, принимаем расстояние от светильника до потолка $h_{св} = 0,5$ м.

Определяем высоту подвеса светильника h :

$$h = H - (h_{св} + h_{рм}) = 3,5 - (0,5 + 0,8) = 2,2 \text{ м} \quad (1.1)$$

Где $h_{св}$ – расстояние от светильника до потолка;

$h_{рм}$ – высота рабочих столов;

H – высота потолков.

Из таблицы 3 выбираем $\lambda_{нв} = 1,6$.

Определяем оптимальное расстояние между соседними рядами светильников $L_{нв}$:

$$L_{нв} = \lambda_{нв} \cdot h = 1,6 \cdot 2,2 = 3,52 \text{ м} \quad (1.2)$$

Рассчитываем количество рядов светильников $n_{в}$:

$$n_{в} = B/L_{нв} = 9/3,52 = 2,55 \text{ ряда} \quad (1.3)$$

где B – ширина

$L_{нв}$ – расстояние между соседними рядами светильников принимаем $n_{в} = 3$ ряда.

Из таблицы 4 выбираем коэффициент отражения потолка $\rho_{ст}$ и расчетной поверхности $\rho_{рп}$.

$$\rho_{п} = 70\%; \quad \rho_{ст} = 50\%; \quad \rho_{рп} = 10\% \quad (1.4)$$

Рассчитываем индекс помещения i :

$$i = A \cdot B/h \cdot (A + B) = 20 \cdot 8/2,2 (20 + 8) = 2,59 \quad (1.5)$$

где A – длина;

B – ширина;

H – высота подвеса светильника.

Значения индекса помещения i принимается равным ближайшему значению в таблице 5.

$$i = 30.$$

Из таблице 5 для найденных i , $\rho_{п}$, $\rho_{ст}$, $\rho_{рп}$ и заданного типа светильника ЛСП 01 определяем коэффициент использования η :

$$\eta = 0,54$$

Световой поток от светильников одного ряда Φ_p :

$$\Phi_p = E \cdot K_z \cdot S \cdot z/n_b \cdot \eta \quad (1.6)$$

$$\Phi_p = 400 \cdot 198 \cdot 1,5 \cdot 1,1/3 \cdot 0,54$$

$$\Phi_p = 80\,666,6$$

Где E – нормированная освещенность, лк;

K_z – коэффициент запаса;

S – площадь освещаемого помещения, m^2 ;

Z – коэффициент минимальной освещенности.

Так как в светильнике типа ЛСП 01 применяются лампы мощностью 80 Вт и 150 Вт табл.3, то можно выбрать лампы типа ЛХБ 80-4 или ЛХБ-150 со световыми потоками $\Phi_{Л1} = 4\,220$ лм и $\Phi_{Л2} = 8\,000$ лм табл.6.

Если использовать в светильники 2 лампы ЛХБ 80-4, то в ряду необходимо установить:

$$n_A = \Phi_p/2 \cdot \Phi_{Л1} \quad (1.7)$$

$$n_A = 80\,666,6/2 \cdot 4220$$

$$n_A = 9,55 = 10 \text{ светильников.}$$

При использовании двух ламп ЛХБ150 – 5 светильников. В соответствии с табл.3 длина светильника типа ЛСП 01 $L_{св} = 1536$ мм.

При использовании ламп ЛХБ 80-4 длина одного ряда светильников:

$$L_p = L_{св} \cdot n_A = 1,536 \cdot 10 = 15,36 \text{ м} \quad (1.8)$$

С лампами ЛХБ 150:

$$L_p = L_{св} \cdot n_A = 1,536 \cdot 5 = 7,68 \text{ м} \quad (1.9)$$

Где $L_{св}$ – длина светильника;

n_A – ряд.

Целесообразно выбрать первый вариант, при котором светильники в ряду устанавливаются без разрывов.

Определяем расчетную освещенность E_p :

$$E_p = E_n \cdot (\Phi_{Л1} \cdot n_A \cdot 2/\Phi_p) \quad (1.10)$$

$$E_p = 400 \cdot (4220 \cdot 10 \cdot 2/80666,6)$$

$$E_p = 418,5 \text{ лм.}$$

Где E_n – нормированная освещенность, лк;

$\Phi_{л1}$ – световой поток;

n_a – количество светильников;

Φ_p – световой поток 1 ряда.

Определяем относительную погрешность расчета $\delta_{отн}$:

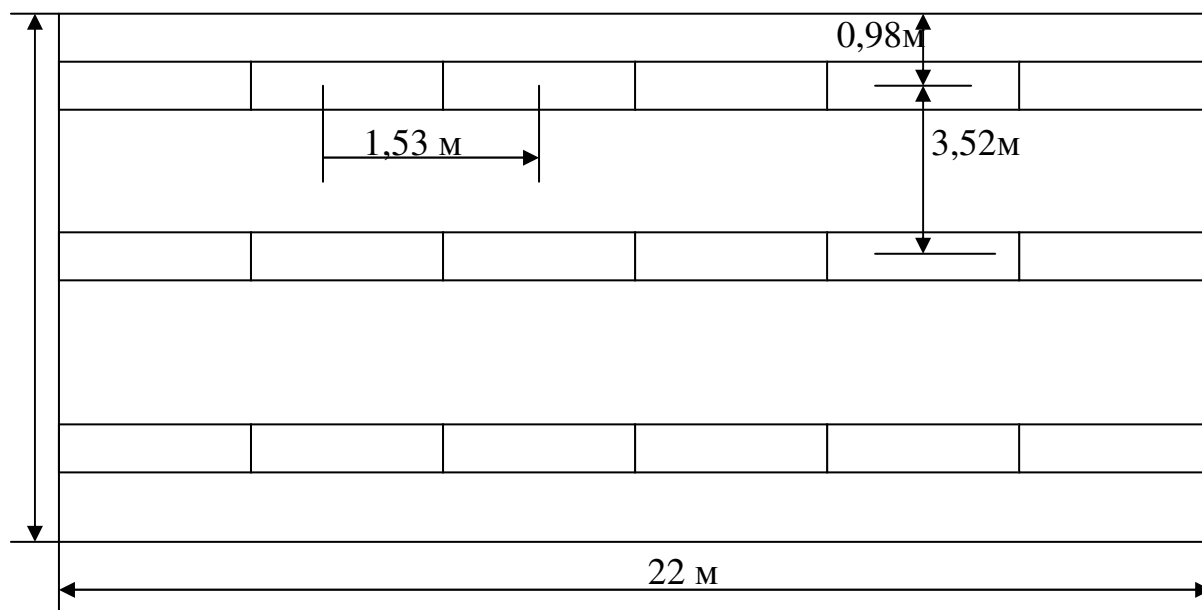
$$\delta_{отн} = (E_p - E_n) / E_n \cdot 100\% \quad (1.11)$$

$$\delta_{отн} = (418,5 - 400) / 400 \cdot 100\% = 4,6\%$$

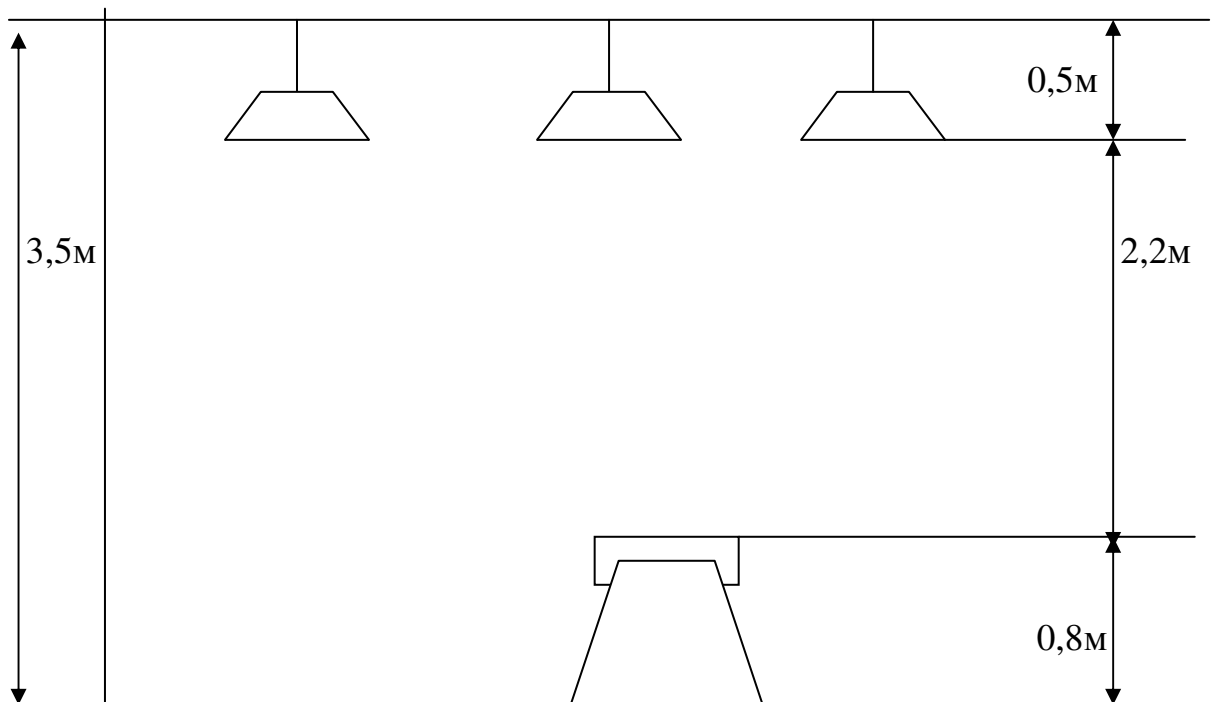
Расчет считаем законченным, т.к. отклонение расчетной освещенности от нормируемой не превышает допустимые пределы $+20\% \div -10\%$.

По полученным данным построим схему размещения светильников в машинном зале.

Вид в плане:



Вид в разрезе:



6.3. Безопасность жизнедеятельности в чрезвычайных ситуациях.

Системы учета защитных средств.

В процессе работы здоровью и даже, возможно, жизни людей могут угрожать факторы, вызванные преимущественно неправильной организацией работы либо несоблюдением техники безопасности. Повышенную утомляемость может вызвать повышенный уровень шума; высокий по возможности с более низким уровнем радиации и надзор за качеством изображения на них.

Непосредственную опасность для жизни и здоровья людей представляют собой приборы и элементы оборудования, требующие для своей работы питания от сети с высоким напряжением.

С целью избежания несчастных случаев при использовании человеком подобного оборудования либо контакте с ним, необходимо проведение среди персонала предприятия инструктажей по технике безопасности, а также, соблюдение и контроль соблюдения требований техники безопасности.

Кроме того, уменьшить вероятность несчастных случаев или аварий можно путем проведения некоторых организационных и профилактических мер.

При работе с легковоспламеняющимися, взрывоопасными и токсичными газами, а также, жидкостями и продуктами разложения органических веществ, необходима постоянная вентиляция рабочих помещений. Работы с опасными веществами рекомендуется проводить только в герметичных системах или под вытяжным шкафом, в хорошо проветриваемом помещении.

Эффективным средством профилактики несчастных случаев является наиболее удачное расположение оборудования, использование, по возможности, приборы и оборудования с наиболее оптимальными конструктивными решениями. Важным средством обеспечения безопасности служит надежная изоляция токонесущих частей, кабелей, а также заземление корпусов всех приборов и металлических частей оборудования.

В целях обеспечения безопасности обслуживающего персонала и обеспечения наиболее быстрого устранения ситуаций, угрожающих здоровью либо жизни людей, на объекте предусмотрен комплекс мер по предупреждению и наиболее быстрому устранению подобных ситуаций, а также, наличие средств защиты и пожаротушения. К ним относятся огнетушители и прочие противопожарные принадлежности, а также, системы пожаротушения, сигнализация и системы оповещения персонала.

Для обеспечения наиболее полного использования этих средств на предприятии необходимо установление жесткого контроля их комплектности и качества. В данном случае это достигается путем внесения в информационную сеть соответствующей информации. Программа предусматривает файл, включающий в себя сведения о наличии и состоянии всех упомянутых средств, находящихся на территории объекта. Информация, содержащаяся в этом файле постоянно обновляется либо дополняется по мере поступления или убытия средств защиты и пожаротушения, а также отражает изменения в их состоянии. Информация хранящаяся в этом файле,

также как и вся служебная информация, защищена от несанкционированного вмешательства. Доступ к ней возможен при знании соответствующего пароля, изменить же ее может только директор либо главный бухгалтер или доверенное лицо с их ведома и согласия и по их указанию. Наличие подобной информации на предприятии позволяет ответственным лицам иметь безопасности и, исходя из этого, в случае необходимости быстро реагировать на изменение обстановки либо принимать решения при возникновении критических ситуаций, благодаря чему появляется возможность скорейшей ликвидации возникших неисправностей и минимизации риска для жизни людей, оказавшихся в неблагоприятной зоне.

Для обеспечения безопасности поражения людей током необходимо обеспечить изоляцию токонесущих частей оборудования, для чего рекомендуется проведение профилактических осмотров кабелей и всей электропроводки. Кроме того, необходимо обеспечить надежное заземление. Эффективным заземлением является заземление трубчатого типа с толщиной стенки 3,5 мм. Длина трубы обычно составляет 250 см, диаметр 5 см. Заземлители располагаются по четырехугольному контуру, с глубиной заложения около 80 см, причем сопротивление заземлителя не должно превышать 4 Ом.

Такое заземление помогает избежать несчастных случаев на объекте даже при возникновении многих аварийных ситуаций.

7. Экономико-технологическое обоснование.

В данном разделе представлены экономические расчеты по выявлению ресурсов необходимых для проведения научно-исследовательской работы.

В разделе рассчитываются:

1. Затраты на исследовательские работы.
2. Затраты на внедрение результатов исследования.
3. Экономические показатели исследования нового способа.

Все показатели исследования сводятся в таблицу.

7.1. Затраты на выполнение исследований

1.1. Основная заработная плата лаборанта 5 200 рублей в месяц.

В выполнения данной работы задействовано 1 человек.

$$Z_{\text{зпо}} = 5\,200 \cdot 4 = 20\,800 \text{ руб.}$$

Дополнительной оплатой является премия, в размере 20% от основной оплаты и равняющейся для 1^{го} лаборанта за 4^{ое} месяца 4 160 руб.

Окончательно заработная плата лаборанта за 4^{ое} месяца составит:

$$\Sigma Z_{\text{зп.}} = 24\,960 \text{ руб.}$$

1.2. Отчисления на социальные нужды (суммарный норматив отчислений в единый социальный налог) 34,2%.

$$Z_{\text{сн}} = 6\,489,60 \text{ руб.}$$

1.3. Стоимость материалов необходимых для проведения исследований (единовременная).

Компьютерное программное обеспечение (STATISTIKA-2012; ST Neural Networks; Maple 2012 г.)

$$Z_{\text{мо}} = 37\,750 \text{ руб.}$$

1.4. Стоимость энергоресурсов для испытаний:

$$Z_{\text{тэт}} = W_y \cdot S_n \cdot K_m \cdot t_m \cdot C_y, \text{ руб.} \quad (7-1)$$

где: W_y – установленная мощность оборудования – 1,5 кВт

S_n – количество оборудования – 1 шт.

K_m – коэффициент загрузки оборудования - 1

t_m - норма машинного времени работы оборудования

$$t_m = (1 \text{ смена} = 8 \text{ часов}) \cdot 22 \text{ раб. дня} \cdot 4 \text{ месяца} = 704 \text{ часа}$$

C_y - стоимость единицы электроэнергии – 2, 10 руб. кВт/час.

$$Z_{\text{тэт}} = 1,5 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 704 \cdot 2, 10 = 2 217, 60 \text{ руб.}$$

1.5. Технологическая себестоимость:

Определяется суммой технологических затрат на исследования:

$$C_T = Z_{\text{мо}} + Z_{\text{зпо}} + Z_{\text{зпд}} + Z_{\text{сн}} + Z_{\text{тэт}} + Z_{\text{ки}} \quad (7-2)$$

где: $Z_{\text{мо}}$ – стоимость материалов;

$Z_{\text{зпо}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{зпд}}$ – дополнительная заработная плата;

$Z_{\text{сн}}$ – отчисления на социальные нужды;

$Z_{\text{тэт}}$ – стоимость энергоресурсов;

$Z_{\text{ки}}$ – покупная стоимость расходных материалов (единовременная).

$$C_T = (48 400 + 20 800 + 4 160 + 6 489,60 + 2 217, 60 + 37750) = 119 817,20 \approx \\ \approx 120 000 \text{ руб.}$$

1.6. Производственная себестоимость исследовательских работ:

$$C_{\text{п}} = C_T (1 + \delta) \quad (7-3)$$

Где C_T – технологическая себестоимость;

δ - доля общепроизводственных затрат на технологическую себестоимость – 0,5.

$$C_{\text{п}} = 120 000 (1 + 0,5) = 180 000 \text{ руб.}$$

Стоимость производственных фондов определяется из групп данных фондов и складывается в следующие статьи затрат:

$$\Phi_{\text{оп}} = C_{\text{зд}} + C_{\text{мо}} + C_{\text{всп}} + C_{\text{пхи}} \quad (7-4)$$

где: $C_{\text{зд}}$ – первоначальная стоимость помещения;

$C_{\text{мо}}$ – общая стоимость машин, оборудования, включая расходы на их транспортировку и монтаж;

$C_{\text{всп}}$ – стоимость вспомогательного оборудования;

$C_{\text{пхи}}$ – стоимость производственно-хозяйственного инвентаря.

1.6.1. Стоимость помещения (аренда):

$$C_{\text{зд}} = \Pi \cdot B \cdot \alpha \cdot h \quad (7-5)$$

где Π – общая площадь, м^2 ;

B – высота помещения, м

α – показатель затрат, $\text{м}^3/\text{руб.}$ ($\alpha = 100$ руб.)

h – время аренды, мес.

$$C_{\text{зд}} = 12 \cdot 3,5 \cdot 100 \cdot 4 = 16\,800 \text{ руб.}$$

1.6.2. Общая стоимость машин, оборудования (единовременная):

$$C_{\text{мо}} = \Sigma C_0 \cdot S_p \cdot K_{\text{тр}} \cdot K_{\text{моб}} \quad (7-6)$$

где C_0 – оптовая цена оборудования (стоимость 1 компьютера 29 000 руб.);

т.к. гарантийный срок использования компьютера 24 месяца, то стоимость 1^{го} компьютера с учетом его использования для исследования в течении 4^х месяцев – 4 833 руб.

S_p – расчетное количество оборудования;

$K_{\text{тр}}$ – коэффициент, учитывающий расходы на монтаж и наладку ($1,01 \leq K_{\text{моб}} \leq 1,14$);

$$K_{\text{моб}} = 1,14.$$

$$C_{\text{мо}} = 4\,833 \cdot 1,10 \cdot 1,14 = 6\,061,0 \text{ руб.}$$

1.6.3. Стоимость вспомогательного оборудования (единовременная):

Определяется в процентном соотношении от общей стоимости машин (10%).

$$C_{всп} = 606,1 \text{ руб.}$$

1.6.4. Стоимость производственно-хозяйственного инвентарь.

Находят из расчета 500 руб. на рабочего и 800 руб. на специалиста.

$$C_{пхи} = 500 \cdot 1 + 800 \cdot 1 = 1\,300 \text{ руб. (единовременная):}$$

Определяем стоимость производственных фондов:

$$\Phi_{оп} = 16\,800 + 6\,061 + 606,1 + 1\,300 = 24\,767,10 \text{ руб.}$$

1.7. Общехозяйственная себестоимость исследовательских работ:

$$C_{ох} = C_{п} \cdot (1 + \lambda_{м}) \quad (7-7)$$

Где $C_{п}$ – производственная себестоимость;

$\lambda_{м}$ – соответствующая часть затрат = 0,15

$$C_{ох} = 180\,000 \cdot (1 + 0,15) = 207\,000 \text{ руб.}$$

7.2. Затраты на внедрение результатов исследования

1. Инвестиционные затраты:

Они складываются из затрат на приобретение земельных участков; приобретение машин и оборудования; затраты на строительство зданий и помещений, оснастку; затраты на прочие основные производственные фонды и нематериальные активы.

$$Z_{инв} = C_{пхи} + C_{зд} + C_{мо} + C_{всп} + C_{п}$$

$$Z_{инв} = 1300 + 16\,800 + 6\,061 + 606,1 + 180\,000 = 204\,767,10 \approx 205\,000 \text{ руб.}$$

2. Текущие затраты

Они включают: затраты на материалы, на энергоносители, на оплату труда и отчисления на социальные нужды, амортизация основных средств и нематериальных активов. Прочие текущие расходы принимаются до 5% от общепроизводственных расходов и до 10% от общехозяйственных расходов.

Амортизация составляет:

- для зданий и сооружений – 0,5% 84, 00 руб.

- для оборудования – 2,5% 454, 54 руб.

$$З_{\text{тек.з}} = 454, 54 + 84 = 538, 54 \text{ руб.}$$

2.1. Энергия на технологические цели (освещение помещения).

$$\mathcal{E}_{\text{т.ц.}} = W_y S_n K_m t_m C_y, \text{ руб.} \quad (7-8)$$

где: W_y – установленная мощность оборудования – 0,025 кВт

S_n – количество оборудования (ламп) – 6 шт.

K_m – коэффициент загрузки оборудования – 0, 75

t_m - норма машинного времени работы оборудования

$$t_m = (1 \text{ смена} = 8 \text{ часов}) \cdot 22 \text{ раб. дня} \cdot 4 \text{ месяца} = 704 \text{ часа}$$

C_y - стоимость единицы электроэнергии – 2, 10 руб. кВт/час.

$$\mathcal{E}_{\text{т.ц.}} = 0,025 \cdot 6 \cdot 0,75 \cdot 704 \cdot 2, 10 = 166, 32 \text{ руб.}$$

2.2. Энергия на хозяйственно-бытовые цели:

- теплоэнергия - 70 руб./Гкал. $70 \cdot 10 \cdot 4 = 2\ 800$ руб.

- вода хозяйственно-питьевая - 5, 10 руб./м³ $5,1 \cdot 0,5 \cdot 4 = 10, 20$ руб.

- сбросы в канализацию - 3 руб/м³ $3 \cdot 10 \cdot 4 = 120$ руб.

$$\text{Всего: } \mathcal{E}_{\text{хбц.}} = 2\ 800 + 10, 20 + 120 = 2\ 930, 20 \text{ руб.}$$

2.3. Зарботная плата работника занимающегося не внедрением, а розыском заказов - (менеджер) 1 человек, с отсрочкой выполнения заказа на 4^{ре} месяца (выполнение по окончании исследования):

$$З_{\text{зпом}} = 15\ 000 \text{ руб./мес.} + 5\% \text{ от стоимости заказа}$$

$$З_{\text{зпдм}} = 5\% \approx 10\ 000 \text{ руб./мес.}$$

$$\Sigma З_{\text{зпм.}} \approx (15\ 000 + 10\ 000) \cdot 4 \approx 100\ 000 \text{ руб.}$$

2.3.1. Отчисления на социальные нужды менеджера:

(суммарный норматив отчислений в единый социальный налог)

$$З_{\text{снм}} = 34,2\%$$

$$З_{\text{снм}} = 34\ 200 \text{ руб.}$$

3. Итоговые затраты на научные исследования, проектно-конструкторские работы (НИОКР) и внедрение нового исследования:

$$Z_{\text{ниокр}} = [\Sigma Z_{\text{зп}} + Z_{\text{сн}} + Z_{\text{тэт}} + Z_{\text{мо}}] \cdot (1,05 + 1,15) + \Phi_{\text{оп}} + [Z_{\text{тек.з}} + \mathcal{E}_{\text{тц.}} + \mathcal{E}_{\text{хбц.}} + \Sigma Z_{\text{зпм.}} + Z_{\text{снм}}] = [24\,960 + 6\,489,60 + 2\,217,60 + 37\,750] \cdot (1,05 + 1,15) + [24\,767,10 + 538,54 + 166,32 + 2\,930,20 + 100\,000 + 34\,200] = 311\,520,00 \text{ руб.}$$

7.2. Затраты на внедрение результатов исследования

Пример внедрения предлагаемого метода

Одной из наиболее перспективных отраслей применения предлагаемого метода, является авиация.

Рассмотрим возможность получения экономического эффекта от предлагаемого метода, на примере авиазавода «Сокол», изготавливающего самолеты фирмы Бириева Бе-103, с годовой программой 18 штук.

Получение отверстий в технологической оснастке из дюралюминиевых сплавов с высоким содержанием кремния (более 3%) применяемых при производстве изделия Бе-103, является сложной и трудоемкой задачей, требующей вложения больших материальных затрат, вследствие чего происходит значительное удорожание конечного продукта, самолета.

В технологической оснастке (толщина стенки $B=12$ мм) авиакомплекса Бе-103, необходимо просверлить 687 крепежных отверстий под резьбу М8 с 7^{мой} степенью точности.

В качестве обрабатываемого материала, применяется холоднокатаный не подвергнутый старению дюралюминиевый сплав Д16.

В качестве оборудования предлагается применить типовой обрабатывающий центр со встроенной системой АСИ, оснасткой, системой ЧПУ NC Siemens 840 D фирмы Okuma Mac и управляющей программой; общей стоимостью 16 700 000 рублей.

Расчет необходимого количества станков проводится по формуле:

$$R_{p.ГЛУ} = \frac{T_{ум.} \cdot K}{\Phi_{\delta} \cdot \eta}; \text{ шт.}, \quad (7-9)$$

где $T_{ум}$ – годовая программа 12366 отв.

K – поправочный коэффициент среднесуточной загрузки оборудования – 0,9 (для станков с ЧПУ)

$T_{ум} \cdot K = 12366 \cdot 0,9 = 11129$ шт. – трудоемкость годовой программы;

$\Phi_{\delta} = 3652$ ч – действительный годовой фонд времени работы оборудования в условиях ГАУ;

$\eta = 2,9$ – принятый для ГАУ коэффициент загрузки.

$$R_{p.ГЛУ} = \frac{11129}{3652 \cdot 2,9} = 1,01 \approx 1 \text{ шт.}$$

Для получения необходимого кол-ва отверстий достаточно 1-ого станка.

В качестве инструмента, для получения отверстий предлагается использовать современные цельно твердосплавные сверла фирмы Sandvik Coromant R-850, с физическим покрытием и внутренней подачей СОТС $\text{Ø}6,3\text{-H7}$, позволяющими обработать 65 отверстий в сплаве Д16, за один проход, без потери качества обработки и своих режущих способностей, стоимостью 2 632 рубля каждое. Тогда для получения 687 отверстий необходимо $687:65=11$ сверл $\text{Ø}6,3\text{-H7}$

В качестве смазочно-охлаждающей технологической среды, используется 5% эмульсия модели Vlasocut-BC 25, стоимостью 123 рубля за литр.

Для обработки 687 отверстий необходимо 12 литров эмульсии.

При изготовлении 18 самолетов Бе-103, требуется просверлить $18 \cdot 687 = 12\,366$ отверстий $\text{Ø}6,3\text{-H7}$, себестоимость изготовления которых составит:

1. Затраты на НИОКР и маркетинг - 311 520 руб.
2. Станок – 16 700 000 руб.
3. СОТС - $123 \cdot 12 \cdot 18 = 26\,568$ руб.
4. сверла фирмы Sandvik Coromant R-850– $2\,632 \cdot 11 \cdot 18 = 521\,136$ руб.
5. трудозатраты на изготовление составят:

Таблица 7.1

Расчёт трудозатрат

Должность	Кол-во чел	Среднемесячная зар. плата, руб.	Кол-во дней работы проекту в год	Сумма, руб./год
1	2	3	4	5
1. Начальник цеха	1	12000	60	$1 \cdot 12000 \cdot 60/22 = 32\ 800$
2. ИТР цеха	1	8000	90	$1 \cdot 6000 \cdot 90/22 = 24\ 600$
3. Наладчики	1	7900	75	$1 \cdot 7900 \cdot 75/22 = 26\ 950$
4. Рабочий-станочник	1	7500	260	$1 \cdot 7500 \cdot 260/22 = 89\ 000$
5. Строительно-монтажные рабочие	2	6000	3	$2 \cdot 6000 \cdot 3 / 22 = 1650$
6. ВСЕГО трудозатраты на установку станка и обработку 12 366 отв.	6	-	-	175 000

Итого затраты на получение отверстий Ø6,3-Н7;

$$Z_{\text{отв.}} = 175000 + 26\ 568 + 521\ 136 = 722\ 704 \text{ руб.}$$

Таким образом, суммарные затраты на изготовление крепежных отверстий Ø6,3-Н7 в технологической оснастке Бе-103 составят:

$$\Sigma_{\text{затраты}} = 311\ 520 + 16\ 700\ 000 + 26\ 568 + 521\ 136 + 175\ 000 = 17\ 734\ 224 \text{ руб.}$$

Кроме получения отверстий Ø6,3-Н7 в технологической оснастке Бе-103 необходимо сверлить более 12 различных диаметров крепежных отверстий, общим кол-вом более 4500 шт., при этом нет необходимости в замене оборудования, дополнительных наладчиках и станочниках, а так же проведении новых НИОКР, необходимо рассчитать стоимость дополнительного оборудования, затрат на применяемый в каждом случае инструмент, трудозатраты, а так же использованный СОТС.

Проведя обобщенный компьютерный расчет установлено, что годовые общие затраты на производство крепежных отверстий всех видов для

самолетов Бе-103 составят $\Sigma_{\text{затраты общ.}} = 124\,587\,943$ руб., а суммарные годовые затраты на получение отверстий всех видов $\Sigma Z_{\text{отв.}} = 5\,416\,867$ руб.

При том, что установочная партия самолетов не изменится срок окупаемости данного внедрения составит (лет):

$$T_{\text{ок}} = \Sigma_{\text{затраты.}} / Z_{\text{отв.}} = 124\,587\,943 / 5\,416\,867 = 2,3 \quad (7.10)$$

Кроме того метод применим и для другой авиатехники, а производство данного вида авиатехники неуклонно растет, т.к. общая потребность в каком-либо виде самолета составляет 97шт. в год.

Необходимо отметить, что полученный результат не может служить показателем примененного подхода к решению поставленной в исследовании задачи, т. к. данный экономический расчет не учитывает всей специфики проведенного исследования и представлен лишь с целью показать навыки экономического расчета, полученные в ИМаш.

Все экономические показатели сведены в таблицу 7.2.

Таблица.7.2.

**Экономические показатели затрат на выполнение и внедрение
результатов исследований**

Наименование показателя	Значение по проекту	Единица измерения
1. Затраты на выполнение исследований		
1.1. Заработная плата основная и дополнительная работников, непосредственно выполняющих исследовательские работы	24 960	Руб.
1.2. Отчисления на соци. нужды	6 489, 60	Руб.
1.3. Стоимость материалов (прогр.)	37 750	Руб.
1.4. Стоимость энергоресурсов	2 217, 60	Руб.
1.5. Технологическая себестоимость	120 000	Руб.
1.6. Производственная себестоимость исследовательских работ	180 000	Руб.
1.7. Стоимость производственных фондов	24 767, 70	Руб.
1.8. Общехозяйственная себестоимость исследовательских работ	207 000	Руб.
2. Затраты на внедрение результатов исследования		
2.1. Инвестиционные затраты	205 000	Руб.
2.2. Текущие затраты	538, 54	Руб.
2.2.1. Энергия на технологические нужды	166, 32	Руб.
2.2.2. Энергии на хозяйственно-бытовые цели	2 930, 20	Руб.
2.3. Заработная плата работников занимающихся внедрением	100 000	Руб.
2.3.1. Отчисления на социальные нужды работников занимающихся внедрением	34 200	Руб.
3. Итоговые затраты на научные исследования (НИОКР) за 4-месяца	311 520, 00	Руб.
Затраты на внедрение результатов исследований, на примере сверления крепежных отверстий Ø6,3-Н7, применительно к технологической оснастке самолета Бе-103		
4. Кол-во необходимых отверстий	12 366	шт.
5. Кол-во применяемого оборудов.	1	шт.
6. Кол-во применяемого инструм.	11	шт.
7. Стоимость станка	16 700 000	руб.
8. Стоимость инструмента (сверла)	2 632	руб.
9. Трудозатраты на обработку	175 000	руб.
10. Затраты на получение отверстий	722704	руб.
11. Суммарные затраты для отв. Ø6,3	17 734 224	руб.
Затраты на внедрение результатов исследований, для всех видов крепежных отверстий, применительно к технологической оснастке самолета Бе-103		
12. Общие затраты на сверление	5 416 867	руб.
13. Общие суммарные затраты	124 587 943	руб.
14. Срок окупаемости	2, 3	года

ЗАКЛЮЧЕНИЕ - ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработаны оптимальные элементы режимов резания для алюминиевых и коррозионностойких сплавов, позволившие повышать стойкость инструмента в 2 раза, снизить время обработки в 1, 5 раза.
2. Экспериментально определены стойкостные зависимости для оптимизации элементов режима. Установлена степень влияния параметров процесса на стойкость инструмента.
3. Разработаны функции цели для оптимизации режимов по критериям наибольшей производительности, наименьшей себестоимости, приведенных затрат и наименьшей себестоимости при постоянной производительности и наибольшей производительности при постоянной стойкости.
4. Изучен характер влияния вида сплавов на закономерности изменения оптимальных режимов резания.
5. Определена топология и обучены нейронные сети MLP для определения стойкости инструмента в зависимости от элементов режима.

Литература

1. CoroPak Training CD. Focus Area 03.2. C – 2948: 045 – 47 AB Sandvik Coromant 2003.
2. Вращающийся инструмент. C – 1000: 8 – RUS/01. AB Sandvik Coromant 2002.8.
3. Бобровский А.В., Драчев О.И., Рыбаков А.В. Резание цветных металлов. – СПб.: Политехника, 2001 – 200 с.
4. Контрольно-измерительная техника. Обзор изделий фирмы ZOLLER. – 2004. – 15 с. (www.faszination-messen.de, www.genius3-zollen.info).
5. Modern Metal Cutting. – AB Sandvik Coromant, Sandviken, 1994. – 938 p.
6. CoroDrill Delta – C. Use`s Guide. C – 1229: 011 ENG/01, 2001. – 37 p.
7. Вращающийся инструмент. Каталог. AB Sandvik Coromant, 2003 – 665 с.
8. ГОСТ 25762-83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий. – М.: Изд-во стандартная, 1985 – 41 с.
9. Высокопроизводительная обработка металлов резанием. – М.: Изд-во «Полиграфия», 2003 – 301 с.
10. Новые инструменты от Sandvik Coromant. AB Sandvik Coromant (C – 2900: 120 – RUS/01), 2004: 1 – 144 с.
11. Deep hole drilling. (C – 1202: 1 – ENG/01) AB Sandvik Coromant, 2003.
12. Панов В.С., Чувили А.М. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. – М.: МИСИС, 2001 – 428 с.
13. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника). /А.В И. М.: Машиностроение, 2003 – 576 с.
14. Политика М.Ф. Теория обработки резанием. – Томск, Томский политический институт, 1975 – 101 с.
15. Боровиков В. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов – СПб; Питер, 2001 – 656 с.
16. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии – М.; Машиностроение, 1986 – 359 с.
17. Крагельский И.В. Трение и износ, М.: Машиностроение, 1968 – 480 с.

18. Крагельский А.В., Добычин М.Н., Камбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977 – 526 с.
19. Кащеев В.Н. Абразивное разрушение твердых тел. – М.: Наука, 1970.
20. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания материалов. – М.: Наука, 1970 – 315 с.
21. CoroDrill Delta-C (R850...) Regrinding Manual (J.Fusendahl 021209 Revised 030114) – 13 p.
22. CoroDrill Delta-C (R840...) Regrinding Manual (J.Fusendahl 020425 Revised 020812) – Пр.
23. Лоладзо Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982 – 320 с.
24. Булгаков В.З. Диффузия в металлах и сплавах. – М.: Гостехиздат, 1949
25. Бэррер Р.М. Диффузия в твердых телах. – М.: ИЛ, 1948 – 504 с.
26. ГОСТ 23002-78. Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – М.: Издательство стандартное, 1978 – 14 с.
27. Кордонский Х.В. и др. Вероятностный анализ процессов изнашивания – М.: Наука, 1968 – 55 с.
28. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978 – 592 с.
29. Резание металлов /Г.И. Граковский и др. – М.: Машиздат, 1954 – 472 с.
30. Вульф А.М. Резание металлов. – Л.: Машиностроение, 1973 – 496 с.
31. Развитие науки о резании металлов. /В.Ф. Бобров и др. – М.: Машиностроение, 1967 – 416 с.
32. Оптимизация режимов обработки на металлорежущих станках /Гильман А.М. и др. – М.: Машиностроение, 1972 – 188 с.
33. Великанов К.М., Новожилов В.И. Экономические режимы резания. – Л.: Машиностроение, 1972 – 120 с.
34. Полетика М.Ф. Теория резания металлов. Учебная пособие. – Томск: издательство ТПИ им. Кирова, 1980 – 95 с.

35. Якобс Г.Ю. Якоб Э., Кохан Д. Оптимизация резания. Параметризация способов обработки резанием с использованием технологической оптимизации. – М.:Машиностроение,1981 – 279 с.
- 36.Андерссон А. Экологические аспекты использования в металлообработке многогранных быстросменных твердосплавных пластин. (Пер. Ю.Шпектор, ред. С.Дыченко) – Sandvik Coromant, 2006.
- 37.Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1974 – 231 с.
- 38.Башков В.М., Кацев П.Г. Испытания режущего инструмента на стойкость. – М.: Машиностроение, 1985 – 136 с.
- 39.Дьяконов В. Maple 6: учебный курс – СПб.: Питер, 2010 – 608 с.
- 40.Матросов А.В. Maple 6. Решение задач высшей математики и механики – СПб.: БХВ – Петербург, 2011 – 528 с.
- 41.Дьяконов В. MATLAB: учебный курс – СПб.: Питер, 2001 – 560 с.
- 42.Дьяконов В.П. Компьютерная математика. Теория и практика – М.: Нолидж, 1999г.: «Нолидж», 2001 – 1296 с.
- 43.Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001 – 480 с.
- 44.MATLAB Optimization Toolbox – 52 p.
- 45.Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс – М.: Радио и связь, 1988
- 46.Жилинскас А., Шалтянис В. Поиск оптимума: компьютер расширяет возможность – М.: Наука, 1989 – 128 с.
- 47.Минимизация в инженерных расчетах на ЭВМ. Библиотека программ /С.Ю.Гусин и др. – М.: Машиностроение, 1981 – 120 с.
- 48.Аттеков А.В., Галкин С.В., Зарубин В.С. Методы оптимизации – М.: Издательство МГГУ им. Н.Э.Баумана, 2001 – 440 с.
- 49.Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1988 – 552 с.
- 50.Мельник Е.Е. Метод и средство контроля состояния и оценки стойкости твердосплавного режущего инструмента. Автореферат Мельника Е.Е. на соискание ученой степени к.т.н., Орел, 2003 – 16 с.

- 51.Авилова Н.В. Оптимизация режимов металлообработки по критериям производительности и себестоимости с учетом контрольных операций. Автореферат Авиловой Н.В. на соискание ученой степени к.т.н., Ростов-на-Дону, 2003 – 22 с.
- 52.Баранов А.В. Аналитический метод оптимизации режимов резания при обработке отверстий осевым инструментом. - Автореферат Баранова А.В. на соискание ученой степени д.т.н., Рыбинск, 2000 – 32 л.
- 53.Петруха П.Т., Чубанок А.Д. и др. Обработка резанием высокопрочных, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей. – М.: Машиностроение, 1980 – 169 с.
- 54.Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении. Справочник. – М.: Машиностроение, 2002 – 264 с.
- 55.Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976 – 278 с.
- 56.Подураев В.Н., Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Высшая школа, 1974 – 587 с.
- 57.Режимы резания труднообрабатываемых материалов/ Я.Л. Гуревич и др. – М.: Машиностроение, 1986 – 240 с.
- 58.Шифрин А.Ш., Резницкий Л.М. Обработка резанием коррозионно-стойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов. – М.: Машгиз, 1964.
- 59.Петруха П.Г. и др. Обработка резание высокопрочных, коррозионно-стойких и жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1980 – 169 с.
- 60.Петруха П.Г. и др. Резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1972 – 176 с.
- 61.Бобровский А.В. Резание цветных металлов. – 2001.
- 62.Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001 – 382 с.
- 63.Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001 – 182 с.

64. Коллан Р. Основные концепции нейронных сетей. – М.: «Вильямс», 2001 – 287 с.
65. Авилова Н.В., Гордиенко А.В., Мотин Д.В. Определение режимов механической обработки с учетом контрольных операций по критерию себестоимости /Ростов – н/д, 2001 – ДСП в ВИНТИ 25.10.01, № 2238.
66. Авилова Н.В., Мотин Д.В. Себестоимость механообработки с учетом состояния технической системы. /Ростов – н/д, 2001 – ДСП в ВИНТИ 25.10.01, № 2236.
67. Иноземцев А.Н., Пасько Н.И., Дубовицкий Д.В. Оптимизация скорости резания на основе самообучения в режиме реального времени. // Изв. Тульского государственного университета. Сер. Машиностроения Вып. 1 (спец. – Тула, Гул ГУ, 2003 – с. 8 – 14).
68. Дубовицкий Д.В. Оптимизация режимов резания на основе экономических критериев. // Автоматизация и информация в машиностроении. – Тула: Граф и К⁰, 2001 – с. 77 – 79.
69. Силин С.С., Баранов А.В. Оптимизация операций механической обработки на основе использования энергетических критериев. // Высокие технологии в машиностроении и приборостроении: Вестник Верхневолжского АТН РФ. Выпуск 1/РТ АТ А, Рыбинск, 1994 – с. 86.
70. Новинюк О.С., Гродзинский Э.Я. Оптимизация режима резания при алмазном зубохонинговании с электроэрозионной активацией рабочей поверхности инструмента. – Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1980 – вып. 1, с 7 – 9.
71. Расчет режимов резания для обработки на металлорежущих станках. /Этин А.О. и др. – Вестник, Машиностроение, 1972, № 5, с. 57 – 62.