

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. И. РАЗЗАКОВА**

Кафедра «Технология машиностроения»

УДК 627.09

Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Проректору по НР и ВС

КГТУ им. И. Раззакова

д.ф-м.н., проф. Султаналиева Р.М.

«_____» _____ 2018г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**«Организационно-технологическое проектирование производственных
систем»**

Заведующий отделом науки

к.ф-м.н., доцент

Аскарбеков Р.Н.

Руководитель по НИР

к.т.н., доцент

Трегубов А.В.

Бишкек 2018

Список исполнителей

Трегубов А.В. к.т.н., доцент, зав. кафедрой,	научный руководитель, написание	1 раздела отчета,
Рагрин Н.А. д.т.н., проф.	написание отчета,	2 раздела
Омуралиев У.К. к.т.н. проф.	написание отчета	3 раздела
Мамбеталиев Т.С. к.т.н. доцент	написание отчета	4 раздела
Сартов Т.Э. к.т.н., доцент	написание отчета	5 раздела
Жумалиев Ж.М. доцент	написание отчета	6 раздела
Сопоев М.К. ст. преподаватель	написание отчета	7 раздела
Айнабекова А.А. ст. преподаватель	написание отчета	8 раздела
Дыйканбаева У.М. преподаватель	написание отчета	9 раздела
Белекова Ж.Ш. преподаватель	написание отчета	10 раздела
Оморова А. преподаватель	написание отчета	11 раздела
Сопоев М.К. ст. преподаватель	оформление и редактирование отчета	

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДИСКОВОГО АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ РЕЗАНИЯ ПРИРОДНОГО КАМНЯ.....	8
2. РАЗРАБОТКА И КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ.....	24
3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ....	37
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ.....	50
5. О МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН	60
6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ НА БАЗЕ УСТАНОВКИ АПР-404.....	72
7. УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	84
8. РАЗРАБОТКА ПУТЕЙ И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТВЕРСТИЙ ПРИ СВЕРЛЕНИИ.....	93
9. ЛИТЕЙНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ КАФЕДРЫ «ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ»: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ	105
10. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ СВАРОЧНЫЕ РЕЖИМЫ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА (AL-MG) 5083 ПРИ СВАРКЕ СМТ.....	114
11. A MATHEMATICAL MODEL FOR TOP NUTATION BASED ON INERTIAL FORCES OF DISTRIBUTED MASSES.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	132

Реферат

Отчет содержит текст на **139** стр., **66** иллюстраций и **75** использованных источников.

Ключевые слова: сверло, стойкость, скорость резания, подача, диаметр, твердость, геометрические параметры сверл, стойкость инструмента, быстрорежущие спиральные сверла, кривые износа режущих элементов, струйно-абразивная резка, лазерная резка материалов, абразивные частицы, спектры пороговых кривых, конструкционная прочность, сварка трением, электроэрозионная обработка.

Основным объектом исследования является продукция, изготавливаемая на машиностроительных предприятиях Кыргызстана в условиях мелкосерийного и серийного производства.

В отчете рассматриваются вопросы: оптимизации геометрических параметров сверл применительно к конкретным условиям обработки деталей; пути повышения наработки до функционального отказа быстрорежущих спиральных сверл на основе анализа кривых износа их режущих элементов; экспериментальные исследования по построению спектров пороговых кривых (диаграмм) конструкционной прочности при совмещенном осевом и внецентренном растяжении сталей с трещинами разных длин; анализ технологий сопряжения деталей методом сварки трением; пути обеспечения точности и производительности электроэрозионной обработки, повышение прочности коромысла ударного узла с механизмом переменной структуры.

ВВЕДЕНИЕ

В развитии промышленного производства можно выделить две эры: индустриальную и информационную. Первая прошла свой путь развития, начиная с прошлого века, и характеризуется преимущественным развитием отраслей материального производства, которое в значительной степени стало массовым, крупносерийным, ориентированным на рынки большой емкости и на изделия массового спроса. В эпоху индустриализации основным фактором повышения эффективности производства была преимущественно экономия затрат живого труда в самых различных сферах деятельности при снижении затрат ресурсов на единицу конечной продукции за счет повышения удельной мощности технологического оборудования.

Современная технология изготовления машиностроительных изделий отличается огромным разнообразием, что соответственно требует создания большого количества многообразного оборудования и различных методов организации производства.

На смену индустриальной эры пришла информационный период, переход к которому в странах западной Европы начался в 50 - 60-е годы прошлого столетия и завершился в наиболее экономически развитых странах мира к середине 80-х гг. Информационную эру отличает преимущественный рост экономики, сферы услуг, особенно для отраслей, связанных с переработкой информации и осуществлением посреднической деятельности всех видов.

Производство в информационную эру становится в высшей степени гибким, не массовым и ориентируется на индивидуальные запросы потребителей и небольшие по емкости рынки сбыта.

Вступление Республики в рыночную экономику выдвинуло перед машиностроением ряд новых проблем, без решения которых невозможно обеспечить конкурентоспособность выпускаемой продукции: экономия материальных, энергетических и трудовых ресурсов; существенное

повышение качества продукции; ускорение темпов сменяемости ассортимента машин. Главным действующим фактором, определяющим возможность решения указанных проблем, является эффективность используемых технологических процессов (ТП). Наука о ТП формировалась постепенно по мере решения основных задач, связанных с проектированием. Было установлено, что ТП есть часть производственного процесса, сопровождающаяся изменением геометрических форм и размеров, а также физико-механических свойств поверхностного слоя. Затем была изучена структура ТП и его основная составляющая — технологическая операция, которая также характеризуется структурой и содержанием. Структура операции определяется количеством и последовательностью выполняемых переходов, а также содержанием — применяемыми методами обработки. Основными задачами, решаемыми при проектировании ТП, являются обеспечение необходимого качества и производительности обработки. Поэтому на следующем этапе основное внимание было уделено разработке вопросов точности обработки как главного параметра качества. Рассматриваются новые факторы, определяющие эффективность используемых технологических процессов. Учитывая широкие технологические возможности ионно-плазменных методов обработки, а также необходимость повышения эффективности ТП механической обработки, предлагается рассматривать методы поверхностной модификации не как отдельные ТП, а как заключительные операции единого ТП, обуславливающего формирование заданной формы, размеров, параметров качества, заданных физико-механических свойств поверхностного слоя детали. Реализация поставленной задачи потребует разработки: единых требований, предъявляемых к параметрам качества поверхностного слоя с учетом последующей поверхностной модификации; классификации различных методов механической обработки с учетом формируемых свойств поверхностного слоя; классификации различных методов поверхностной модификации с учетом эффективности и экономической целесообразности

применения, экологической безопасности; основополагающих принципов построения интегральных ТП, построенных на базе функционального объединения технологии получения заготовки, механической обработки и поверхностной модификации; методики контроля параметров поверхностного слоя, обуславливающей эффективное применение методов поверхностной модификации. Такой подход является принципиально новым и требует серьезной теоретической проработки и систематизации ранее накопленных знаний для достижения единой цели — создания более прогрессивных ТП, обеспечивающих изготовление новых видов техники.

Технолог в современных условиях должен выполнять в единицу времени не только больший объем работ, но и делать ее на высоком уровне. Решение этой проблемы лежит в автоматизации труда технолога, а это, в свою очередь, требует дальнейшего развития научных основ технологии машиностроения и совершенствования САПР ТП (Система Автоматизированного Проектирования, например, SolidCAM). Все это должно идти в направлении более глубокого изучения закономерностей технологических процессов, повышения уровня обобщений, формализации результатов исследований, применения математических методов, совершенствования методов расчета и разработки технологических процессов, проектирования средств технологического оснащения, методов организации технологической подготовки производства.

1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДИСКОВОГО АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ РЕЗАНИЯ ПРИРОДНОГО КАМНЯ.

В настоящее время для производства облицовочных и архитектурных изделий из природного камня на камнеобрабатывающих станках широко применяется дисковый алмазный инструмент [1,3,4].

Основной технологической операцией на камнеобрабатывающих предприятиях Кыргызстана является распиловка блоков камня на плиты. Эта операция выполняется на ортогонально-фрезерных станках итальянских фирм «Терцаго» Т-12GM, Т-14GM и «БРА» Р-66, Р-40 [6]. В качестве инструмента для распиловки камня используются алмазно-дисковые пилы, которые представляют собой стальной диск, армированный алмазонасными сегментами (рис.1.1).

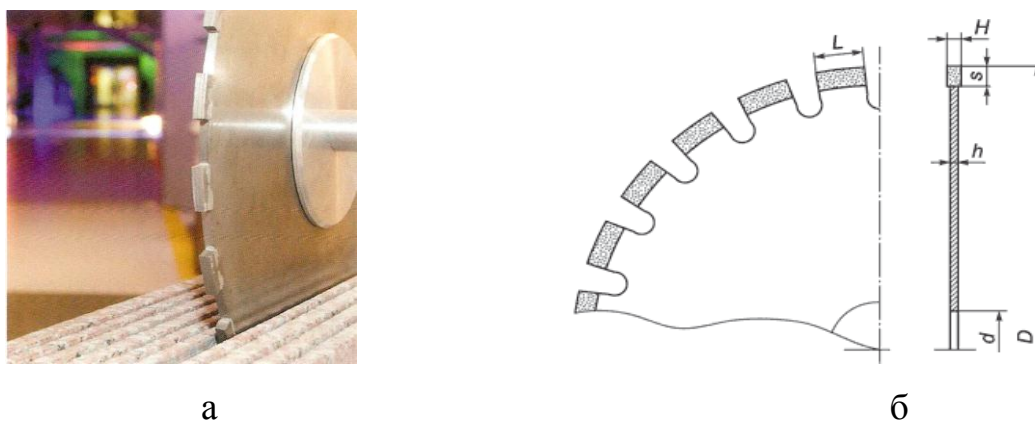


Рис. 1.1 Общий вид дискового алмазного инструмента: а- процесс распиловки природного камня на станке; б- конструктивная схема дисковой алмазной пилы.

На эффективность алмазно-дисковой распиловки камня существенное влияние оказывают режимы резания, глубина, ширина пропила и конструктивные параметры пилы и крепость природного камня.

У дисковой алмазной пилы главным рабочим параметром является наружный диаметр, который влияет на устойчивость инструмента и

выбирается в зависимости от глубины (высоты) пропила по формуле:

$$D=2 H_{\max }+2 d_{\phi}=2_{\Delta} H_{\max }, \quad (1.1)$$

где, $H_{\max}$ – максимальная глубина (высота) пропила; d_{ϕ} – диаметр прижимного фланца, мм; $H_{\max} - 0,05 H_{\max}$ – припуск на технологический зазор, мм.

В свою очередь, глубина пропила выбирается в зависимости от требуемой ширины плиты, величина которой составляет 150-300 мм.

Режимы обработки природного камня алмазно-абразивным инструментом, характеризуются скоростями подачи и резания, а также величиной глубины резания за один проход инструмента. При дисковой распиловке большое значение имеет правильный выбор схемы обработки (рис. 1.2): «по подаче» (направление вращения инструмента и подачи заготовки совпадают (рис. 1.2а) и «против подачи» (направление вращения и подачи противоположны) (рис. 1.2б). При обработке на схеме «против подачи» образуется стружка толщиной от нуля до ее максимального значения, что повышает стойкость алмазного инструмента. В то же время, при обработке «по подаче» осуществляется снятие стружки не с нуля, а с уже заданной толщины, что в конечном итоге снижает его износостойкость на 10 – 12%.

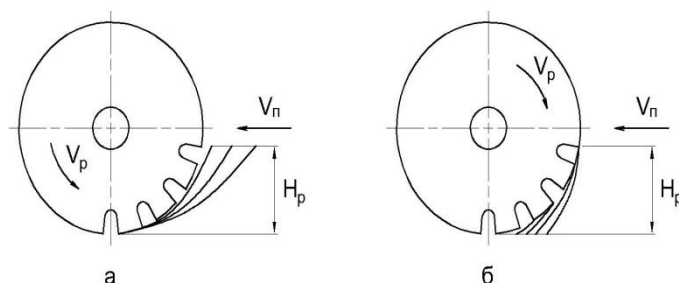


Рис.1.2. Схема основных формообразующих движений инструмента снятия стружки: а – при резании «против подачи»; б – при резании «по подаче»»

Как следует из экспериментальных данных, опубликованных в работах [2.5], при резании гранита алмазным сегментным отрезным кругом диаметром 500 мм с U-образными пазами, зернистостью А50 с концентрацией 50% на связке М1, удельный износ алмазоносного слоя при встречном способе подачи инструмента в 2-3 раза выше, чем при попутном (рис.1.3). Повышенный износ обусловлен динамическим приложением тангенциальной нагрузки на алмазное зерно в начальный период его контактирования с распиливаемой породой. В результате неизношенное алмазное зерно вырывается из металлической связки, что существенно снижает время работы алмазоносных сегментов дискового инструмента.

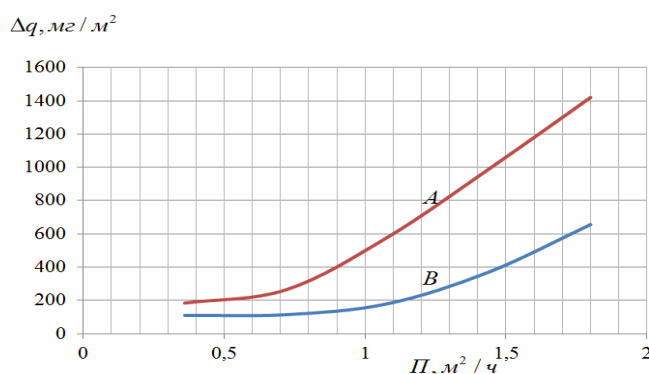


Рис.1.3. Зависимость удельного износа алмаза Δq от производительности с заданным условием ($V_{\Pi}=6$ м/мин, $H=1; 2; 3; 4; 5$ мм) при: А – резании против подачи; В – резании по подачи

Уменьшить износ алмазоносного слоя при встречном способе подачи инструмента можно только обоснованно выбранными режимами резания и конструктивными параметрами инструмента, а также мерами по его интенсивному охлаждению.

В середине 80-х годов ведущие фирмы, производители камнеобрабатывающего оборудования, с целью повышения производительности распиловки камня пошли по пути увеличения максимальных диаметров алмазно-дисковых пил с 1000-1500 мм до 2500-3000 мм и скорости резания с 40-60 м/с до 90-100 м/с в зависимости от

физико-механических свойств (абразивности и твердости) обрабатываемого камня. Это объясняется тем, что производительность ортогонально-фрезерных станков прямо-пропорционально зависит от глубины резания и скорости резания. Однако, как показала практика, увеличение наружного диаметра приводит к увеличению суммарной погрешности установки пилы на шпинделе станка (рис.1.4), которая складывается из эксцентricности шпинделя и диска пилы, торцевого и радиального биения пилы, не перпендикулярности прижимного фланца оси шпинделя.

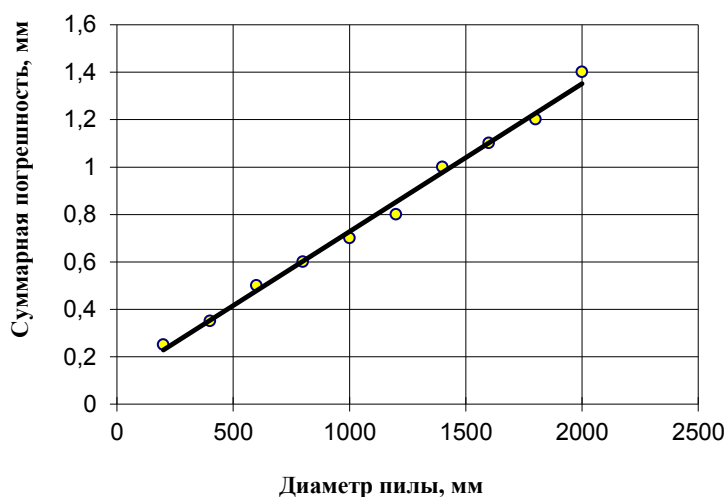


Рис.1.4. Зависимость суммарной погрешности от диаметра дисковой алмазной пилы.

Величина суммарной погрешности установки дисковых пил диаметром 2500-3000 мм составляет 1,5-1,6 мм. Если еще учесть минимальные погрешности самого станка, связанные с люфтами при продольном и поперечном перемещении пилы относительно стола, то суммарные погрешности увеличатся минимум на 0,3 мм и составляют 2 мм.

Кроме того, при увеличении наружного диаметра пилы для обеспечения требуемой боковой динамической жесткости, исключающей потерю устойчивости инструмента необходимо увеличить диаметр прижимного диска и толщину диска (рис.1.5). В свою очередь, увеличение

толщины пилы в совокупности с суммарной погрешностью установки приводят к увеличению пропила, ширина которого становится соизмеримой толщине плиты (15-20 мм), и, соответственно, к повышению энергоемкости резания и потерь сырья.

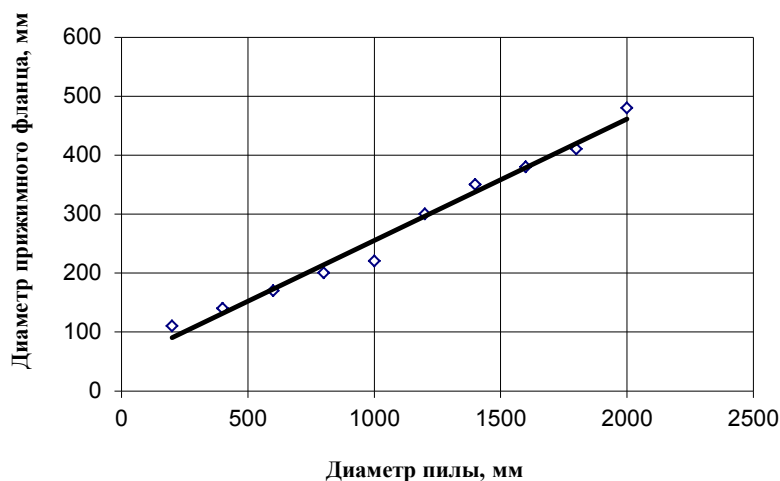


Рис.1.5. Зависимость толщины пилы от диаметра дисковой алмазной пилы.

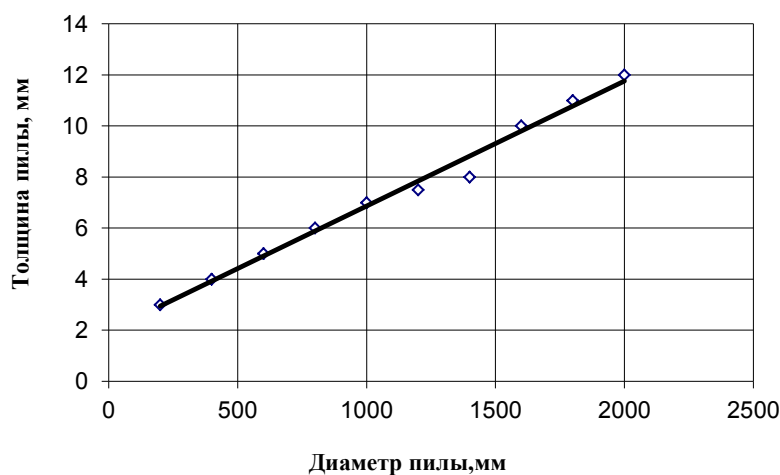


Рис.1.6. Зависимость диаметра прижимного фланца от диаметра дисковой алмазной пилы.

Необходимо отметить, что при использовании в ортогонально-фрезерных станках дисковых пил диаметром 2000-3000 мм и максимальных скоростях резания для нормального охлаждения инструмента и выноса

шлама из зоны резания требуется подача охлаждающей жидкости объемом свыше 100 л/мин при минимальном рабочем давлении 0,3 МПа, что в два раза превышает аналогичные показатели станков Т-126М и Т14GM. Рекомендуемый объем охлаждающей жидкости определяется по формуле:

$$Q = D/25 \quad (1.2)$$

где, D – диаметр пилы.

Экспериментальные испытания, проведенные ИСМ Академии наук Украины, установлено, что увеличение скорости резания свыше 40 м/с приводит к повышенному износу алмазов вследствие возрастания тепловых и других величин.

Из диаграммы изменения критической скорости резания дисковой пилы в зависимости от ее диаметра (рис.1.7) видно, что для обеспечения устойчивой работы дисковых пил диаметром свыше 2000 мм критическая скорость резания не должна превышать 60 м/с, что 1,5 раза ниже установленной для ортогонально-фрезерных станков.

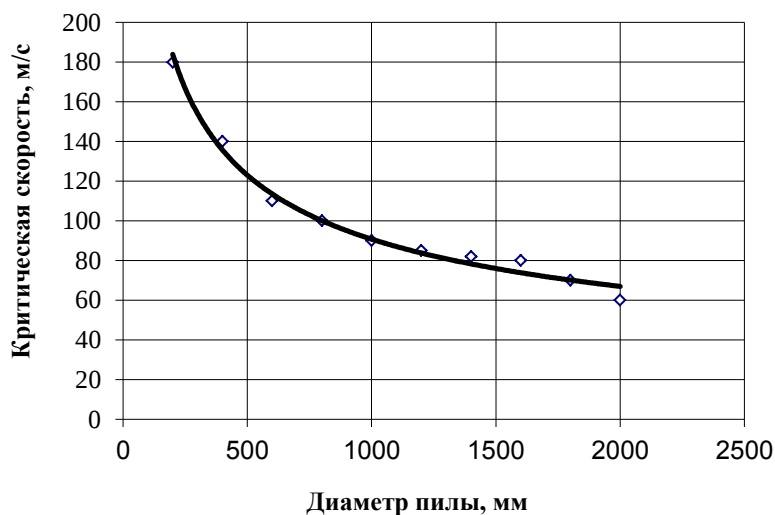


Рис.1.7. Зависимость критической скорости дисковой пилы от ее диаметра.

Обобщение зарубежного и отечественного опыта распиловки природного камня [6] показывает, что рациональная скорость резания

изменяется в пределах от 20 до 80 м/с в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала (рис.1.8). Отсюда следует, что для обеспечения максимальной производительности и универсальности распиловочных станков для получения плиток из различных пород камней целесообразно оснащать эти станки инструментом, диаметр которого не превышает 1000 мм.

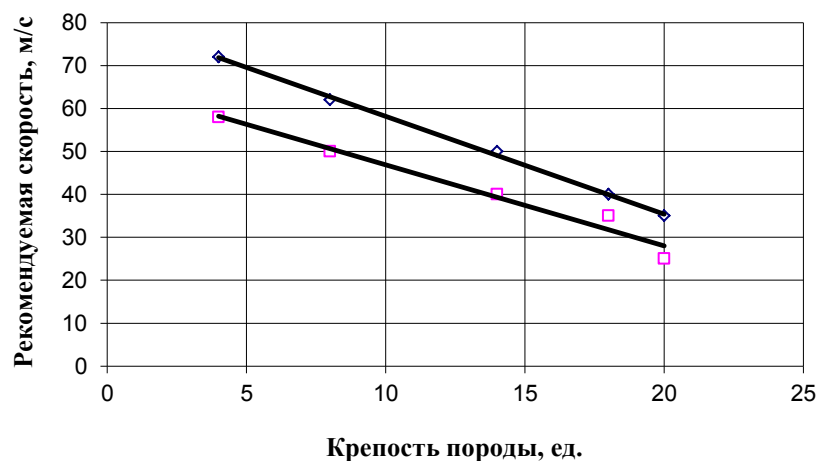


Рис. 1.8. Диаграмма рациональных скоростей резания для различных пород природного камня.

Кыргызская Республика обладает уникальными месторождениями природного камня - гранита, базальта, мрамора, ракушечника и др., которые по своим физико-механическим показателям и декоративным качествам соответствуют мировым стандартам. Изделия из природного камня пользуются большим спросом на мировом рынке благодаря отсутствию в их составе вредных для здоровья человека веществ. Покупательским спросом кроме облицовочной плитки пользуются декоративные изделия из камня выполненные в виде шаров, ваз, чаш, колонн, а также балюстрадные элементы лестниц, люстры, которые нашли применение в архитектурном и индивидуальном строительстве. Детали из природного камня, керамики и стекла широко используются в машиностроении, радиоэлектронной технике и приборостроении [3,4].

На камнеобрабатывающих предприятиях республики в процессе изготовления сложно-профильных деталей из гранита, мрамора, ракушечника из-за их различных физико-механических свойств, а также неравномерности припусков обрабатываемого материала на алмазном инструменте в зоне резания возникают радиальные и осевые нагрузки значительно превышающие допустимые. Это приводит к возникновению вибраций, повышенному износу и поломкам инструмента, ухудшению качества обрабатываемой поверхности деталей и увеличению трудоемкости обработки на станке [1,2].

На камнеобрабатывающих станках процесс настройки, регулирования и контроля процесса обработки деталей осуществляется станочником вручную, что существенно сдерживает рост производительности и повышение качества изделий. В связи с этим актуальной задачей является разработка гидравлических устройств автоматического регулирования режимами обработки изделий из природного камня.

В данной работе предлагается новая оригинальная схема регулирования силовых параметров шпиндельного узла и механизма подачи камнеобрабатывающего станка, который позволяет автоматически снижать или увеличивать величину подачи инструмента в зависимости от нагрузки на шпиндельном узле с учетом особенностей физико-механических свойств природного камня.

При оптимальном автоматическом регулировании процессами обработки изделий из природного камня требуется обеспечить как заданную траекторию относительного движения инструмента и заготовки, так и непрерывное управление параметрами режима обработки для достижения наилучших технико-экономических показателей [5]. Режимы обработки в значительной степени определяют точность размера, формы и взаимного расположения обрабатываемых поверхностей, а также степень их шероховатости, производительность обработки, расход режущего инструмента и, в конечном итоге себестоимость их изготовления.

На рис.1.9 показана принципиальная схема разработанной автоматической системы, предназначенной для регулирования режимами работы камнерезного станка с гидравлической подачей рабочего стола с заготовкой.

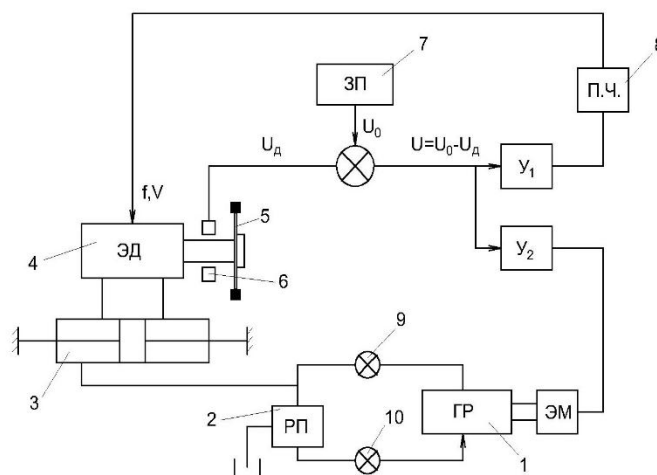


Рис.1.9 Блок схема электрогидравлической системы регулирования экспериментального станка: 1-гидравлический регулятор; 2-редукционный клапан; 3-гидроцилиндр; 4-электродвигатель; 5- дисковый инструмент; 6- индуктивный датчик; 7-задающий прибор; 8- преобразователь частоты; 9,10- дроссели.

Представленная система имеет несложный принцип работы, проста в изготовлении, обладает высокой скоростью срабатывания и не требует значительных затрат на внедрение. САР состоит из следующих элементов автоматики и гидравлических узлов: индукционного датчика крутящего момента 6; усилителя электрических сигналов U ; регулятора расхода жидкости с электромагнитным управлением 1; редукционного клапана 2 и двух дросселей 9, 10. (рис.1.9).

Принцип работы САР заключается в следующем: в ходе технологического процесса, датчик 6, установленный на свободном участке шпиндельного вала, измеряет крутящий момент при колебании силы резания относительно заданной её величины. Величина силы резания является

расчётной и задаётся перед началом работы на самом датчике. При возрастании силы резания электрический сигнал от датчика, пройдя через усилитель U , поступает на блок электромагнитного управления перемещением золотника регулятора расхода рабочей жидкости станка. (рис.1.9). Вследствие этого золотник регулятора начинает перемещаться вправо, уменьшая величину пропускной щели h рабочей жидкости. Уменьшение щели приводит к уменьшению расхода жидкости, поступающей в гидроцилиндр 3 механизма подачи и, следовательно, скорости подачи рабочего стола с заготовкой на вращающийся инструмент, до тех пор, пока величина силы резания не примет заданное значение.

Перемещение золотника влево с целью увеличения щели осуществляется под действием пружины, после уменьшения величины электрического сигнала датчика.

С целью исключения внешних колебаний давления в гидравлической системе САР, а также для обеспечения линейности выходных параметров регулятора, параллельно к последнему подключён редукционный клапан 5 с двумя демпферами 9,10.

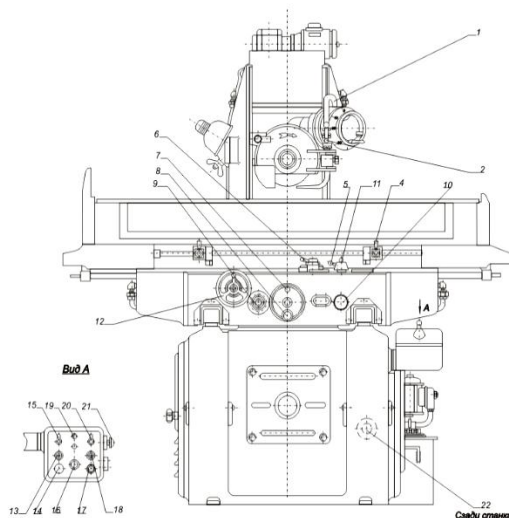


Рис.1.10 Общий вид системы управления экспериментального станда.

За основу экспериментального станда (рис.2) принят универсальный плоскошлифовальный станок высокой точности с горизонтальным

шпинделем и прямоугольным столом модели 3Г71. Гидропривод системы управления станда осуществляет: продольное возвратно-поступательное перемещение стола с регулируемой скоростью; автоматическую прерывистую поперечную подачу на каждый продольный ход стола; реверс поперечной подачи стола; смазку направляющих стола; автоматическое отключение и блокировку механизма ручного перемещения во время работы стола; автоматическую вертикальную подачу на каждый поперечный реверс.

Электродвигатель насоса гидропривода включается нажатием кнопки 18 (рис.1.10). Реверсирование стола происходит по упорам 4, перестановкой которых регулируется длина хода стола. Остановка стола осуществляется поворотом рукоятки крана 11. Скорость стола регулируется поворотом рукоятки дросселя 5. Величина поперечно подачи регулируется поворотом лимба 9. Реверсирование поперечного перемещения стола происходит автоматически по упорам, перестановкой которых регулируется величина поперечного хода стола.

На рис.1.11 приведена гидрокинематическая схема экспериментального станда станка

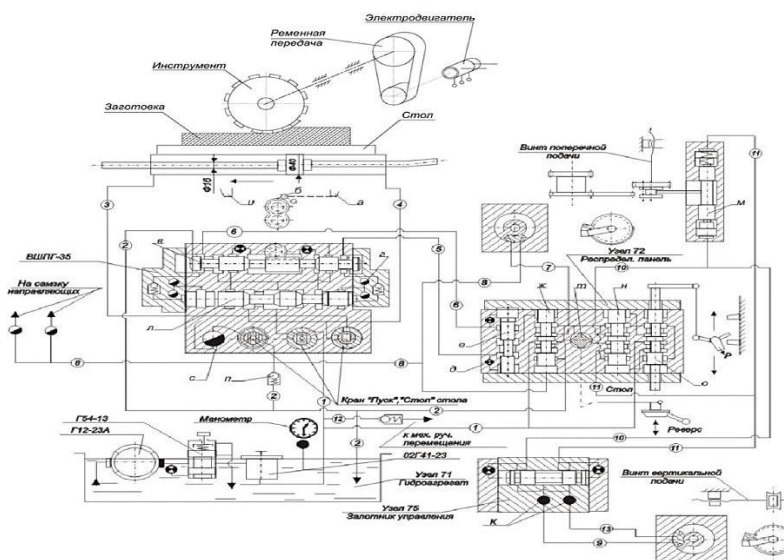


Рис.1.11. Гидрокинематическая схема экспериментального станда.

Гидропривод станка состоит из гидравлических узлов: гидроагрегата;

распределительной панели; гидроцилиндра; золотника управления; панели ВШПГ-35 (рис.1.11), соединенных между собой трубопроводами в единую систему, питаемую насосом Г12-23А. Панель ВШПГ-35, которая осуществляет реверс стола и регулирование скорости последнего. Гидроагрегат гидросистемы представляет собой маслобак сварной конструкции емкостью 45 литров.

На крышке маслобака установлены: электродвигатель АОЛ2-22-66 мощностью 1,1кВт, $n=930$ об/мин, соединенный муфтой с лопастным насосом Г12-23А. Производительность насоса $Q=25$ л/мин, при рабочем давлении 64кгс/см^2 .

1. Напорный золотник Г54-13, настройкой которого устанавливается требуемое давление в гидросистеме. Пропускная способность напорного золотника Г54-13: $Q=35$ л/мин, при $P=20\text{кгс/см}^2$.
2. Фильтр пластинчатый встроенный 0,2Г41-23 при $P=50\text{кгс/см}^2$ пропускной способностью $Q=35$ л/мин. Предназначен для очистки масла, поступающего в гидросистему.
3. Манометр общего назначения Ф60, предназначен для контроля давления в гидросистеме.

Распределительная панель предназначена для управления механизмом поперечной подачи и работает в момент реверса хода стола. Панель снабжена краном для включения и отключения реверса поперечно подачи.

Золотник управления предназначен для управления механизмом вертикальной подачи и работает в момент реверса крестового суппорта. По конструкции золотник управления представляет чугунный корпус с притертым в нем золотником. По торцам корпус закрыт крышками. Золотник управления снабжен краном отключения механизма вертикальной подачи. Крепится золотник управления сверху на крестовом суппорте.

Принцип работы автоматической системы (рис.1.10) заключается в следующем: с трёхфазной сети в 380 В и частотой 50 Гц через

преобразователь частоты тока 8 подаётся питание на исполнительный механизм 4, который преобразует электрический ток в механическую силу для вращения вала шпинделя с определённой угловой скоростью ω , в результате чего происходит вращение дискового инструмента 5. В процессе обработки заготовки (рис.1.10) в обрабатываемой зоне возникает сила резания P_p , которую обычно подразделяют на три её составляющие силы P_z , P_v , P_m , зависящие от ряда факторов:

$$P_p = f(v_p; t; S; HB; C_1; C_2; C_3), \quad (1.3)$$

где: v_p – скорость резания;

t – глубина резания;

S – скорость подачи инструмента;

HB – твёрдость обрабатываемого материала;

C_1 – коэффициент, характеризующий режущий инструмент;

C_2 – поправочный коэффициент, других условий обработки;

C_3 – коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей рабочего органа.

При расчёте режимов резания данные факторы и коэффициенты учитываются как постоянными величинами. Но на практике, как правило, эти факторы, с неоднородностью обрабатываемого материала переменчивы, что напрямую влияет на силу резания, и в конечном итоге приводит к неравномерным и нестабильным нагрузкам на систему СПИД, что может привести к поломке или заклиниванию инструмента, а также неточному изготовлению детали.

Для постоянного контроля за моментом резания на валу шпинделя установлен магнитоупругий датчик момента 6 (разработка проф. Муслимова А.П., к.т.н. Васильева В.Б.), который преобразует крутящий момент на валу в электрический сигнал, который усиливается усилителем и подаётся в преобразователь 8, где в зависимости от момента резания увеличивается или уменьшается частота и напряжение электрического тока, поступающего на

электродвигатель.

Таким образом, разработана система автоматического регулирования режимами работы ортогональных камнерезных станков и токарных камнеобрабатывающих станков с различным приводом исполнительных механизмов, а также экспериментальный электрогидравлический стенд для проведения исследования зависимостей сил резания от режимов резания при обработке природного камня.

На рис 1.12 приведен общий магнитоупругого датчика МД-60.разработанный проф. Муслимовым А.П. и к.т.н. Васильевым В.Б. и успешно прошедший апробацию на кафедре “АиР”. Техническая характеристика магнитоупругого датчика МД-60 приведена в таблице1.



Рис.12. Общий вид магнитоупругого датчика МД-60.

Таблица 1.

Технические характеристики датчика МД – 60

Диаметр измеряемого вала, мм.....	60
Частота вращения вала, об/мин.....	50÷1000
Номинальный крутящий момент, Н·м.....	250
Пределы измерения крутящего момента, Н·м.....	1÷400
Напряжение питания обмотки возбуждения, В.....	12
Частота тока возбуждения, Гц.....	400
Количество полюсов возбуждения, шт.....	6
Количество измерительных полюсов, шт.....	24
Вес, кг.....	2,5

В работе рассмотрен вариант создания экспериментально-лабораторного стенда, позволяющего регистрировать составляющие силы резания, крутящий момент, вибрацию и температуру, на операциях механической обработки природного камня при распиловке, фрезеровании и шлифовании с помощью тензометрического силового динамометра, представленного на рис.1.13.



Рис.1.13 Динамометр для измерения сил резания P_z , P_v , P_m .

Оснащение лабораторного стенда специальным программным обеспечением, дающего возможность отображать изменение составляющих силы резания, момента, температуры, позволит повысить точность обработки, достоверность измерений, сократить время на обработку экспериментальных данных, предоставить возможность проводить необходимые математические и статистические вычисления, создавать массивы экспериментальных данных, графически представлять выходные данные в режиме реального времени (рис.1.14).

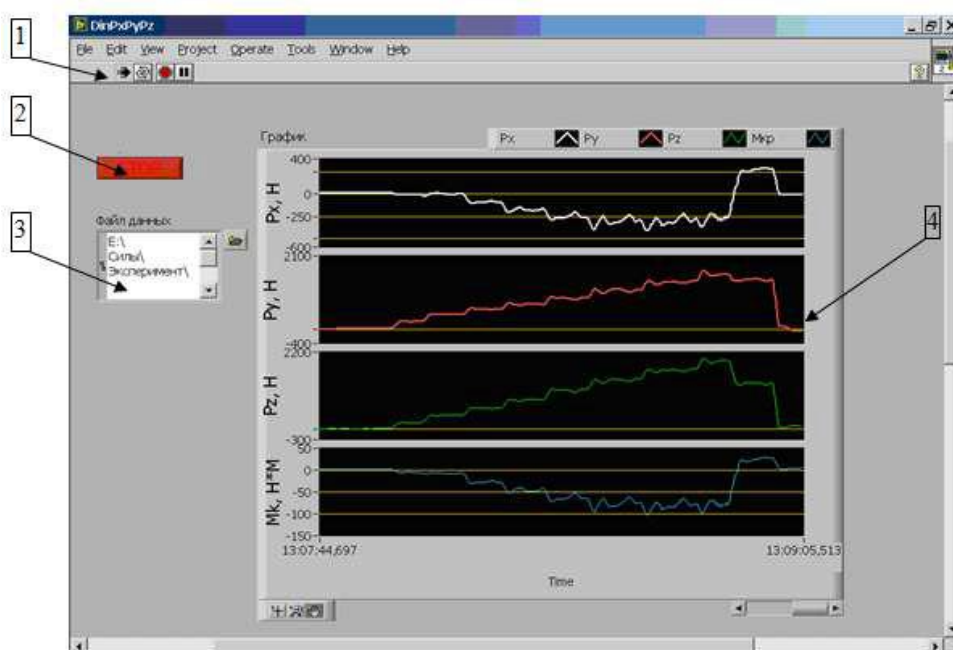


Рис.1.14 Диаграммы измерения составляющих сил резания P_x, P_y, P_z .

При проведении экспериментальных работ, в процессе распиловке природного камня, после преобразования сигналов, поступающих от динамометра через усилитель, преобразователь аналогового сигнала (АЦП Е-502), показания составляющих сил резания выводятся в виде диаграмм на монитор компьютера лабораторного стенда.

2. РАЗРАБОТКА И КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ

Более 60 % деталей машин и механизмов имеют отверстия. Сверление, единственный способ получения отверстий резанием в сплошном материале, поэтому сверла являются одним из наиболее часто применяемых режущих инструментов. На промышленных предприятиях спиральные сверла составляют от 11,3 до 22,8 % от общего количества используемого инструмента. В общем объеме производства режущего инструмента наибольший удельный вес занимают спиральные сверла (около 30%).

Стабильность производства в большой степени зависит от надежности инструментов, преждевременный выход из строя которых ведет к остановке процесса производства, а поломка инструментов может привести к получению бракованных изделий.

На основании изложенного выше проблема разработки способов повышения надежности быстрорежущих спиральных сверл является достаточно актуальной.



Рис. 2.1. Классификация способов повышения надежности спиральных сверл

Основными показателями надежности режущих инструментов являются стойкость и безотказность, поэтому в работе рассмотрены и классифицированы способы повышения стойкости и обеспечения безотказности быстрорежущих спиральных сверл на основании лабораторных исследований и производственных испытаний. Сверлились сквозные отверстия в конструкционных углеродистых сталях сверлами ГОСТ 10903-77 из стали Р6М5 различных диаметров. Сверла эксплуатировались до отказа - полной потери режущих свойств в результате износа. В процессе исследований и испытаний периодически измерялся износ всех конструктивных элементов сверл, участвующих в формировании отверстия.

На рис.2.1 представлена классификация способов повышения надежности быстрорежущих спиральных сверл (БСС), в левом блоке которой представлены способы повышения стойкости БСС, в правом - способы обеспечения их безотказности. Способы повышения стойкости разделены на конструкторские и технологические. Способы обеспечения надежности технологические.

Конструкторскими способами повышения стойкости БСС являются различные виды заточки режущей части сверл: заточка перемычки рис.2.2, двойная заточка лезвий рис.2.3, двухплоскостная заточка лезвий рис.2.4.

Заточка перемычки

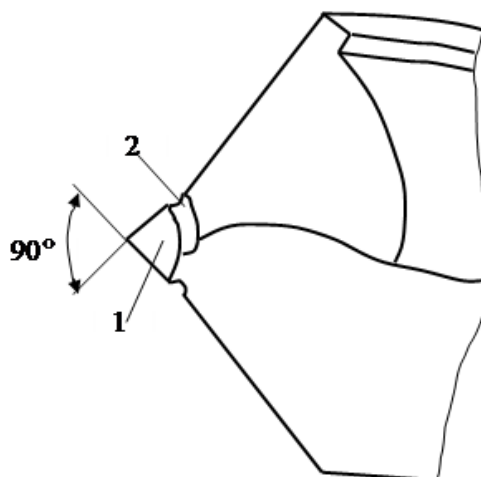


Рис. 2.2. Заточка перемычки

Перемычка не зависимо от режима резания в процессе износа постепенно превращается в конус 1, в основании которого образуется канавка 2. Выдавленный конусом металл размещается в канавке 2, из которой перемещается в стружечные канавки сверла. Конус способствует лучшему внедрению сверла в материал заготовки, что повышает стойкость сверл. Это послужило основанием для авторского свидетельства [12], в котором предложена форма перемычки, повышающая стойкость сверл, показанная на рис.2.2.

Двойная заточка лезвий

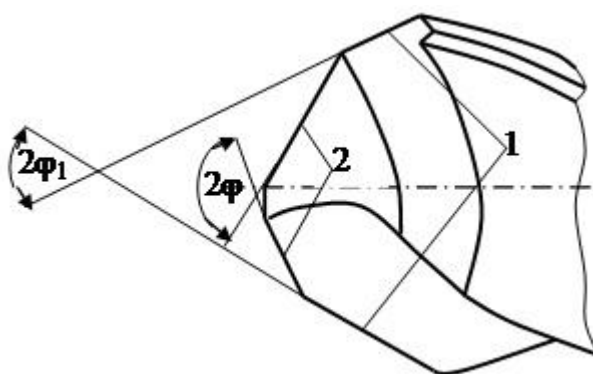


Рис. 2.3. Двойная заточка лезвий

В основе этого способа лежит известное положение, что двойная заточка задних поверхностей повышает стойкость сверл. В авторском свидетельстве [13] предложен способ двойной заточки сверл с углами 2ϕ и $2\phi_1$, позволяющий сместить поперечную кромку с оси сверла (рис.3). Для этого режущую часть сверла затачивают таким образом, что осевое смещение главных режущих кромок 1, заточенных под углом 2ϕ , равно осевому смещению главных режущих кромок 2, заточенных под углом $2\phi_1$.

Известно, что на оси сверла скорость резания равна нулю, резание отсутствует. Это значительно затрудняет работу сверла, около 60% осевой силы приходится на перемычку. При двойной заточке (рис.2.3) перемычка смещена с оси сверла, является режущим лезвием на всей длине, что

повышает стойкость сверл

Двухплоскостная заточка лезвий

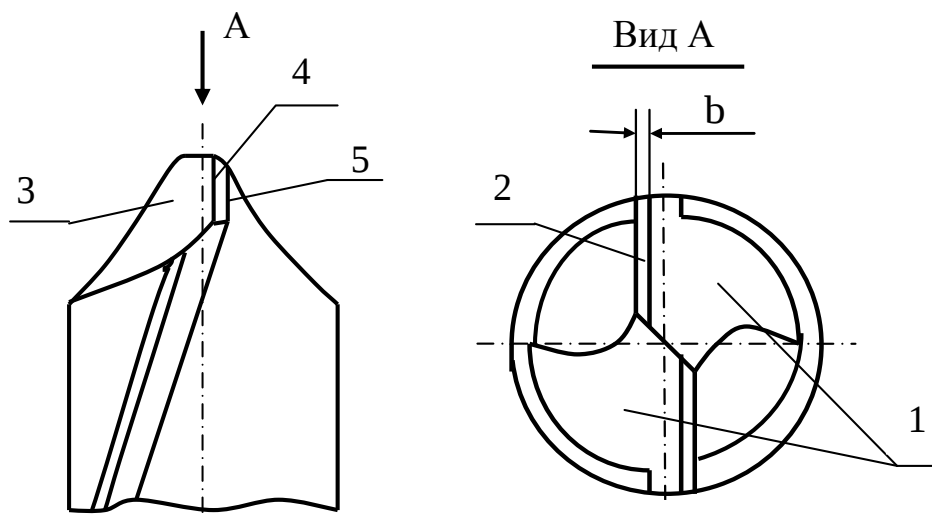


Рис. 2.4. Двухплоскостная заточка лезвий

Задние поверхности лезвий 1 заточены по двум плоскостям 2 и 3 (рис.2.4). При этом ребра пересечения плоскостей 4 параллельны режущим кромкам 5. Плоскости 2 заточены под рабочим углом, плоскости 3 - под большим углом. Ширина b плоскостей 2, заточенных под рабочим углом принимается равной критерию износа сверла конкретного диаметра.

В процессе резания износ распространяется по плоскостям 2 и достигает ребра 4 (рис.4), после чего скорость распространения износа по задним поверхностям замедляется, что повышает стойкость сверл [14]. Это послужило основанием получения свидетельства авторского права [15].

К технологическим методам повышения стойкости БСС относятся параметры режима резания: скорость резания и подача.

Способы определения скоростей резания при максимальной стойкости БСС.

В работах [16, 17] представлены способы определения скоростей

резания при максимальной стойкости сверл и их классификация (рис.2.5)

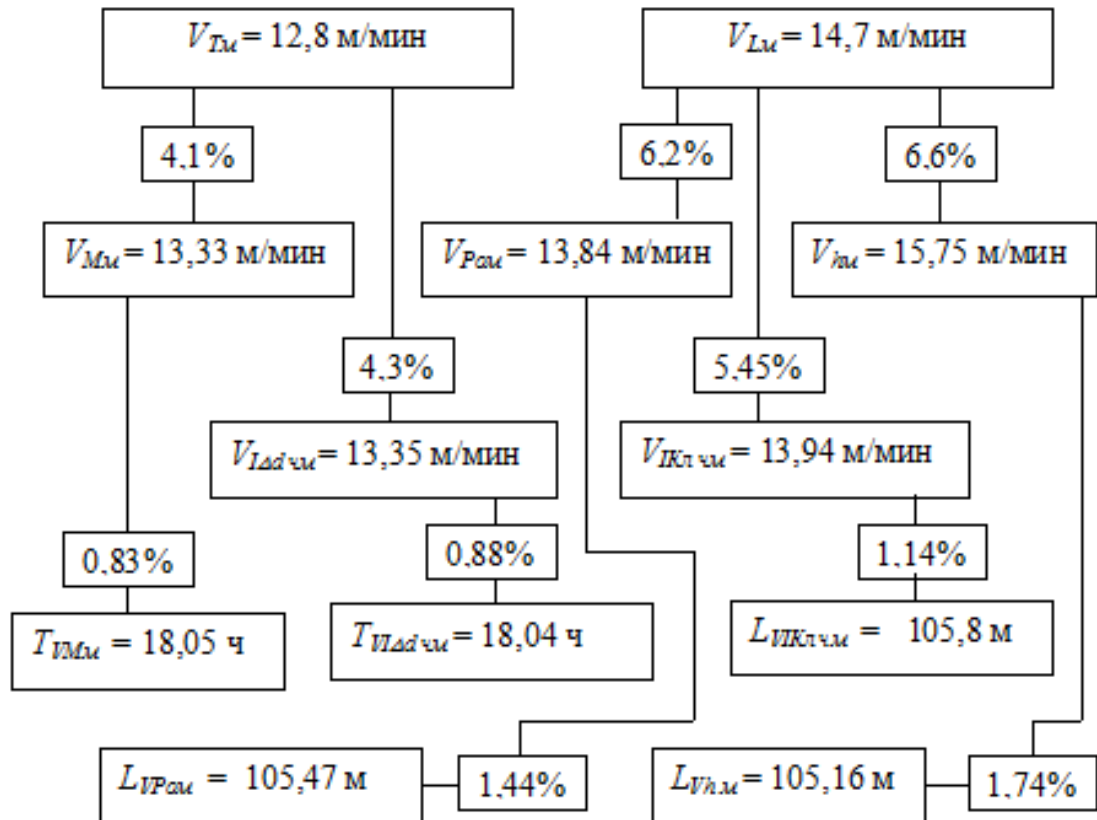


Рис. 2.5. Классификация способов определения скоростей резания при максимумах стойкости и наработки спиральных сверл

В классификации (рис.2.5) V_{Pom} и V_{Mm} – минимумы зависимостей от скорости резания осевой силы и момента резания при работе сверлами с наличием износа, V_{hm} – максимум зависимости от скорости резания высоты нароста на уголках сверл, $V_{IKл'чм}$ и

$V_{IΔd'чм}$ – минимумы зависимостей от скорости резания интенсивностей изнашивания ленточек и уголков, T_{VMm} – стойкость на скорости резания минимума зависимости момента резания от скорости резания, $T_{VIΔd'чм}$ – стойкость на скорости резания минимума зависимости интенсивности износа уголков от скорости резания, $L_{VIΔd'чм}$ – наработка на скорости резания минимума зависимости интенсивности износа ленточек от скорости резания, L_{VPom} – наработка на скорости резания минимума зависимости осевой силы от

скорости резания, $L_{V_{hм}}$ – наработка на скорости резания максимума зависимости высоты нараста от скорости резания, в процентах показана сравнительная с фактическими значениями погрешность расчетов.

Величины скоростей резания классификации рис.2.5 рассчитаны из зависимостей:

$$P_O = 5370V^{1,786}e^{0,129V}; \quad (2.1)$$

$$M = 168V^{1,733}e^{0,13V}; \quad (2.2)$$

$$h = 1,57 \cdot 10^{-7} V^{8,335} e^{-0,529V}; \quad (2.3)$$

$$I_{Kл\ ч} = 5128V^{05,13} e^{0,368V}; \quad (2.4)$$

$$I_{Kл\ м} = 1409209V^{8,96} e^{0,56V}; \quad (2.5)$$

$$I_{\Delta d\ ч} = 52,53V^{5,244} e^{0,393V}; \quad (2.6)$$

$$I_{\Delta d\ м} = 53,8V^{5,668} e^{0,3445V}; \quad (2.7)$$

$$T = 1,42 \cdot 10^{-4} V^{7,6} e^{-0,595V}; \quad (2.8)$$

$$L = 2,556 \cdot 10^{-4} V^{7,66} e^{-0,52V}. \quad (2.9)$$

Зависимости (1) и (2) являются динамометрическим способом, получены аппроксимацией графиков (рис.2.6 и рис.2.7) на которых на которых явно выражены области минимумов скоростей резания, соответствующих областям максимальных стойкости и наработки сверл. Это послужило основанием для получения авторского свидетельства [18].

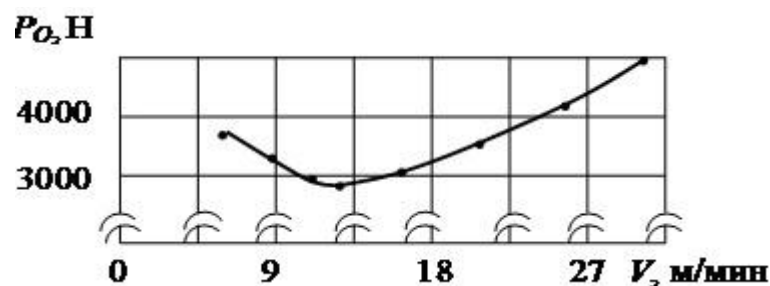


Рис.2.6. Зависимость осевой силы от скорости резания при сверлении

сверлами с наличием износа

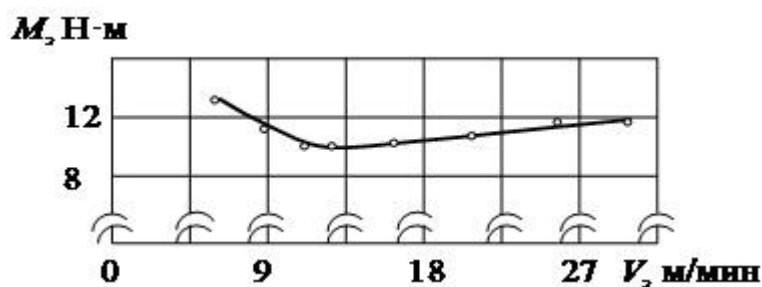


Рис.2.7. Зависимость момента резания от скорости резания при сверлении сверлами с наличием износа

Зависимость (3) - наростометрический способ, (4), (5), (6), (7), - износометрический способ, (8) и (9) - стойкостнометрический способ определения скоростей резания при максимальных стойкости и наработке БСС.

Подача рассчитывается по зависимости (2.10) [8].

$$S_o = Cd^{0,75}, \quad (2.10)$$

где постоянный коэффициент $C = 0,04$ при глубине сверления меньше $3d$, и $C = 0,03$ при глубинах сверления больших $3d$. Для сталей от 240 до 300 НВ рассчитанные по формуле (10) подачи следует умножать на коэффициент 0,8, для сталей более 300 НВ рассчитанные по формуле (10) подачи следует умножать на коэффициент 0,6.

К технологическим способам обеспечения безотказности БСС относятся: критерии износа, критериальная модель для типа производства, способы эксплуатации и восстановления БСС.

Критерии функционального отказа

В работе [20] предложен критерий функционального отказа БСС при обработке деталей из углеродистых конструкционных сталей в условиях автоматизированного производства в виде определенной величины уменьшения рабочего диаметра сверла в результате износа уголков и ленточек БСС и предложена зависимость для его расчета (11)

$$\Delta d_{0,95} = 0,0062d, \quad (2.11)$$

где: $\Delta d_{O,0,95}$ - величина уменьшения рабочего диаметра сверла в мм с 95% вероятностью безотказной работы; d - рабочий диаметр сверла.

Критериальная модель для типа производства

В работе [21] разработана и обоснована критериальная модель для расчета критериев функционального отказа спиральных сверл с необходимой вероятностью безотказной работы для различных типов производства с учетом условий обработки сверлением и полного удаления дефектов износа при заточке имеющая вид:

$$V = \frac{\pi d L_{cm}}{1000 \Sigma T_{св}}, \quad (2.12)$$

$$\Delta d_{O,0,95} = 7,095 \cdot 10^{-5} V^{3,103} e^{-0,2688V} d, \quad (2.13)$$

$$\Delta d_{O,0,95} = 5,217 \cdot 10^{-2} V^{0,815} d, \quad (2.14)$$

$$\Delta d_{O,0,95} = 0,0062d, \quad (2.15)$$

$$K_{Л,0,95} = 7,0dV^1, \quad (2.16)$$

$$K_{Л,0,95} = 0,64de^{-0,029V}. \quad (2.17)$$

По зависимости (12) рассчитывают минимальную скорость резания для объема выпуска изделий, обеспечивающую максимальной стойкости сверл при необходимой производительности оборудования, где L_{cm} суммарная глубина отверстий одного диаметра, просверленных за одну смену, $\Sigma T_{св}$ суммарное время на сверление этих отверстий. Подачу рассчитывают по зависимости (2.10). По зависимостям (2.13 – 2.15) рассчитывается критерий допустимого износа, обеспечивающий безотказную работу сверл, а по зависимостям (2.16, 2.17) - величина износа ленточек, обеспечивающая полное удаление дефектов износа при заточке. Зависимости предназначены: (13, 16) - для автоматизированного массового производства, (2.14, 2.17) - для крупносерийного и серийного и производств, (2.15, 2.17) - для мелкосерийного и единичного производств.

Способы эксплуатации и восстановления

В классификации на рис.2.1 за основу принят период эксплуатации сверл между заточками, что представляется целесообразным т.к. замену инструмента удобно выполнять во время пересмен, для чего необходимо оперировать периодом эксплуатации между заточками - наработкой L в м, фактически отражающей число обработанных заготовок. Период эксплуатации рассмотрен в двух вариантах.

Первый вариант предусматривает эксплуатацию сверл до функционального отказа с вероятностью безотказной работы равной $\gamma = 0,95$, т.е. $L = L_{\gamma 0,95}$, где $L_{\gamma 0,95}$ – наработка с 95% вероятностью безотказной работы. При этом способе эксплуатации износ ленточек значительно превышает нормативную величину стачивания Δl . При каждом восстановлении сверл перед заточкой по задним поверхностям участок рабочей части с изношенными ленточками подлежит отрезке.

Второй вариант предусматривает период эксплуатации между заточками меньший наработки с вероятностью безотказной работы $\gamma = 0,95$, $L < L_{\gamma 0,95}$. В этом случае предусмотрены два варианта износа ленточек: первый – износ ленточек не превышает нормативной величины стачивания $K_L \leq \Delta l$, в этом случае восстановление сверл осуществляется посредством заточки по задним поверхностям на величину Δl ; второй – допускает превышение износа ленточек нормативной величины стачивания $K_L > \Delta l$. Это дает возможность выбирать период стойкости равным или кратным смене, т.е. замену инструмента производить во время пересмен. В этом случае возможны два способа восстановления сверл: первый – перед каждой заточкой надо отрезать участок рабочей части с изношенными ленточками; второй – затачивать по задним поверхностям на величину Δl до достижения остаточного износа ленточек допустимой величины, равной величине износа с вероятностью безотказной работы равной $\gamma=0,95$ ($K_{L\gamma 0,95}$) (табл.2.1), затем отрезать участок рабочей части с изношенными ленточками и повторить цикл заточек.

На рис. 2.8 представлены зависимости среднего износа ленточек сверл диаметром 11,5 мм от наработки (общей глубины просверленных отверстий), при различных способах их эксплуатации. В первом случае сверла эксплуатировались до функционального отказа (рис.2.8, кривая 1), во втором (рис.2.8, кривая 2) - сверла снимались для заточки после каждой смены, то есть осуществлялся второй вариант эксплуатации сверл, а также второй способ восстановления их режущих свойств с заточкой на нормативную величину стачивания, равную $\Delta l = 1,3$ мм [23] для этого диаметра сверл.

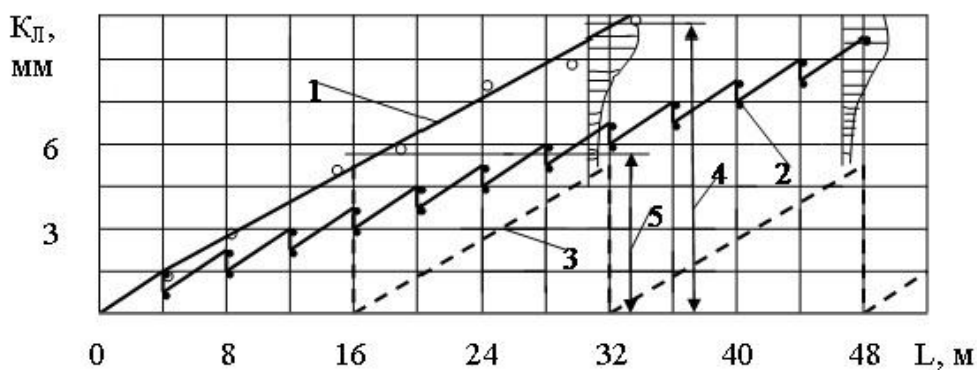


Рис. 2.8. Зависимости среднего износа ленточек сверл диаметром 11,5 мм от наработки: 1 - при эксплуатации сверл до отказа без заточек; 2 - с принудительной заменой и заточкой после каждой смены; 3 - предполагаемые результаты опытов; 4 - $\overline{K_{л}}$; 5 - $K_{л0,95}$.

Как видно на рис.2.8, нормативной величины стачивания Δl недостаточно для полного удаления изношенного участка ленточек за выбранный период стойкости, в результате чего остаточный износ ленточек увеличивался от заточки к заточке и в итоге достиг средней величины износа при отказе сверл $\overline{K_{л}} = 10,1$ мм. При этом средняя наработка до отказа затачиваемых сверл, по сравнению со сверлами, эксплуатируемыми до отказа (кривая 1), возросла почти в 1,5 раза. Пунктирной линией (рис.2.8, кривая 3) показан предполагаемый график зависимости износа ленточек от наработки при втором варианте эксплуатации и первом способе восстановления этих сверл. Очевидно, что при этом варианте эксплуатации и способе восстановления целесообразно выбирать максимальный период стойкости

сверл между заточками, чтобы максимально снизить затраты на восстановление инструмента за счет уменьшения числа заточек. При этом, исходя из требований безотказной работы сверл, период стойкости должен быть такой, чтобы износ ленточек не превысил допустимой величины $K_{\text{ЛО}0,95}$. Как видно на рис.8, при соблюдении этих требований период стойкости между заточками увеличился до четырех смен, что не превышает допустимую стойкость сверл данного диаметра $L_{0,95}$ (табл.2.1).

В табл.2.1 приведены результаты сравнительного экономического анализа способов восстановления работоспособности сверл, при варианте эксплуатации и двух вариантах износа ленточек.

В табл.2.1: L_3 , м - наработка между заточками; Z , шт. – количество заточек; $Z_{\Delta\ell}$ - количество заточек по задним поверхностям на нормативную величину стачивания $\Delta\ell$; $Z_{O\Delta\ell}$ – количество заточек с предварительной отрезкой изношенной части сверла; $t_{\text{ПН}}$ - нормативное время на заточку [24]; P - срок службы - суммарная стойкость сверл, рассчитанный по формуле: $P = Z(L_3 + 1)$. Первый способ восстановления значительно экономичнее второго. Время, затраченное на заточку по сравнению с первым способом эксплуатации в 4,4 раза меньше, а по сравнению со вторым - в 2,3 раза, а срок службы 1,6 раза больше в обоих случаях. Наименее экономичным является первый вариант износа ленточек, при котором помимо возрастания числа заточек нет гарантии выбора периода стойкости между заточками равного или кратного половине смены.

Таблица 2.1 - Экономические показатели способов эксплуатации и восстановления работоспособности сверл, диаметром 11,5 мм

Способ эксплуатации	Способ восстановления	L_3 , м	Z , шт.	$t_{\text{ПН}}$, мин	$\Sigma t_{\text{ПН}}$, мин	P , м
1	Заточка на $\Delta\ell$	2	$Z_{\Delta\ell} = 49$	0,99	48,51	100
2	1	16	$Z_{O\Delta\ell} = 9$	1,22	10,98	160
2	2	4	$Z_{\Delta\ell} = 18$	0,99	25,14	100

			$3_{\text{Oдл}} =$	1,22		
			6			

На рис.9 представлены зависимости суммарной стойкости сверл и стоимости обработки одной детали от наработки между заточками.

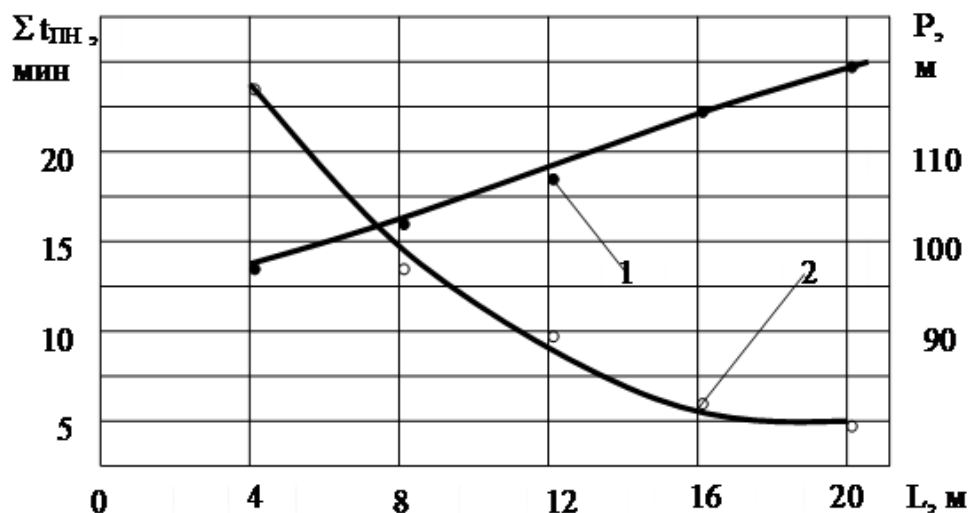


Рис. 2.9. Зависимость срока службы сверл и стоимости обработки одной детали от наработки между заточками: 1 – срок службы; 2 – время, затраченное на заточку сверл

Из рис.2.9 видно, что с увеличением наработки между заточками суммарная стойкость сверл растет, а суммарное время, затраченное на заточку сверл, значительно уменьшается, тем самым уменьшается стоимость обработки деталей.

Определить величину изношенного участка рабочей части сверла, который необходимо удалить при заточке для полного восстановления работоспособности инструмента, можно посредством зависимостей (2.16) и (2.17) представленных выше.

3. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Современные промышленные предприятия имеют сложную организационную структуру, определяемую широким спектром экономической деятельности, территориальной распределенностью производственных мощностей, многообразием деловых контрагентов и поставщиков.

Возрастающая динамика и дифференциация производственных и бизнес-процессов, обусловленная экономической ситуацией, а также новыми условиями взаимодействия «производитель-покупатель», вызванная стремлением обеспечить индивидуальные запросы и потребности заказчиков, все чаще заставляет менеджмент пересматривать прежние подходы к планированию, организации и управлению производством.

Сложившаяся ситуация на глобальном рынке показывает, что тенденция к ориентации производства товаров и услуг на индивидуальные вкусы потребителей требует изменения моделей организации производственных процессов, с учетом перехода от концепции управления отдельными ресурсами и функциональными подразделениями к управлению единой производственной системой, связывающей вместе деятельности всех структур промышленного предприятия.

Использование современных информационно-управляющих систем, основанных на математическом аппарате и методах теории принятия решений и исследования операций, позволяет обеспечить достижение оптимальных параметров производственных процессов на этапе проектирования и эксплуатации.

В этой связи новым вектором развития глобальной и национальной экономики, основанной на цифровых информационных технологиях, выступает развитие и внедрение необходимой для этого инфраструктуры – диджитализация (от англ. Digitalization – оцифровывание) среды.

Повышенный интерес к цифровым технологиям среди предприятий самых разных отраслей экономики обусловлен стремлением производителей укрепить свое положение на рынке, а также получения актуальной информации о последних тенденциях в этой сфере и возможностей их внедрения для достижения максимальной пользы и эффективности.

Актуальность исследования данной тематики обусловлена влиянием изменений, вызванных развитием и внедрением новых информационных технологий, на процессы принятия управленческих решений в экономике, управлении и организации современных высокотехнологичных цифровых производств.

Научная новизна данной работы заключается в определении архитектуры системы и совокупности технологий для принятия управленческих решений на основе данных мониторинга технологического оборудования.

Цель данной работы заключается в исследовании и разработке проекта информационно-управляющей системы поддержки и принятия управленческих решений, как элемента единого информационного пространства цифрового производства.

В рамках достижения поставленной цели был определен следующий **ряд задач:**

- Исследовать современное состояние и проблемы развития предметной области, методы принятия управленческих решений и архитектуру построения систем поддержки и принятия решений;
- Исследовать современные технологии в области передачи данных, мониторинга промышленного оборудования и создания киберфизических производственных систем;
- Определить и спроектировать состав, структуру и модели взаимодействия ИСУ СППР с единой информационной средой производственного предприятия;

- Разработать и предложить единую бизнес-модель, организационную структуру и модели взаимодействия ИСУ СППР, как элемента современного цифрового производства;
- Реализовать предложенную модель взаимодействия ИСУ СППР.

Методы исследования

1. Теоретические методы

1.1. Системный анализ технических решений

Изучение и исследование объекта как системы взаимосвязанных компонентов. Рассмотрение и выявление подсистем и связей между элементами. Оценка взаимосвязанности и согласованности элементов проектируемой системы;

1.2. Литературный обзор источников

Поиск априорной информации в литературных источниках, в том числе отраслевых периодических изданий, научной литературы, трудов и материалов научно-практических конференций и семинаров.

1.3. Моделирование и идеализация

Создание, исследование и анализ моделей объектов исследования. Идеализация моделей для формирования и проверки гипотез.

1.4. Анализ существующих и синтез новых проектных решений

Изучение, анализ и оценка существующих решений в исследуемой области. Выявление недостатков и путей их улучшения. Синтез новых проектных решений на основании проведенного анализа.

2. Эмпирические методы

2.1. Анализ рыночной среды и экспертных мнений

Наблюдение за внешней средой – рынком информационных технологий, специального и общего машиностроения. Поиск лучших практик. Интервью с владельцами бизнеса, специалистами и заинтересованными лицами.

2.2. Тестовые испытания системы / Экспериментальный метод

Оценка эффективности и рациональности предлагаемых моделей архитектуры разрабатываемой системы. Исследование режимов работы, стабильности входных и выходных данных. Выявление и устранение несоответствий

Промышленность как основа экономического роста

Многие экономисты, политологи и государственные деятели большинства экономически развитых стран обращаются к теме развития собственного сектора обрабатывающей промышленности, машиностроения и станкостроения, привлекая внимание к тому факту, что богатство общества в целом и успех сервисной (цифровой) экономики в частности, зависят от технических и технологических возможностей промышленности. Ведущие мировые страны проводят целенаправленную инвестиционную политику, для достижения превосходства в производственной сфере и технологиях, наукоемких отраслях, инновациях и научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках.

Тенденции в области мирового потребительского рынка, являющегося основным фактором экономического развития, обозначили новые векторы и сферы потенциального роста производительности промышленных производств: сервис-ориентированное взаимодействие с потребителями и заказчиками в виртуальной среде, облачные распределенные вычисления, хранение и защита информации, коллективное потребление и использование товаров и услуг, децентрализация управления и др.

В этой связи для отечественной промышленности открываются как новые возможности, так и угрозы: к кратному отставанию по производительности труда, культуры производства и качеству производимой продукции и сервиса может добавиться отставание в переходе на новые принципы взаимодействия в цепочке «поставщик-потребитель». Это может привести к принципиальной невозможности конкурировать с ведущими международными промышленными концернами, как по себестоимости

продукции, так и скорости исполнения заказов. Ключевыми факторами активизации всеобщей информатизации общества становятся доступность программного обеспечения, обновление аппаратного оборудования, развитие сетевых технологий, рост виртуальных предприятий. [25-27, 29]

Параллельно с распространением идей цифровой экономики осуществляется процесс формирования цифрового рынка, который характеризуется как пул социальных, правовых и экономических отношений, складывающихся в сфере купли-продажи и обмена информационными продуктами между потребителями, производителями, посредниками.

Правительством Кыргызской Республики разрабатывается проект общенациональной программы цифровой трансформации «Таза Коом» в рамках «Стратегии устойчивого развития страны – 2040». Программой определены цели, задачи, принципы и ожидаемые результаты внедрения. [28]

Так, в рамках проведения заседания Высшего Евразийского экономического совета, было обсуждено в порядке двадцати вопросов дальнейшего сотрудничества в рамках ЕАЭС. В настоящее время реализуются проекты по вопросам интеграции различных информационных систем государств – членов Евразийского экономического союза.

Под **цифровым производством** (*Digital manufacturing*) понимается концепция и организационные модели и методы управления производственной системой, в основе которой лежит использование технологий цифрового моделирования и проектирования как самих продуктов и изделий, так и производственных процессов на всем протяжении жизненного цикла – создании цифровых двойников продукта и управление процессами его производства и эксплуатации.

Внедрение концепции, принципов и технологий цифрового производства в рамках долгосрочной стратегии развития всех отраслей промышленности представляет собой одну из актуальных проблем, стоящих перед исследователями, инженерами и правительствами стран государств-членов ЕАЭС. Для достижения этих целей правительствами стран

разрабатываются и утверждаются федеральные и национальные программы развития цифровой экономики и производства.

Четвертая индустриальная революция (Industry 4.0) – это комплекс новых технологий, базирующихся на глубокой интеграции информационных технологий и производственных процессов и направленных на трансформацию промышленного производства в условиях нового технологического уклада, включающих в себя использование новых систем организации, планирования и управления предприятием.

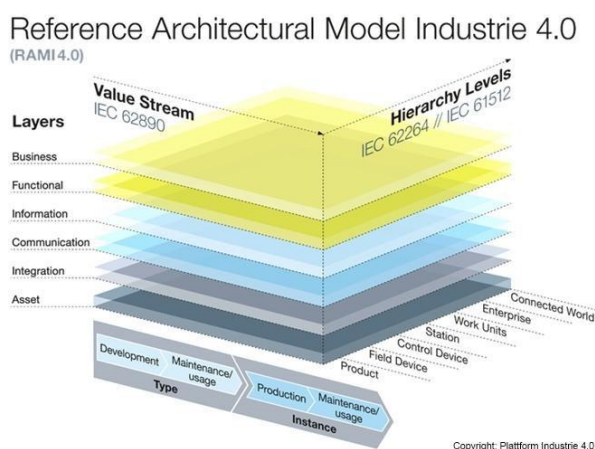


Рисунок 3.1 – Архитектура RAMI, предложенная немецкой ассоциацией German Electrical and Electronic Manufacturers' Association (ZVEI)

Комплекс технологий четвертой индустриальной революции основывается на рассмотрении производственной системы как **кибер-физической системы** (*cyber-physical system, CPS*) – полностью автоматизированном цифровом производстве, управляемым интеллектуальными системами в режиме реального времени, обеспечивающих появление более гибких моделей организации труда, а также взаимодействии с внешней средой и перспективой объединения в глобальную промышленную сеть. [25-27, 29]

Создается облачная модель завода, где в виртуальном пространстве воссоздается весь производственный процесс и жизненный цикл продукта –

от разработки идеи, проектирования, дизайна до производства, поставки конечному заказчику, эксплуатации, обслуживания и утилизации.

Цифровая копия завода позволяет еще до начала производства выстроить оптимальную производственную, логистическую, ресурсную цепочку, рассчитать ее стоимостные показатели.

Появление дополнительных методов и механизмов управления на этапах жизненного цикла изделия позволяет использовать системный анализ и планирование для обеспечения максимальной эффективности и оптимального качества.

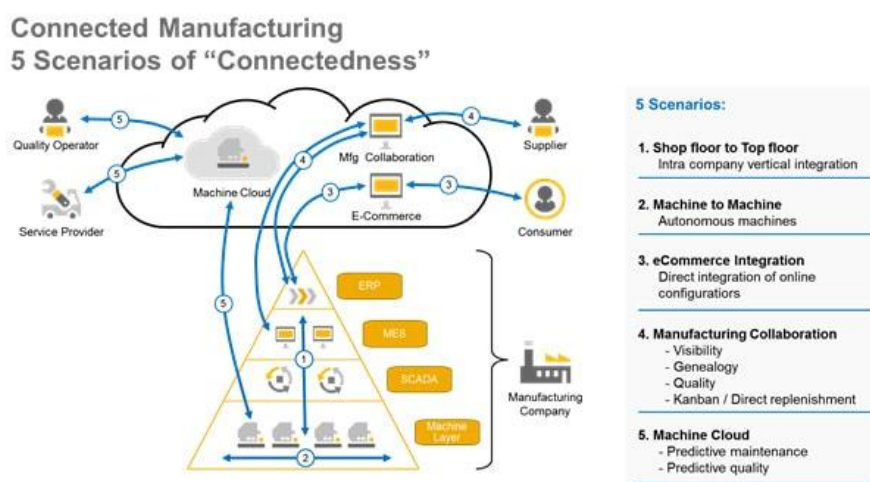


Рисунок 3.2 – Облачная модель взаимодействия ICPS (Industry cyber-physical system) с участниками среды. Источник: ICCPS, Lisbon, 2017

Стремясь усилить мощь и позиции организации, менеджеры и руководители ежедневно сталкиваются с препятствиями, проблемами и вопросами, ответы на которые они не могут получить при помощи операционных систем. Существующие системы управления планирования ресурсов и управления предприятием обеспечивают некоторую прозрачность операций, однако они не предоставляют аналитическую информацию и интеллектуальные ресурсы, необходимые для управления результативностью и принятия управленческих решений.

В тоже время, развитие информационных технологий и прогресс в области управления данными, количественного анализа и аналитической

обработки данных значительно облегчает управление результативностью, позволяющее руководителям и рядовым сотрудникам предприятий принимать всесторонне взвешенные решения.

Выбранный курс на цифровую трансформацию объектов и процессов и их интеграцию в рамках единого информационного пространства позволит производителям обеспечить рост в условиях производства персонализированной продукции и удовлетворения индивидуальных предпочтений заказчиков, благодаря повышению гибкости, снижению затрат и барьеров для выхода на рынок, предоставляя дополнительные возможности для инноваций и инвестиций.

Системы принятия решений или поддержки и принятия решений, (СПР / СППР) – это класс информационно-управляющих человеко-машинных систем, позволяющие решать задачи информационной поддержки процессов принятия управленческих решений руководством организации на основе математических, статистических, эмпирических и эвристических методов.

Современная тенденция в развитии искусственного интеллекта позволяю использовать данные технологии и в области теории принятия решений. В этой связи является достаточно интересным и актуальным создание и внедрение интеллектуальных самообучающихся систем поддержки и принятия решений.

Назначение систем поддержки и принятия решений (СППР) – упростить процесс принятия пользователями наиболее эффективных и оптимальных решений на основе информации, получаемой от объектов и накапливаемой системой, а также тех методов ее обработки и представления, которые были заложены в основу ее работы. Это является первичной и определяющей функцией систем данного класса.

Системы SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – системы удаленного контроля и диспетчеризации получили широкое распространение и успешно используются в самых разных отраслях промышленности и

экономики, где требуется обеспечивать операторский контроль и управление технологическими процессами в режиме реального времени.

Генерируемые данные и структурированная информация используется для оценки эффективности работы как единицы оборудования, так и всего производственного подразделения, принятия управленческих решений по внесению изменений в производственный процесс, а также может быть передана в более высокие системы управления производством для решения задач синхронизации, координации, анализа и оптимизации выпуска продукции. В рамках теоретического исследования предложена классификация систем мониторинга технологического оборудования по способу мониторинга, коммуникации и уровню функциональности. [25-27, 29]



Рисунок 3.3 – Функциональная схема самообучающейся СППР

Проект «Интегрированный инструмент управления результативностью. СППР Business Intelligence»

Проект системы на базе подсистемы удаленного мониторинга и диспетчеризации технологического оборудования и модуля управленческого учета экономических параметров производства. Система будет включать в

себя несколько модулей, направленных на достижение комплексного сопровождения в процессе принятия управленческих решений для руководителей среднего и верхнего уровня.

Основным объектом данной системы будет являться бизнес-процесс и его критерии его результативности. Рассмотрение процесса как объекта позволит использовать систему управления бизнес-процессами как основу внедрения СППР.

Предоставления информации предполагается на витринах данных, формирующимся автоматически на базе генерируемой информации с полевого оборудования. На основании бизнес-анализа требований заказчика и существующей организационной и производственной архитектуры предлагается определить базовый набор основных метрик и зависимостей с последующим составлением технической спецификации.

Основные преимущества:

- Простота интеграции разрабатываемого решения с полевым уровнем автоматизации и системой управления бизнес-процессами;
- Гибкость настройки и конфигурирования;
- Многоцелевое использование СППР;
- Экспертная система: позволяет использование опыта специалистов в решении возникающих задач с возможностью дальнейшего обучения;
- Облачное хранение данных и инновационная структура управления базами данных позволяет обеспечить высокую скорость обработки запросов и обращений

Апробация результатов исследования. Тестовые испытания системы

Цель испытаний: реализовать устойчивую передачу данных, поступающих от технологического оборудования в систему удаленного мониторинга в режиме реального времени.

Этап 1. В рамках достигнутой договоренности для КГТУ им. И. Раззакова была предоставлена образовательная лицензия системы удаленного мониторинга Winnum. Данная лицензия была предоставлена для выполнения исследований в области построения умных производственных систем на базе имеющегося оборудования

Этап 2. Был проведен анализ оборудования кафедр на предмет возможности подключения к системе удаленного мониторинга. На данном этапе было решено в дальнейшем проводить лабораторные испытания на базе лабораторного стенда ОВЕН ПЛК.

Этап 3. На основе выбранного оборудования был сформирован перечень базовых контролируемых параметров его работы. Благодаря наличию программно-логического контроллера ОВЕН ПЛК 110-30 и предустановленных датчиков температуры и влажности, основными параметрами были соответственно выбраны «Текущая температура» и «Текущая влажность воздуха».

Этап 4. В связи с наличием готового лабораторного стенда с предустановленными датчиками температуры и влажности было решено организовать схему мониторинга на базе реальной и моделируемой системы:

- Мониторинг температуры и влажности в помещении лаборатории
- Мониторинг работы модели «биохимического реактора винного брожения»
- Мониторинг работы модели «термической муфельной печи закалки и отпуска»

Данный стенд имеет достаточное количество сетевых интерфейсов на базе ПЛК ОВЕН для работы с сетью Интернет и передачи данных по стеку протоколов TCP/IP. В этой связи было решено использовать соединение через физический интерфейс Ethernet по Modbus TCP/IP.

Этап 5. Были проведены серии тестовых испытаний.

Этап 6. На основании полученных результатов и выявленных технических ограничений были сформированы выводы и определены

направления дальнейшей работы.

В рамках проведенного анализа технологического парка кафедр был сформирован перечень потенциальных параметров мониторинга для дальнейшего использования в СППР.

Одним из путей дальнейшей работы является дальнейшая разработка и оптимизация модели стенда для устойчивой передачи данных, поступающих от технологического оборудования в систему удаленного мониторинга в режиме реального времени на базе стека протоколов Ethernet - TCP/IP, а также интеграция стенда с СППР.

Разработанный стенд может быть основой для дальнейших исследований в области создания цифровых производственных систем, а также служить объектом для материально-технического оснащения образовательных курсов в рамках программ бакалавриата и магистратуры КГТУ им. И.Раззакова.

Описание достигнутых результатов

В настоящей работе был исследован процесс разработки системы принятия решений на основе данных мониторинга технологического оборудования.

Разработка, внедрение и применение новых моделей и систем поддержки принятия решений является первым шагом к переходу к новой концепции организации производственных систем, что в свою очередь позволит повысить качество принимаемых решений, управляемость и результативность производственных процессов, обеспечить информационный обмен и координацию между промышленным оборудованием в режиме реального времени, цепочкой промышленных поставок, поставщиками, системами управления бизнесом и потребителями.

В рамках достижения цели данной работы были проведены исследования, а также разработан проект информационно-управляющей системы поддержки и принятия управленческих решений, как элемента

единого информационного пространства цифрового производства. В процессе работы над проектом были расширены, углублены и систематизированы теоретические и практические знания, полученные в течение периода обучения по специальности.

Исследованы современное состояние и проблемы развития цифровых производств, недостатков современных моделей организационного управления предприятием, а также эволюция данных моделей. Выполнен анализ влияния организационного дизайна на процессы управления результативностью.

Рассмотрены методы и модели теории принятия решений, технологий разработки и архитектур систем принятия решений. Рассмотрены модели подключения технологического оборудования к цифровой производственной системе предприятия, способы передачи, хранения и обработки информации. Определено место систем принятия решений в процессе управления результативностью бизнес-процессов организации.

В рамках проектной части были разработаны и спроектированы структурные и организационные модели предлагаемой системы, сформированы диаграммы взаимодействия и алгоритмов работы. Выполнены и приведены результаты исследований и лабораторных испытаний системы. Предложена модель использования системы в рамках проекта комплексной автоматизации производственного предприятия «The Tien-Shan Shelly Rock».

Использование результатов данной работы позволит стать основой как для разработки программного продукта на базе предложенного проекта, так и дальнейших научных исследований в области бизнес-аналитики, а также управления и организации процессов цифровой трансформации отечественных производств. Использование предлагаемого проекта СППР позволит обеспечить рост показателей качества и эффективности результатов принимаемых решений, а также достижения высокой результативности в рамках поставленных задач.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Моделирование процесса уплотнения формовочных смесей при импульсных нагрузках проведено с применением методов прикладной механики сплошных сред [30, 31]. Идея данного моделирования – это расчетно-теоретические исследования поведения формовочной смеси в процессе импульсного нагружения различных существующих и вновь проектируемых систем уплотнения. При этом ставится цель поиска не только адекватных результатам эксперимента моделей уплотнения формовочных смесей, но и постановка и решение задач, существенно расширяющих знания о процессе уплотнения смесей при различных режимах и нагрузках, и повышении эффективности процесса.

Постановка задач. Математическое описание

Первым этапом формализации процесса уплотнения является формулировка физико-математической модели. Рассматривается одномерная модель процесса уплотнения, схема которой представлена на рис. 4.1.

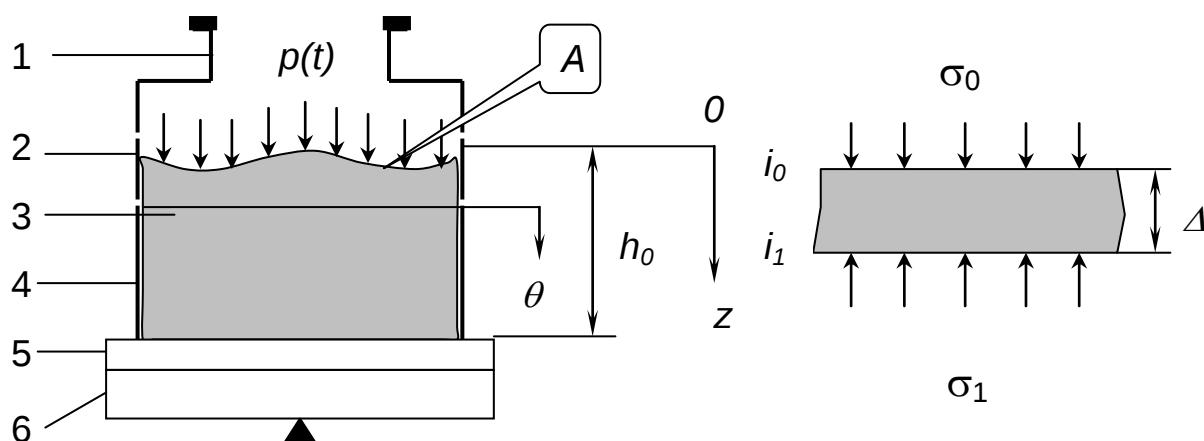


Рис. 4.1 Схема моделирования: 1 – камера сгорания; 2 – наполнительная рамка; 3 – формовочная смесь; 4 – опока; 5 – модельная плита (без модели); 6 – стол (основание машины); $p(t)$ – внешнее давление, $i = 0 \dots n$ – слои смеси; θ – скорость распространения волны сжатия, h_0 – начальная высота засыпки формовочной смеси. A – площадь сжатия.

свободной поверхности формовочной смеси, определяемой высотой засыпки h_0 . Согласно принятому по результатам экспериментальных исследований механизму уплотнения формовочной смеси для рассматриваемого процесса принято, что распространение нагрузок в волне сжатия в формовочной смеси осуществляется посредством передачи сил через контакты между частицами и конгломератами частиц песка. Из практики уплотнения формовочных смесей GAS-IMPACT методом известно, что зона распространения фильтрационных процессов незначительна, и они в модели не рассматриваются. Исключается также рассмотрение влияния температуры на физико-механическое поведение формовочной смеси. Связано это с тем, что изменение температуры при GAS-IMPACT процессе составляет по данным работы [31] $\sim 3^\circ \text{C}$.

Течение формовочной смеси за фронтом волны сжатия описывается уравнениями сохранения импульса, и неразрывности для слоя формовочной смеси (рис. 4.1) как сплошной среды в виде:

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial \sigma}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial v}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

где, ρ_0 – начальная плотность слоя формовочной смеси, v – скорость частиц слоя формовочной смеси, σ – нормальные осредненные напряжения, являющиеся суммой нормальных средних напряжений, действующих на верхних и нижних границах слоя формовочной смеси, ε – деформация слоя формовочной смеси, t – время.

Уравнения 4.1 замыкаются уравнением деформирования среды согласно модели уплотняемой формовочной смеси. Применен итерационный подход, когда предполагается последовательное использование все более сложных моделей до получения результата, соответствующего экспериментальным данным. Так при предварительных исследованиях [3] была принята модель линейной вязкоупругой среды, описываемая уравнением:

$$\sigma = E^* \varepsilon + N^* \partial \varepsilon / \partial t, \quad (4.2)$$

Где, E и N – динамический модуль упругости и параметр вязкости

рассматриваемого слоя формовочной смеси, значения которых изменяются в процессе уплотнения формовочной смеси, как с увеличением плотности формовочной смеси, так и с чередованием периодов нагрузки и разгрузки.

При этом рассмотрено «плавное» нагружение, при котором давление газа на свободной поверхности формовочной смеси и неподвижность модельной плиты с основанием принимаются в качестве граничных условий, т.е.:

$$\sigma(z=0) = p(t), \quad s(z=h_0) = 0, \quad v(z=h_0) = 0, \quad (4.3)$$

где s, v – перемещения и скорости границ слоя смеси, $p(t)$ – давление газозвушной смеси на свободной поверхности формы.

Начальные условия:

$$\sigma(t=0) = 0, \quad s(t=0) = 0, \quad v(t=0) = 0 \quad (4.4)$$

Модель процесса уплотнения формовочной смеси при GAS-ИМПАСТ методе на базе уравнений 4.1 – 4.4 представлена в приложении 1. Ее исследования для условий уплотнения на промышленной формовочной машине позволило определить диапазоны удовлетворительного отражения реальных свойств формовочной смеси для первого периода (процесса переукладки частиц смеси), т.е. учета необратимых деформаций принять модель линейной вязкопластической среды, в которой в модель линейной вязкоупругой среды добавлен элемент, учитывающий необратимые деформации. Механическая модель деформирования слоя формовочной смеси как линейной вязкопластической среды, принятая для дальнейших исследований, представлена на рис. 2.

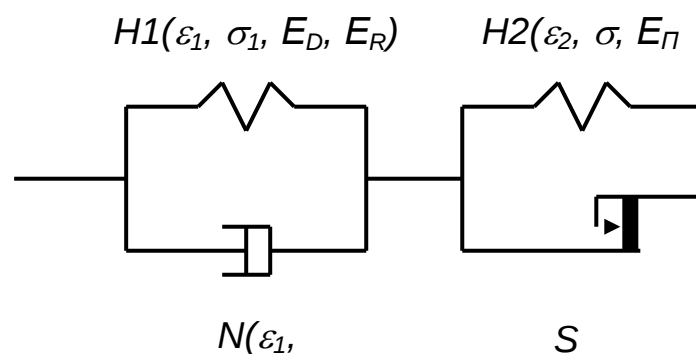


Рис. 4.2. Реологическая модель формовочной смеси: $H1, H2$, - тела Гука; N - вязкое тело Ньютона; S - стопор.

При этом приняты, что диаграммы динамического и статического

сжатия и разгрузки слоя формовочной смеси линейны. Тогда поведение слоя смеси определяется комбинацией нижеследующих зависимостей между напряжениями и деформациями:

Напряжения упругости

$$\sigma_1 = E_D * \varepsilon_1, \text{ при нагрузке} \quad \text{и} \quad \sigma_2 = E_R * \varepsilon_1 \quad \text{при разгрузке,} \quad (4.5)$$

где E_D , E_R - динамические модули упругости при нагрузке и разгрузке, ε_1 - упругая (вязкая) деформация.

Напряжение вязкого сопротивления

$$\sigma_2 = \mu^{**} \partial \varepsilon / \partial t, \quad (4.6)$$

где μ - параметр вязкости.

Полное напряжение в рассматриваемом слое смеси

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (4.7)$$

$$\text{равно также } \sigma = \varepsilon_2 * E_{II}, \quad (4.8)$$

где E_{II} - параметр переукладки.

Полная деформация рассматриваемого слоя смеси

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (4.9)$$

Таким образом, математическое описание процесса уплотнения формовочной смеси, которое было принято базовым для дальнейших исследований, представляет собой систему исходных уравнений 4.1, 4.5- 4.9.

Начальными условиями этой системы являются

$$\sigma(t=0) = 0, \quad s(t=0) = 0, \quad v(t=0) = 0, \quad (4.10)$$

где s , v – перемещения и скорости границ слоя смеси,

Граничными условиями приняты:

На свободной поверхности уплотняемой формы

$$\sigma(z=0) = p(t), \quad (4.11)$$

где $p(t)$ - давление газо-воздушной смеси на свободной поверхности формы.
На модельной плите

$$s(z=h_0) = s_M(t), \quad v(z=h_0) = v_M(t), \quad (4.12)$$

где $v_M(t)$, $s_M(t)$ - скорости и перемещения модельной плиты со столом.

В качестве основных выходных параметров математической модели, характеризующих процесс уплотнения, являются изменения перемещений $s(t)$ и скоростей $v(t)$ границ слоев смеси в уплотняемой форме. По значениям $s(t)$ в рассматриваемых точках формах предполагается определять значения плотности уплотненной формы $\rho(t)$, являющейся важнейшей характеристикой качества литейных форм.

Система разрешающих уравнений математической модели в конечно-разностной форме

В соответствии с принятым механизмом уплотнения и требованиями исследований модели система исходных уравнений, рассмотренная выше приведена в систему разрешающих уравнений. Последние дополнены характерными параметрами промышленной формовочной машины, а также зависимостями, полученными в результате экспериментальных исследований. Таким образом, математическая модель процесса уплотнения при GAS-IMPACT методе описывается следующими разрешающими уравнениями:

1. Уравнения сохранения импульса

$$((\sigma_{i,j-1} + \sigma_{i,j})/2 - (\sigma_{i-1,j-1} + \sigma_{i-1,j})/2)\Delta z = \rho_0 * ((v_{i,j} + v_{i-1,j})/2 - (v_{i,j-1} + v_{i-1,j-1})/2) \Delta t, \quad (4.13)$$

где индексы i, j характеризуют пространственно-временную сетку в следующем порядке:

$i-1$ - верхняя граница i -го слоя;

i - нижняя граница i -го слоя;

$j-1$ - начальный момент j -го интервала времени;
 j - конечный момент j -го интервала времени;
 Δz - толщина рассматриваемого слоя;
 Δt - временной интервал.

2. Уравнения неразрывности

$$\begin{aligned} & ((\varepsilon_{1i,j} + \varepsilon_{1i-1,j})/2 - (\varepsilon_{1i,j-1} + \varepsilon_{1i-1,j-1})/2)/\Delta t + ((\varepsilon_{2i,j} + \varepsilon_{2i-1,j})/2 - (\varepsilon_{2i,j-1} + \varepsilon_{2i-1,j-1})/2)/ \\ & \Delta t = ((v_{i,j-1} + v_{i,j})/2 - (v_{i-1,j-1} + v_{i-1,j})/2)/\Delta z \end{aligned} \quad (4.14)$$

3. Уравнения состояний границ слоев формовочной смеси

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1i,j} &= \varepsilon_{1i,k} + (\sigma_{1i,j} - \sigma_{1i,k}) * 1/E_{Di,k} \\ \sigma_{2i,j} &= \sigma_{2i,k} + ((\varepsilon_{1i,j} - \varepsilon_{1i,k})/\Delta t - (\varepsilon_{1i,k} - \varepsilon_{1i,k-1})/\Delta t) * 1/\mu_{j,k} \\ (\varepsilon_{2i,j} - \varepsilon_{2i,k})/\Delta t &= (\varepsilon_{2i,k} - \varepsilon_{2i,k-1})/\Delta t + (\sigma_{i,j} - \sigma_{i,k}) * 1/E_{Pi,k}, \end{aligned} \quad (4.15)$$

где индекс k – характеризует пласты между слоями.

4. Кинематические и геометрические соотношения

$$\begin{aligned} \varepsilon_{i,j} &= (s_{i-1,j} - s_{i,j})/\Delta z \\ v_{i,j} &= ((s_{i,j} + s_{i-1,j})/2 - (s_{i,j-1} + s_{i-1,j-1})/2)/\Delta t \\ a_{i,j} &= ((v_{i,j} + v_{i-1,j})/2 - (v_{i,j-1} + v_{i-1,j-1})/2)/\Delta t, \end{aligned}$$

где $a_{i,j}$ – средние значения ускорений i -го слоя смеси в j -ом интервале времени.

$$\rho_{i,j} = \rho_0 * 1/(1 - \varepsilon_{i,j}), \quad (4.16)$$

где $\rho_{i,j}$ – текущая плотность i -го слоя смеси в j -ом интервале времени.

Начальные условия:

$$\sigma(t=0) = 0, \quad s(t=0) = 0, \quad v(t=0) = 0 \quad (4.17)$$

В дальнейшем конечные значения переменных для $j-1$ интервала времени становятся начальными для j – го интервала.

Граничные условия:

На свободной поверхности уплотняемой формы

$$\sigma(z=0) = p(t), \quad (4.18)$$

где $p(t)$ – Изменение давления газовой смеси.

На модельной плите

$$M * dv/dt = C_0 * z_M, \quad (4.19)$$

где M – приведенная масса всех подвижных частей машины до основания;
 C_0 – приведенная жесткость всех подвижных частей машины;
 z_M – перемещения стола с модельной плитой, которые условно принимаются как перемещения нижней границы самого нижнего рассматриваемого слоя формовочной смеси.

Приведенные масса M и жесткость C_0 принимаются в расчетах и исследованиях как отношения к значениям массы уплотняемой формовочной смеси $k_M = M/m$ и жесткости формы $k_C = C_0 / c$.

В основные уравнения вводятся также сила F_T , которая характеризует трение частиц формовочной смеси о стенки опоки и Кулоново трение частиц смеси. Характер ее изменения в зависимости от расстояния до стенки опоки принят по данным экспериментальных исследований.

Компьютерная модель процесса уплотнения формовочных смесей при GAS-IMPACT методе

Для решения системы уравнений 4.13 – 4.19 и проведения расчетно-теоретических исследований процесса уплотнения формовочных смесей при GAS-IMPACT методе разработана программа моделирования в среде DELPHI 5. Структурная схема такого моделирования представлена на рис. 3.

Подробное описание программ SANDCOM 1 и SANDCOM 2 представлено в предыдущем отчете за 2017 год. Ниже рассмотрена программа SANDCOM 3, в которой рассматривается также второй этап

процесса уплотнения формовочной смеси после прохождения волн сжатия. Главная форма исследуемой программы SANDCOM 3 представлена в предыдущем отчете. Программа реализует режимы «Исследование», «Практические расчеты» и «Оптимизация» для широкого диапазона параметров системы. Число рассматриваемых слоев уплотняемой формы для расчета, которое может быть любым, принято 35. В состав главной формы входят рабочее меню, а также панели просмотра результатов расчета и настройки регулируемых параметров.

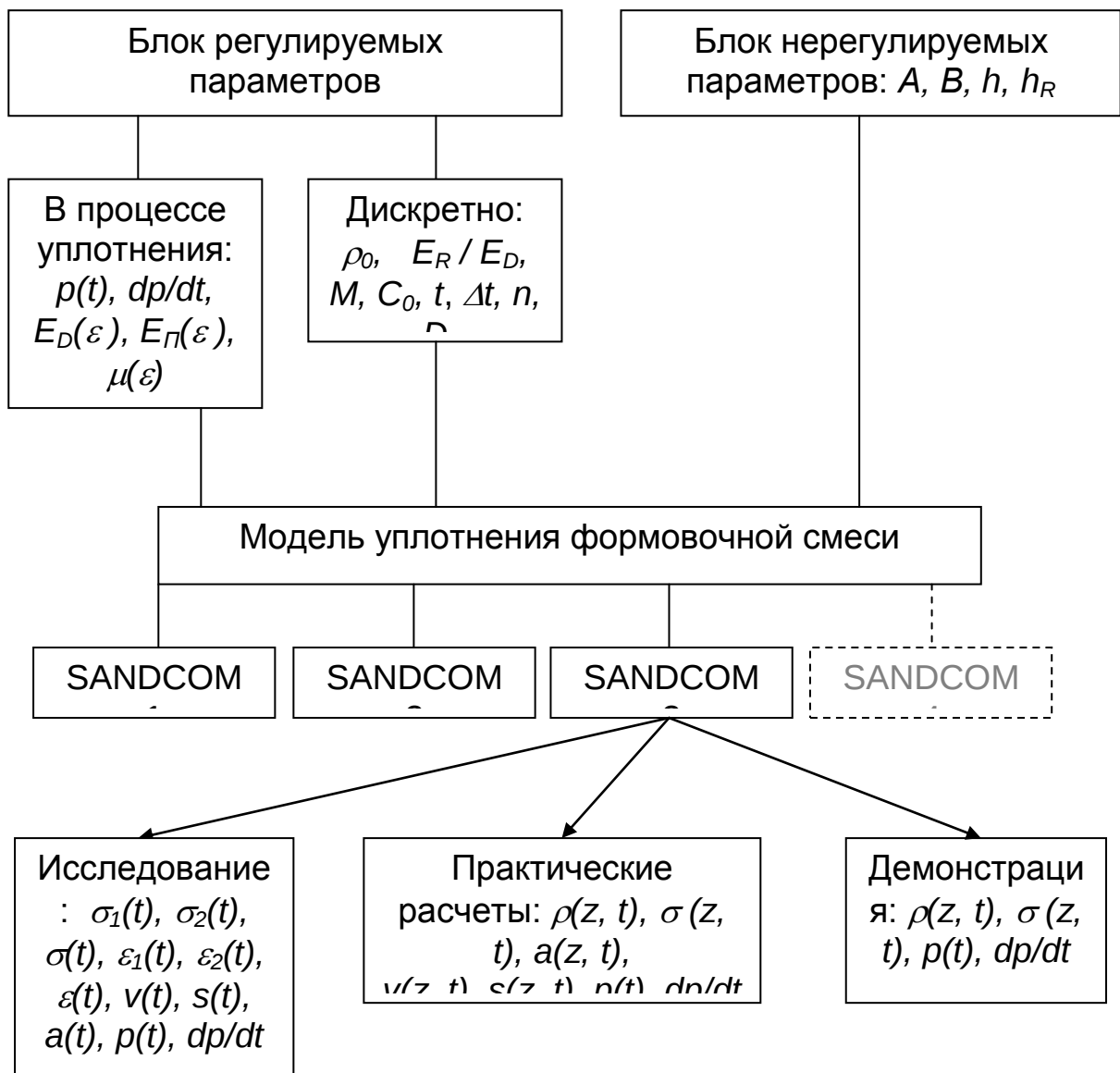


Рис. 4.3. Структурная схема моделирования уплотнения формовочных смесей при GAS – IMPACT процессе: SANDCOM 1 и SANDCOM 2 – программы моделирования процесса уплотнения при представлении формовочной смеси как упруго-вязкого тела. SANDCOM 3 – программа моделирования процесса уплотнения формовочной смеси как упруго-вязкого тела с переукладкой.

Включает дискретное задание:

- Количество слоев формовочной смеси для расчета (максимальное число 35).
- Временного интервала для расчетов Δt .
- Количество циклов расчета n .
- Задание начальной плотности слоев формовочной смеси (может быть в пределах $\rho_0 = 700 \dots 1500 \text{ кг/м}^3$).
- Задание максимального значения силы трения F_T .
- Задание отношения значений E_R / E_D , которое находится в пределах $1 \dots 10$.
- Задание отношения массы стола формовочной машины с оснасткой к массе уплотняемой формовочной смеси в пределах $k_M = 10 \dots 100$.
- Задание отношения жесткости стола с оснасткой к максимальной жесткости уплотняемой формы в пределах $k_C = 100 \dots 10000$.

Задание параметров, изменяющихся в процессе уплотнения формовочной смеси производится на отдельных формах. В работе [33]. представлена форма с компонентами для задания характера изменения и параметров динамического модуля упругости смеси E_D в зависимости от текущей деформации ε . Аналогичная форма задания модуля переукладки E_{II} представлена также в [33].

Задание параметров внешнего нагружения представляется графически или по формуле. При этом имеется возможность задания изменения давления газов над свободной поверхностью уплотняемой формы как экспериментальных данных в виде значений сплайн-интерполяции, так и задания с помощью параметров:

- Общее время действия давления газо-воздушной смеси t .
- Время достижения максимального значения t_{max} .
- Максимальное значения давления газо-воздушной смеси p_{max} .

Пример задания параметров внешнего нагружения по выше указанным методикам представлен в [34].

Задание изменения в процессе уплотнения параметра вязкости μ представлено в [35].

Таким образом, в разработанной программе максимально учтены знания о поведении формовочной смеси при динамических нагрузках и данные экспериментальных исследований. Возможность широкого регулирования деформационных характеристик уплотняемой формы в установленных «реальных» диапазонах позволяет эффективно проводить исследования и практические расчеты.

5. О МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация

Промышленные предприятия решают две проблемы, в частности, повышают производительность машин и качество продукции. Эти проблемы решаются с использованием производственных систем на основе соответствующих технологий. Производственные системы представлены в виде различных решений, как отдельных машин, так и автоматизированных производственных линий со сложными структурами. Теория производительности дает знания в анализе разумных связей и закономерностей, которые должны применяться к концепциям проектирования для оптимизации работы и структуры производственных машин и систем. В статье представлены математические модели расчета производительности машин и системы машин, разработанные с помощью аналитических уравнений, учитывающие технологический процесс, показатели надежности машин и компонентов, специфику проектирования машин и систем, и которые позволяют вычислять оптимальные режимы обработки и оптимальные структуры АЛ на примере АЛ параллельного действия.

Введение

Промышленные предприятия разработали множество разнообразных машин и систем, которые решают проблемы повышения производительности при обеспечении высокого качества производимых изделий. Современные тенденции в области машиностроения связаны с повышением интенсивности режимов обработки и созданием сложных производственных систем, таких как автоматизированные производственные линии (АЛ), с рабочими машинами, объединенные в последовательные, параллельные и последовательно-параллельные структуры. На производстве различают два значения производительности. В производственной экономике термин производительности представляет собой как отношение объема выпущенной

продукции к затратам, и оценивается стоимостью затрат. Как правило, экономический термин производительности представляет эффективность производственных систем. Промышленное производство представляет собой термин производительности как отношение количества продукции, изготовленных за время производства. Этот термин используется в теории производительности машин. Качество продукции является важным аспектом производственных процессов и рассматривается различными теориями технологий обработки изделий.

Интенсификация режимов обработки приводит к повышению производительности машин, и ученые предложили множество моделей, решения которых представлены разными критериями. Как правило, все публикации, посвященные интенсификации и оптимизации процессов обработки, могут быть разделены следующими критериями: оптимальный срок службы инструмента, минимальное время обработки, качество обрабатываемой поверхности, минимальная стоимость обработки и их комбинации. Однако во многих случаях промышленного производства преобладает критерий максимальной производительности машины.

Производительность машин - это комплексный показатель и содержит параметры технологии, конструкции, надежности и управления. Последнее можно рассматривать отдельно, поскольку эта деятельность оценивает качество систем управления. Недавнее исследование представлено несколькими публикациями, которые решают оптимизацию режимов обработки по критерию производительности для одного и нескольких инструментов. Однако оптимизация режимов обработки приводит к ограничению производительности для данной технологии. Эта проблема решается путем проектирования сложных производственных машин на основе сегментации технологических процессов, которые реализуются на АЛ, состоящих из рабочих машин и механизмов, с транспортными системами. Для коротких технологических процессов, которые не могут быть сегментированы, разработаны многоканальные АЛ параллельной структуры.

Следующими этапами эволюции производительной машины является АЛ последовательной, параллельной или смешанной структуры. Все эти типы АЛ разработаны с определенным количеством рабочих станций и собственными свойствами, и особенностями. Сложные АЛ с различными структурами испытывают простои в основном по причинам надежности рабочих станций и механизмов. Увеличение числа рабочих станций приводит к снижению производительности АЛ. Следующими шагами повышения производительности является сегментация АЛ на участки со встроенными буферами. В случае отказа одной рабочей станции, которая приводит к простоям одного участка с несколькими станциями, но не всей АЛ. Следовательно, все типы АЛ имеют оптимальное количество рабочих станций, которые обеспечивают максимальную производительность. Что касается структурного проектирования АЛ, то их продуктивность и надежность публикуются в многочисленных книгах и документах с различными методологическими подходами и критериями решений. Публикации в области конструктивных решений АЛ можно разделить на следующие критерии: балансирование технологического процесса, минимальное время и стоимость обработки, надежность машин и механизмов, емкость буфера, количество секций и их комбинации.

Однако в известных публикациях отсутствуют математические модели производительности АЛ с различными структурами и описаны только некоторые свойства и особенности. Недавние исследования представляют собой целостные математические модели производительности АЛ с различными структурами, которые включают в себя технологические, конструктивные параметры, параметры надежности и могут включать управленческий аспект. Математические модели позволяют определить оптимальное количество последовательных и параллельных рабочих машин, и станков АЛ. Эти математические модели универсальны и могут применяться для любых видов отраслей, таких как транспорт, химия, текстиль и т. д. Эта система аналитических уравнений для расчета

производительности производственных процессов, представлена целостной теорией производительности для машиностроения. Представленная теория производительности рассматривает производственные процессы, как процессы, основанные на следующих фундаментальных принципах: концептуальные принципы теория производственных систем; технологические процессы - основа проектирования производственных систем; теория надежности и вероятности; математические модели производительности различных конструкций производственных машин и систем с оптимальными решениями по критерию необходимой и максимальной производительности; системный анализ работы машин в реальных производственных средах с целью выявления типов и причин потерь производительности. Эта теория производительности в первую очередь ориентирована на технологические процессы, связанные с производством. Однако теория производительности универсальна и может применяться для любых отраслей промышленности. Адаптация теории производительности для производственных процессов других отраслей промышленности вполне допустимо.

Методология

Время производства, затрачиваемое на производственные процессы, должно эффективно использоваться и оцениваться по атрибутам, которые могут дать четкое представление о том, как используется время. Фактические производственные процессы зависят от многих факторов, в том числе от технологий, проектирования машин и систем, эксплуатации машин и систем обслуживания, надежности и обслуживания машин, а также управленческих и организационных аспектов на объектах производства. Реальные промышленные среды показывают, что время производства не используется полностью во время производственных процессов. Концептуальные принципы производительности для производственных систем представлены следующими математическими подходами.

Анализ фактического времени производства показывает, что некоторые типичные компоненты времени являются постоянными в производственных процессах, и поэтому они могут быть представлены в математических формах.

Аналитически время производства может быть представлено следующим уравнением:

$$\theta = \theta_m + \theta_a + \theta_r + \theta_i \quad (5.1),$$

где θ - общее время производства; θ_m - время обработки продукта, θ_a - вспомогательное время, которое представляет время, затрачиваемое на подготовку процесса дискретной обработки, например загрузку, зажим, перезагрузку и передачу рабочей части в область обработки. Вспомогательное время зависит от конструкции машины и представляет собой потерянное время. Этот атрибут является результатом несовершенной конструкции машины. Для непрерывных процессов обработки машины спроектированы без вспомогательного времени, где $\theta_a = 0$ и показатель безупречности конструкции машины. θ_r - это время простоя, затрачиваемого на ремонт, техническое обслуживание и обслуживание случайных сбоев оборудования и времени простоя из-за многих причин, включая время изготовления дефектных продуктов, т.е. потерянное время; и θ_i – время простоев из-за управленческих и организационных проблем, которые рассматриваются по двум аспектам:

- непредсказуемые перерывы в производственном процессе из-за отсутствия рабочих элементов, падения мощности, задержки сотрудников и т. д.
- планируемое время обслуживания и обслуживания остановленной машины, выполненное в соответствии с планом обслуживания, необходимое для обеспечения работы машины в рабочем состоянии в течение длительного времени, а также организационные изменения, необходимые для подготовки процесса обработки для изготовления новых изделий.

Эти простои являются атрибутом несовершенства систем управления и организаций производственных процессов. Время производства представлено следующими группами:

$\theta_w = \theta_m + \theta_a$ - рабочее время, затрачиваемое на производство изделий и

$\theta_p = \theta_w + \theta_r$ представляется как время производства.

Процессы производства оцениваются по разным показателям, а одна из них - производительность. Размерности производительности отличаются, и наиболее применимыми являются изделие / время, кг / время, м / время, м² / время и м³ / время, и прочие. Эти размеры в значительной степени зависят от типа отрасли и используемых технологий. Независимо от разницы в измерении, в общем случае продуктивность производственной системы может быть представлена уравнениями в масштабе общего времени производства. Производственные процессы являются сложными системами и должны учитывать различные типы производительности для оценки эффективности его компонентов. Такой подход дает возможность отдельно рассмотреть технологию процесса, строение и надежность машины, а также эффективность систем управления и организации. В данной статье рассматривается коэффициент производительности для различных производственных машин и систем. Однако представленный аналитический подход может быть использован для получения новых математических моделей и расчета производительности труда любых типов машин и целых производственных систем.

Математическая модель производительности технологической машины

Математическая модель производительности представлена для отдельной технологической машины следующим уравнением:

$$\theta_a = \frac{z}{\theta_p} = \frac{1}{\frac{\theta_m + \theta_a}{z} + \frac{\theta_r}{z}} = \frac{1}{T + \frac{m_r n}{mn/T}} = \frac{1}{T + m_r T \sum_{i=1}^r \lambda_{\gamma}} = \frac{1}{t_m + t_a} \times$$

$$\frac{1}{1 + m_r \sum_{i=1}^r \lambda_{\gamma}} = \frac{1}{t_m} \times \frac{1}{1 + (t_a / t_m)} \times \frac{1}{1 + m_r \sum_{i=1}^r \lambda_{\gamma}} = Q_c A \quad (5.2)$$

Где Q_a - фактическая производительность машины, а z - количество изделий, произведенных за время производства θ_p ;

$(\theta_m + \theta_a) / z = T = t_m + t_a$ - время цикла для изготовления одного изделия; $\theta_r / z = m_r n$ - это время простоя из-за проблемы надежности машины на одно изделие, m_r - среднее время восстановления одного случайного отказа, n - количество отказов за время производства; $z = mn / T$, где m - среднее время безотказной работы машины, $\lambda_i = 1 / m$ - частота отказов i механизмов и единиц (инструмент λ_c , шпиндель λ_s , система управления λ_{cs} , передаточные механизмы λ_g и т.д.); $Q_c = 1 / T$ - циклическая производительность; $A = 1 / (1 + m_r \lambda)$ - доступность машины.

Уравнение производительности для машин непрерывного действия представлено уравнением (2) где вспомогательное время $t_a = 0$, а циклическая производительность выражается формулой $T = 1 / t_m$, которая является пределом для данной технологии. Формула $f_d = 1 / (1 + [t_a / t_m])$ представляет собой конструктивный фактор для промышленных машин и имеет глубокий смысл. Тенденция в промышленности заключается в создании машин и систем со сложными конструкциями, что приводит к увеличению производительности, что в конечном итоге снижает конструктивные факторы. Эта двойственность приводит к решению, что любые типы машин имеют оптимальное решение в дизайне, которые обеспечивают максимальную производительность для данной технологии. Это также означает, что новые технологии могут быть эффективно и практически реализованы на новых промышленных машинных конструкциях, которые имеют высокие конструктивные факторы. Положительные свойства новых технологий теряются, если использовать их на старых машинных конструкциях. После совершенствования технологии, проектирования и

надежности дает теоретическое решение, что машины не имеют пределов производительности.

Повышение производительности достигается за счет интенсификации процессов обработки и поиска математических моделей для максимальной производительности станков. Ниже представлены универсальные математические модели для оптимальной скорости резания для процессов обработки несколькими инструментами, которые могут быть применены к многошпиндельным, многопозиционным станкам и АЛ. Процесс обработки представлен режимами механической обработки, которые значительно изменяют скорость резания. Другие компоненты имеют ограничение из-за качества рабочих деталей. Увеличение скорости резания приводит к сокращению срока службы инструмента и увеличению времени простоя из-за поломки режущего инструмента. Действие всех факторов представлено в математической модели производительности в качестве функции интенсификации процесса обработки.

Время обработки детали изменяется с изменением скорости резания и представлено следующим уравнением:

$$t_{mn} = \frac{t_m}{k} = \frac{t_m}{V/V_0} = \frac{t_m V_0}{V} \quad (5.4)$$

где t_{mn} - новое время обработки; $k = V / V_0$ - коэффициент увеличения скорости резания, V - новая скорость резания, V_0 - нормативная скорость резания.

Уравнение для увеличения частоты отказов режущего инструмента с увеличением скорости резания решается с помощью уравнения времени Тейлора $T = (CV)^{1/b}$, где C - эмпирическая константа, возникающая в результате регрессионного анализа и полевых исследований, и b - эмпирическая постоянная, которая зависит от материала режущего инструмента.

Атрибут λc частоты отказа режущего инструмента изменяется вместе с изменением скорости резания. Частота отказов n независимых режущего инструмента, участвующих в процессе обработки в соответствии с правилами теории вероятностей, представлена следующим уравнением:

$$\sum_{i=1}^k \lambda_{c,i} = \frac{1}{\sum_i^r T_{ci}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i V}{c_i} \right)^{1/b} \quad (5.5)$$

где $a_i = V_i / V$ - отношение скорости резания режущего инструмента i относительно скорости резания режущего инструмента с самым длинным временем обработки.

Другие компоненты уравнения (5.3) не меняются с изменением скорости резания. Подставляя определенные параметры в (5.3.) и преобразование дает следующее уравнение:

$$Q = \frac{1}{\frac{t_m + V_0}{V} + t_a} \times \frac{1}{1 + m_r \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i V}{c_i} \right)^{1/b_t} + \sum_{i=1}^r \lambda_{\gamma} \right]} \quad (5.6)$$

Максимальная скорость производительности определяется первой производной уравнения (5.6) с переменной скоростью резания V (фор.5.1). Уравнение (5.6) может использоваться для вычисления оптимальной скорости резания для любых типов процессов резания, которые выполняются на станке.

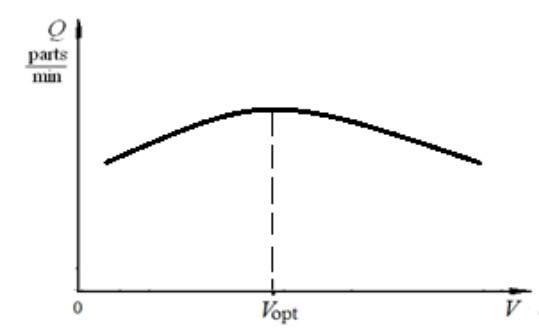


Рисунок 5.1. Изменение производительности машины по сравнению с изменением скорости резания.

Математическая модель производительности АЛ параллельного действия.

Промышленные процессы в разных областях используют технологические процессы с очень коротким временем работы. Практически короткие технологические процессы реализуются на одной рабочей машине или станке. Однако, во многих случаях, одна производительная машина не сможет выполнить программу выпуска изделия всего предприятия. Спрос на увеличение производительности приводит к внедрению нескольких параллельных станков или рабочих машин с такими же технологическими процессами. Такой тип параллельных машин представлен как производственные системы параллельного действия. В промышленности АЛ параллельного действия представлены несколькими решениями, включая линейные и круговые конструкции. Они имеют разные свойства и математические модели производительности.

Станки и рабочие машины, расположенные в параллельной структуре, создают структуры АЛ, которые описываются следующими свойствами:

- параллельное расположение идентичных рабочих машин для обработки деталей представлено как АЛ параллельного действия и спроектировано на одной платформе с единой системой управления и жесткой связью всех рабочих машин и механизмов;
- неисправность любой рабочей машины, механизма или блоков управления приводит к остановке всего АЛ, что приводит к снижению производительности;
- каждая рабочая машина в АЛ снабжена автоматическими механизмами подачи детали;
- производительность АЛ параллельного действия представлена как результат производительности одной рабочей машины, а также зависит от количества параллельных рабочих машин и их безотказной работы;

- все рабочие машины в АЛ запускают процесс обработки в одно время и завершают в одно время, т. е. время цикла процесса обработки одинаково на всех параллельных рабочих машинах.

Свойства АЛ параллельного действия позволяют представить математическую модель производительности, основанную на уравнении (5.2) для одной машины. Следовательно, производительность АЛ параллельного действия представляется следующим уравнением:

$$Q = \frac{P}{t_m + t_a} \times \frac{1}{1 + m_r [p_s (\lambda_s + \lambda_f) + \lambda_{cs}]} \quad (5.7),$$

где частота отказов АЛ параллельного действия увеличивается в p_s раз в соответствии с количеством параллельных рабочих машин, блоков и механизмов, p - количество машин для обработки деталей на АЛ; λ_s - частота отказа одной рабочей машины, λ_f - частота отказа устройства подачи обрабатываемой детали для одной рабочей машины, λ_{cs} - частота отказа общей системы управления.

Анализ уравнения (7) показывает, что в знаменателе есть одна компонента, $m_r p_s (\lambda_s + \lambda_f)$, значение которой увеличивается с увеличением числа рабочих машин p_s . Другие компоненты не меняются и имеют постоянные значения. На рисунке 5.3 показано изменение производительности по сравнению с изменением числа параллельных станций p_s .

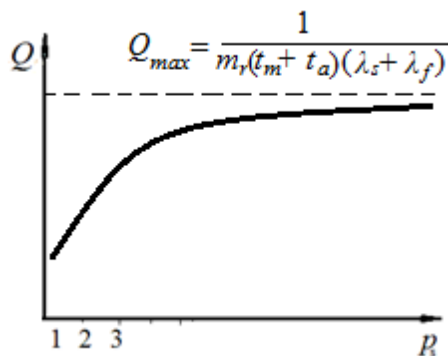


Рисунок 5.3. Производительность АЛ параллельного действия по сравнению с изменением количества параллельных рабочих машин.

Анализ уравнения (7) демонстрирует, что это некоторый предел производительности для АЛ параллельного действия. Максимальная производительность определяется математическим пределом уравнения (7). Оптимальное количество параллельных рабочих машин в АЛ рекомендуется выбирать в зоне, где увеличение количества параллельно работающих рабочих машин не дают чувствительного повышения производительности, и которое может быть оценено по экономическому критерию.

Выведенные математические модели для производительности, отдельной технологической машины и АЛ параллельного действия на основе технологического процесса, показателей надежности машин и компонентов, включают специфику проектирования машин и систем, позволяют вычислять оптимальные режимы обработки и оптимальные структуры АЛ.

6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ НА БАЗЕ УСТАНОВКИ АПР-404

В настоящее время в машиностроительном промышленности наряду с другими методами разделительной резки применение плазменной резки металлов является актуальной.

Целью настоящей работы является исследования и разработка технологического процесса плазменной резки металлов на базе установка АПР-404. Для достижения вышеуказанной цели были поставлены следующие задачи:

1. разработка технологии плазменной резки с использованием плазмотрона ПВР -402 на базе установки АПР - 404.
2. исследования зависимости толщины разрезаемого металла от скорости резки;
3. исследования зависимости толщины разрезаемого металла от напряжения и силы тока;
4. исследования качества поверхности реза при различных режимах резки.

Для решения поставленной задачи нами были проведены обзор и анализ существующих плазмотронов и технологий, а также теоретические и экспериментальные работы по исследованию скорости резки черных и цветных металлов зависимости от технологических параметров плазменной резки на базе установки АПР-404 имеющегося на кафедре «Технология машиностроения».

Плазменная резка металлов и сплавов, благодаря высокой производительности и универсальности, получает все более широкое распространение в различных отраслях производства. Плазменная резка различается по роду применяемых газов. В качестве плазмообразующих газов используются аргон, гелий, азот, водород, воздух, углекислый газ, углеводороды, кислород, гексафторид (SF_6), пары воды, аммиак и смеси

вышеперечисленных газов. Применение молекулярных газов, по сравнению применения одноатомных инертных газов, повышает эффективность плазменной обработки. Однако при применении активных молекулярных газов снижается стойкость электродов плазмотронов.

Проведенный анализ литературы [42-48] показал, что для плазменной резки наиболее эффективным плазмообразующим газом является воздух. Воздух отличается малой стоимостью и недефицитностью, не требует специального баллоного хозяйства, имеет большое теплосодержание и высокий потенциал ионизации. Кроме этого, наличие кислорода в воздухе позволяет интенсифицировать процесс резки окисляющихся металлов за счет химических реакций окисления.

Плазменная резка по методу ведения процесса подразделяется на ручную, полуавтоматическую и автоматическую. Соответственно от метода ведения процесса зависит оборудование и технология. Например, по ГОСТу 12.2.007.8-75 установлены напряжения холостого хода источников питания (U_{xx}) в зависимости от метода ведения процесса: для ручной плазменной резки $U_{xx} = 180$ В; для полуавтоматической плазменной резки $U_{xx} = 300$ В; для автоматической резки U_{xx} - до 500 В

Таким образом, данная работа посвящена исследованию технологического процесса плазменной резки металлов на базе установки АПР-404.

Экспериментальное исследование технологического процесса плазменной резки на базе установки АПР-404

Для создания лабораторной работы по плазменной резке металлов, а также для проведения исследовательской работы по выбору технологических параметров режимов резки различных металлов мы на базе установки для плазменной резки металлов АПР-404 имеющиеся на кафедре технология машиностроения проводили исследовательские работы по выбору режима резки различных металлов. Плазмотрон ПВР-402 установили на самоходную

тележку от сварочной установки АДС-1000 для сварки под слоем флюса.

Ниже приведены фотоотчет о проделанных нами ремонтно-восстановительных работах, а также результаты запуска и выбора необходимых технологических параметров процесса плазменной резки металлов.

Ремонтно-восстановительные работы установки АПР-404



Восстановление и ремонт силовых кабелей установки



Ремонт систему перемещения и подъема плазмоторна



Восстановление и настройка систем подачи воздуха и охлаждающей воды

Экспериментальные работы по выбору технологических параметров плазменной резки



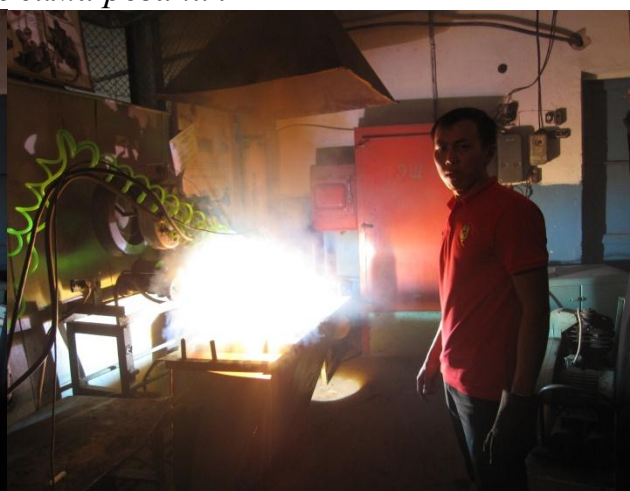
Заготовка для резки из нержавеющей сталей



Настройка расстояние плазмотрон-металл



Настройка режима резания



Процесс плазменной резки металла



Выбор скорости резания в зависимости от толщины металла



Резка стали толщиной 40 мм

Для того чтобы осуществить плазменную разделительную резку металла, необходимо расплавить определенный объем материала вдоль предполагаемой линии реза и удалить его из полости реза скоростным потоком плазмы

Расплавленный металл, образующийся на лобовой поверхности реза, удаляется скоростным потоком плазмы сжатой дуги. Скорость потока плазмы возрастает с увеличением расхода плазмообразующего газа и тока дуги и быстро уменьшается с увеличением диаметра сопла. Она может достигать примерно 800 м/с при токе 250 А.

Скорость течения расплава зависит от скорости потока плазмы на границе раздела фаз, т.е. на границе жидкий металл - поток плазмы. Так, при резке металла толщиной 5-20 мм со скоростью 0,75-6 м/мин и ширине реза 3-

6 мм, скорость течения расплавленного металла 20-40 м/с.

Задача плазменной разделительной резки - вырезка контуров с перпендикулярными кромками в соответствии с заданными размерами.

Предполагается, что поверхности резов должны быть ровными и гладкими, а качество металла у кромок равноценно качеству основного металла. Однако из-за несовершенства процессов резки не всегда удается выполнить указанные требования.

Наиболее характерными отклонениями от этих требований являются не плоскостность и неперпендикулярность поверхностей реза из-за непостоянства сечения плазменно-дугового реза по высоте это вызвано тем, что различные участки режущей дуги вводят в разрезаемый металл неодинаковое количество теплоты, а, следовательно, на различной глубине реза расплавляется неодинаковое количество металла.

В верхней части реза, в которой металл может расплавляться за счет излучения столба разряда, теплопередача равномерна и рез имеет параллельные кромки. Тепловую энергию в нижнюю часть реза может вводить факел дуги. Температура плазмы в факеле и интенсивность теплопередачи постепенно уменьшаются по высоте нижней части реза, поэтому его кромки на этом участке сходятся книзу. Наиболее интенсивно передает тепловую энергию активное пятно дуги. В зависимости от его расположения по глубине реза или зоны его перемещения, а также от толщины разрезаемого металла рез может получиться уширенным кверху или книзу или бочкообразной формы. Расположение активного пятна дуги в полости реза зависит от параметров дуги, характера ее формирования, скорости резки, толщины и свойств разрезаемого металла. При изменении этих параметров изменяется и форма сечения реза. Так, при уменьшении скорости резки общая ширина реза увеличивается, особенно в нижней его части, поверхности реза становятся почти параллельными друг другу, при очень малых скоростях в нижней части расширяются.

С увеличением силы тока режущей дуга ширина реза увеличивается,

особенно в нижней его части, а поверхности реза становятся почти параллельными друг другу. При увеличении расхода газа уменьшаются общая ширина реза и не параллельность его поверхностей. Подъем режущего сопла над металлом сопровождается уширением реза, особенно в верхней его части, и увеличением не параллельности кромок.

Форма сечения реза зависит от толщины разрезаемого металла и от рабочего напряжения режущей дуги. При резке металла небольшой (5-20 мм) толщины, резы имеют, как правило, сходящиеся кромки. Если резать металл такой толщины жесткой режущей дугой (рабочее напряжение 140-150 В и более), то формы поверхностей реза близки к плоским формам и их не параллельность незначительна. Форма кромок резов, выполненных мягкой режущей дугой, зависит от скорости резки. При малых скоростях резки могут быть получены кромки, близкие к вертикальным, однако с увеличением скорости сечение реза получается неправильной формы: вертикальная плоскость верхней части исчезает или становится вогнутой, а затем выпуклой в сторону реза.

При резке металла большой (40-50 мм и более) толщины, наряду со сходящимся книзу сечением реза наблюдается уширение в средней его части (бочкообразный рез). Однако и в этом случае режущая дуга с высоким рабочим напряжением обеспечивает получение резов с поверхностями более плоскими и параллельными, чем при резке мягкой дугой.

При плазменной разделительной резке, кроме отклонений от заданных размеров и форм кромок вырезаемых деталей происходят видимые и невидимые изменения качества поверхностей реза. После резки кромки могут быть гладкими и шероховатыми, матовыми и блестящими, темными и светлыми. У нижних кромок реза часто образуются наплывы в виде небольшого валика вдоль нижних кромок реза, цепочки застывших натеков в виде капель металла («бороды»), приварившегося к кромкам графа (многочисленные нитеобразные натеки различной длины).

В процессе резки у кромок реза возникает зона термического влияния

из двух участков: литого, состоящего из неудаленного с твердых поверхностей расплава металла, который образовался при резке, и с измененной структурой, в котором металл не расплавился, но в результате быстрого нагрева и охлаждения в нем произошли рост или уменьшение зерен и другие структурные превращения.

Плазменная резка металла имеет преимущества перед другими способами резки (кислородная, лазерная резка и резка водой с абразивом):

Преимущества перед кислородной резкой: более высокая скорость, минимальные деформации материала в результате термического воздействия.

Преимущества перед лазерной резкой: более низкая стоимость, равная или более высокая скорость резки, достаточно высокие качественные показатели.

Преимущества перед водоструйной резкой с абразивом: более высокая скорость, более низкая стоимость, низкий уровень загрязнения окружающей среды.

Как показали исследования, геометрия разрядной камеры и параметров режима работы режущего плазматрона оказывает существенное влияние на газодинамические и электрические параметры режущей дуги, и в конечном счете, на основные технические характеристики, определяющие эффективность процесса резки: скорость резки, глубина прорезания, ширина полости реза и качество поверхности реза.

Для определения основных зависимостей технологических параметров от параметров режущего плазматрона, марки и толщины разрезаемого металла были проведены необходимые исследования. Исследования процесса резки проводилась для листов из стали СТЗ, нержавеющей стали марки Х18Н10Т и алюминия марки "А" в диапазоне разрезаемых толщин $(10-90) \cdot 10^{-3}$ м. Режущий плазматрон перемещался устройством обеспечивающим изменение скорости в диапазоне 0,05 - 10 м/мин. Выполнялась резка прямоугольных заготовок. Ошибка в заданном диапазоне изменения скоростей по результатам тарировки не превышала $\pm 0,5\%$. Исследовалась

влияние скорость резки марки и толщины металла, а также тока дуги, расхода воздуха и диаметра сопла.

Для исследования прорезающей способности плазмотронов использовалась методика разработчика, разработанная К.В. Васильевым согласно которой осуществлялось резка клиновых образцов длиной - $400 \cdot 10^{-3}$ м и высотой - $110 \cdot 10^{-3}$ м.

Исследования наибольшей глубины прорезания проводилась применением метода математического планирования эксперимента. Одновременно контролировалась средняя ширина реза, которая определялась как подсумма от значений ширины верхней и нижней кромок. Исследования выполнялись с последующим движением по градиенту. Каждый опыт повторялся три раза, а порядок выполнения опытов соответствовал таблице случайных чисел, во всех опытах применялась постоянная скорость перемещения плазматронов 0,25м/мин и расстояние плазматрона до изделия $10 \cdot 10^{-3}$ м.

Качество поверхности реза согласно ГОСТ14792-69 определялось в зависимости от перпендикулярности и шероховатости поверхности реза. При этом перпендикулярность реза определяли стальным угольником по ГОСТ10356-63 (25), а шероховатость поверхности реза. а шероховатость поверхности реза на базовой длине $8 \cdot 10^{-3}$ м по ГОСТ12789-73 в зависимости от толщины разрезаемого металла.

Исследовался также полный тепловой к.п.д. процесса резки для различных значений мощности режущей дуги и толщины металла. Его значение определялось по формуле

$$\eta_p = \frac{P_p}{P_g - \Delta P_{\text{э}} - \Delta P_{\text{ог}}} \quad (6.1)$$

где, P - мощность, затрачиваемая на расплавление металла в полости реза, кВт; P_g - полная мощность режущей дуги, кВт; $P_{\text{э}}$ - потери мощности в электродной системе плазматрона, кВт; $P_{\text{ог}}$ - потери мощности в открытой части дуги от плазматрона до изделия, кВт.

Мощность, затрачиваемая на расплавление металла в полости реза, определялось из выражения:

$$P_p = g \cdot c(t_{пл} - t_0) + a \quad (6.2)$$

где, g - весовая производительность вплавления металла, кг/с, $t_{пл}$, t_0 - соответственно, температура плавления и начальная температура разрезаемого металла, $^{\circ}\text{C}$; c - удельная теплоемкость металла, Дж/кгс; a - скрытая теплота плавления, Дж/кг.

В уравнения (6.2) не учтена доля мощности, затрачиваемая на испарения металла. Как показали исследования доля мощности, идущей на испарение уделяемого из полости реза металла не превышает 10 %. Поэтому не учет доли мощности на испарение дает ошибку не более 5 %.

Весовая производительность вплавления металла определялась по формуле:

$$g = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2) \cdot \delta \cdot v \cdot \gamma \cdot 10^{-6}}{2} \quad (6.3)$$

где, v_1 и v_2 - ширина соответственно, в верхней и нижней части реза, м; δ - толщина разрезаемого металла, м; v - скорость резки, м/с; γ - удельный вес металла, кг/м².

Расчетные данные сопоставлялись с экспериментальными, которые определялись взвешиванием заготовки до и после резки. При этом небольшие отклонение не превышало 10% при резке нержавеющей стали марки Х18Н10Т толщиной до $70 \cdot 10^{-3}$ м.

Измерения геометрии полости реза, проводилось штангенциркулем с точностью $0,1 \cdot 10^{-3}$ м, а для взвешивания образцов использовались технические весы с точностью $0,5 \cdot 10^{-3}$ кг.

Выполненные исследования позволили установить ряд зависимостей между технологическими параметрами и параметрами плазмотрона. Зависимости резки от толщины алюминия, нержавеющей стали и стали Ст.3. при разных значениях тока приведены на рис. 1, 2 и 3. Там же для сравнения представлены кривые 2 и 3, соответствующие режимами резки

плазмотронами с циркониевым и гафниевыми катодами.

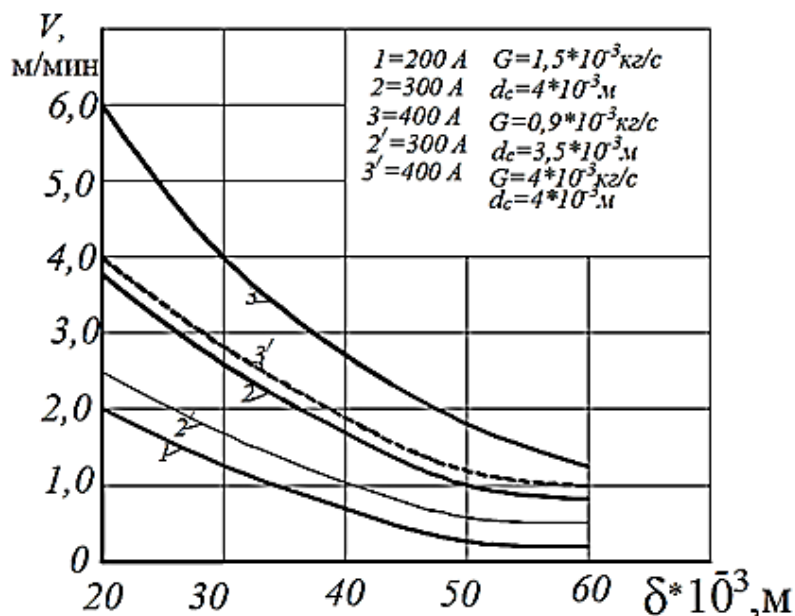


Рисунок 6.1 – Зависимости скорости резки алюминия от толщины

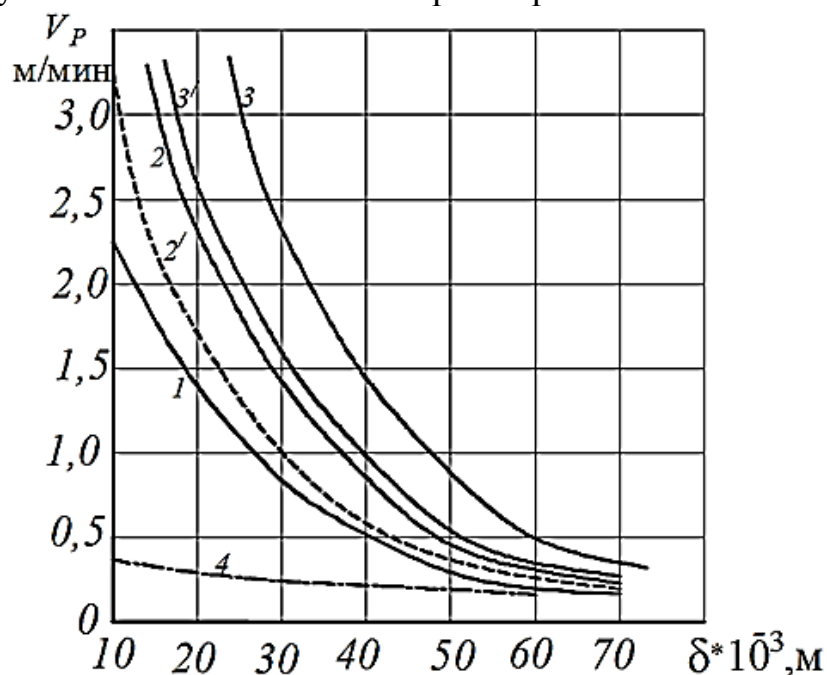


Рисунок 6.2 – Зависимости скорости от резки толщины нержавеющей стали при разных значениях тока I - $I = 200, 2-300, 3-400$,
 $G = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$, $d_c = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $2-1=300$; $3-1=400 \text{ А}$;

Кривые 4 соответствуют режимам резки нержавеющей сталей кислородно-флюсовым способом газокислородным способом для стали Ст.3. Как видно из рисунков, одинаковых значениях, тока дуги скорость резки плазмотроном с медным электродом превышает скорость резки плазмотронами с термохимическими катодами соответственно: по алюминию на 60-85%; по нержавеющей стали на 35-80% и по стали Ст.3 на 50-80%.

Повышенные значения скорости резки для плазмотрона с медным электродом обуславливаются главным образом большим значением напряжения дуги. Это позволяет увеличить теплосодержание, скорость истечения и в конечном счете динамический напор плазменной режущей дуги. Из графиков видно, что при одинаковых значениях тока дуги и толщины наибольшая скорость наблюдается при резке алюминия (рис. 6.1) и наименьшая при резке нержавеющей стали (рис. 6.2). Более высокие скорости резки для алюминия обусловлено меньшими значениями температуры плавления и плотности.

Скорость резки углеродистой стали Ст.3 (рис. 6.3) несколько выше скорости резки нержавеющей стали. Это связано с выделением дополнительного количества тепла в полости реза за счет экзотермических реакций окисления кислорода, содержащегося в плазмообразующем воздухе.

Влияние рабочего тока, расхода воздуха, диаметра сопла и скорости резки при различных толщинах нержавеющей стали приведен на рис. 6.2. наибольшее влияние на скорость резки оказывает ток дуги и несколько меньше - расход воздуха и диаметр канала сопла. Так с увеличением тока дуги от 200 и 400А скорость резки для толщины $50 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 6.2, кривая 4) возрастает от 0,2 до 0,8 м/мин.

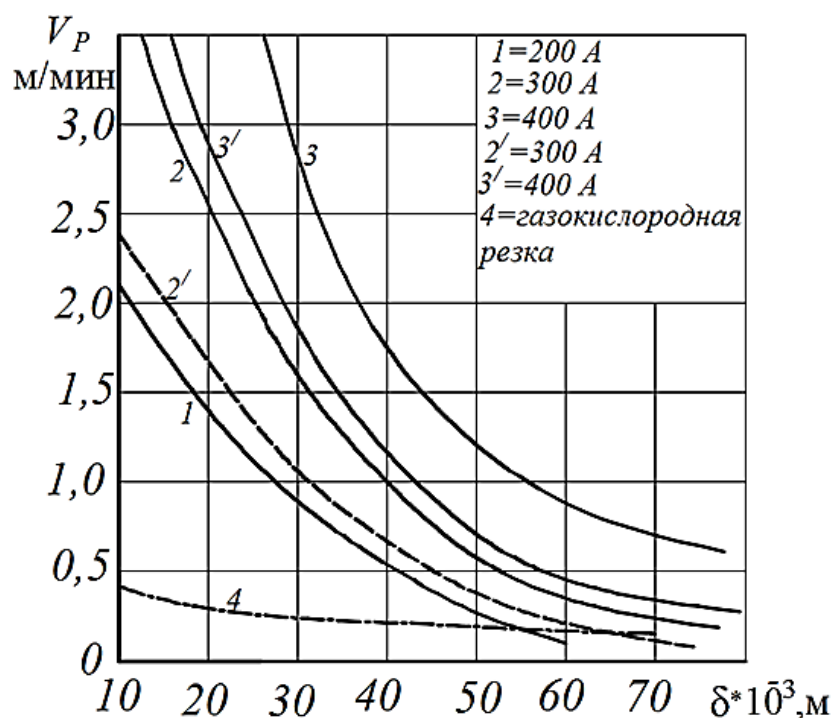


Рисунок 6.3 – Зависимости скорости резки от толщины низкоуглеродистой стали Ст.3 при разных значениях тока дуги.

7. УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Усталостью металлов называется изменение их состояния в результате многократного (циклического) деформирования, приводящее к разрушению при возникающем максимальном напряжении цикла, меньшем предела текучести их. Цикл повторно-переменного нагружения может быть (рис. 7.1) знакопеременный симметричный (а), знакопеременный несимметричный (б), пульсирующий (в) и знакопостоянный (г). Цикл напряжений характеризуется максимальным $\sigma_{\max}$, и минимальным $\sigma_{\min}$ напряжениями, а также коэффициентом асимметрии R равном $R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$

Основным критерием, характеризующим сопротивление металла усталостному разрушению, является предел выносливости (предел усталости), под которым подразумевается то наибольшее напряжение σ_R цикла, которое может выдержать металл при неограниченном числе циклов ($N=\infty$) повторений нагрузки при данном коэффициенте асимметрии цикла R (рис. 7.2).

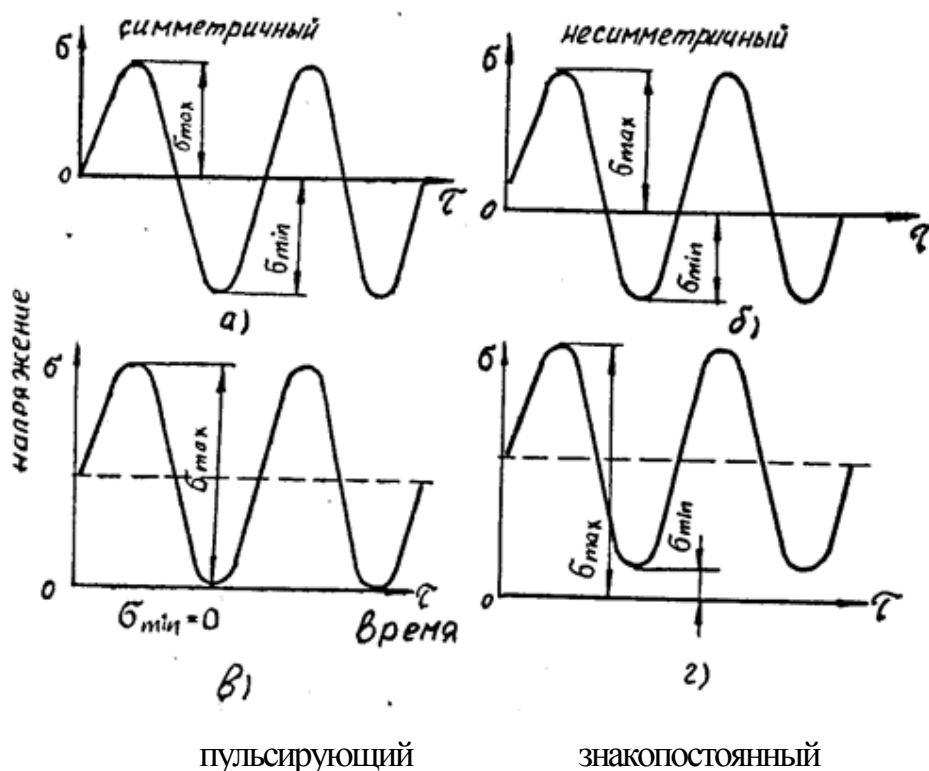


Рис. 7.1. Циклы повторно-переменного нагружения

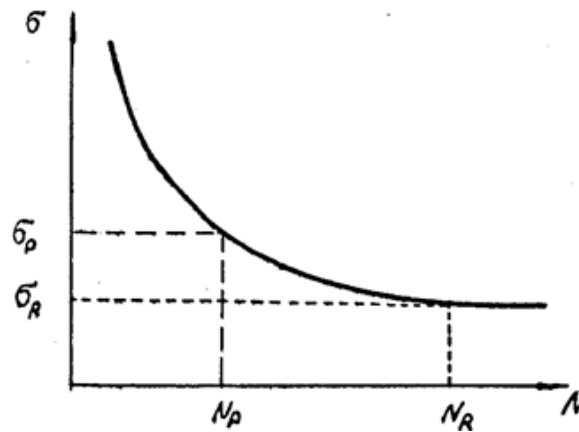


Рис.7.2. Влияние числа циклов N знако-переменного нагружения на предел усталости металлов

Если возникающее напряжение σ_p превышает предел усталости, то при достижении какого-то числа циклов N_p повторных нагружений материал разрушится. Это число циклов N_p характеризует период надежной работы детали в машине, т.е. ее долговечность, выраженную числом, циклов нагружения. Усталостное разрушение начинается с появления микротрещин. Пример трагических результатов усталостного разрушения деталей самолета красочно описан в книге "Этажи надежности". Полет трансатлантического лайнера проходил нормально. Экипаж "Кометы" самолета крупнейшей английской авиакомпании, поддерживал радиосвязь - сначала с аэропортом вылета, затем с аэропортом назначения. Пассажиры были заняты своим делом: читали, дремали, негромко беседовали. Потом кто-то заметил, что стало трудно дышать. Пассажиры забеспокоились. В эфир полетело тревожное сообщение пилота: произошла разгерметизация корпуса, невозможно поддерживать нормальное давление воздуха в салоне. Затем связь вообще оборвалась. Самолет так и не прибыл к месту назначения

После аварии все самолеты "Комета" были поставлены на профилактический осмотр. Но специалисты никаких серьезных дефектов не нашли. Все элементы, все узлы машин были, по их мнению, достаточно надежны, все соответствовало стандартам. Правда, в журналах осмотра сообщалось о каких-то крохотных трещинах в фюзеляже, обнаруженных на некоторых самолетах. Но об этом говорилось как о малозначительном факте, не имеющем прямой связи с возможными причинами аварии. Аварию объясняли случайностью, не

имеющей ни малейшего отношения и конструкции самолета. "Кометы" снова пошли в рейс. И вот новые катастрофы, новые жертвы ...

При повторном расследовании причин аварий запись о "малозаметных трещинах" связали с сообщением погибшего пилота о разгерметизации фюзеляжа. Не эти ли микротрещины - причина катастрофы? Исследования специалистов подтвердили эту догадку ".

В данном примере, по-видимому, не был учтен сам факт возможности усталостного разрушения фюзеляжа. Позже было выяснено, что эти разрушения возможны, например, от пульсирующих акустических давлений, вызванных работой реактивного двигателя, звуковая энергия которого может достигать 1% его мощности.

Наименьший предел выносливости наблюдается при симметричном цикле нагружения, т.е. при $R=1$. Это говорит о возможности повышения предела выносливости, создавая в поверхностном слое детали, подвергаемой симметричному знакопеременному циклу нагружений, остаточные напряжения сжатия, ввиду чего в этом слое цикл становится несимметричным с уменьшением растягивающих напряжений, являющихся более опасным, чем сжимающие [49].

Исследования показали, что форма и размеры детали существенно влияют на усталостную прочность, т.к. детали с различной конфигурацией и размерами имеют различные условия проявления действия концентраторов напряжений. Поэтому результаты испытания металлических образцов на усталость не могут прямо переноситься на конкретные детали. С увеличением абсолютных размеров детали ее усталостная прочность (удельная) снижается, т.к. при этом большая вероятность появления различных внутренних и внешних дефектов.

Различные материалы не одинаково чувствительны к концентрации напряжений. Чугун, мягкие пластичные стали, цветные металлы мало чувствительны к ним, а закаленные стали – очень чувствительны, причем эта

чувствительность возрастает с увеличением предела их прочности. Мелкозернистые стали имеют большую выносливость в сравнении с крупнозернистыми, однако они более чувствительны к концентрации напряжений, что ограничивает их усталостную прочность.

Выносливость стали при изгибе больше чем при растяжении, сжатии. С повышением предела прочности металлов также повышается предел усталости, однако металлы с одинаковой статической прочностью могут иметь различную усталостную прочность.

На снижение усталостной прочности влияют многие внутренние дефекты металла детали (металлургические, термические и т.п.), однако в большинстве случаев разрушение от усталости происходит ввиду наличия дефектов в поверхностном слое, полученных при обработке деталей (прерывность наклепанного слоя, трещины, обработочные риски, шлифовочные ожоги и др.).

Процесс разрушения детали при усталости условно можно разделить на несколько периодов. В течение первого (инкубационного) периода происходит накопление сдвиговых деформаций по плоскостям скольжения, упрочнение металла в результате возвратно-поступательного движения и скопления дислокаций перед препятствиями в основном у поверхностных слоев. При усталостном нагружении происходит упрочнение (и последующее разупрочнение) металла. Оно начинается с поверхностного слоя и распространяется вглубь металла (а на поверхности замедляется). Длительность первого периода не превышает 10% общей циклической долговечности.

Во втором периоде упрочнение металла достигает "насыщения", после чего начинается стадия разупрочнения, интенсивное образование вакансий (движущимися дислокациями), способствующих появлению субмикроскопических трещин (размер, которых меньше кристалла, т.е. зерна).

Применение рентгеновского метода исследований показало, что при

усталостном нагружении искажения кристаллической решетки локализуются в местах дефектов, ее, т.е. в зоне будущего разрушения. В этом заключается существенное отличие деформации решетки при циклическом нагружении от таковой при статической нагрузке, когда искажения решетки не локализуются, а распределяются равномерно по деформируемому объему металла [50].

Характерной особенностью сдвиговых процессов при усталостном нагружении является появление полос скольжения на поверхности детали, ясно видимых при металлографических исследованиях. В процессе образования полос скольжения в этой зоне образуются субмикроскопические трещины и поры. При этом полоса скольжения по всей ширине практически не увеличивается. А при статическом нагружении полосы скольжения постепенно покрывают все больший участок детали, на котором затем образуется, так называемая шейка перед разрывом детали или образца.

Образованию субмикроскопических трещин способствуют локальные температурные всплески в результате большого числа скольжения вдоль находящихся на близком расстоянии полос скольжения. При статическом нагружении это явление не имеет места, так как скорость протекания микропластических деформаций на несколько порядков ниже, чем при циклическом и теплота, образующаяся в результате разовых (не повторяющихся) сдвигов быстро отводится в другие слои металла.

В процессе разупрочнения в отдельных микрообъемах происходит рекристаллизация металла, сопровождающаяся изменением плотности его, ввиду него могут возникать растягивающие напряжения, что может также вызвать появление субмикроскопических трещин. Трещины, образовавшиеся внутри металла, могут закрываться, а на поверхности детали они остаются открытыми.

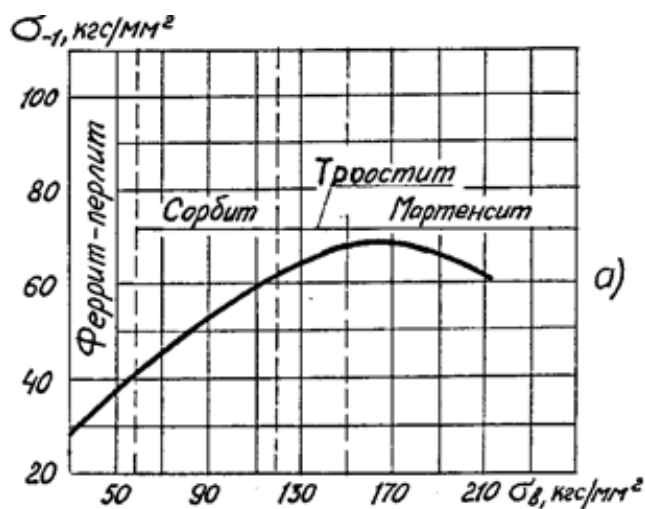
На третьем периоде происходит слияние субмикроскопических трещин и появление одной или нескольких микротрещин. Появление микротрещин еще не означает разрушения детали. Долговечность ее определяется

скоростью роста, занимаемого до 90% периода циклической прочности.

Последний, т.е. четвертый период наступает с момента достижения трещиной микроскопических размеров. При этом в зоне трещины снижается хрупкая прочность металла, повышается критическая температура хрупкости. При дальнейшем усталостном нагружении трещина увеличивается до критических размеров, фактическое (оставшееся) поперечное сечение уменьшается, ввиду чего истинное напряжение может превзойти предел прочности и деталь, часто, хрупко разрушается.

Детали современных машин изготавливаются из высокопрочных материалов. Статическая прочность высоколегированных сталей в 2-3 раза превосходит прочность обычных конструкционных сталей и достигает 150-180-200 и более кг/мм².

Однако с повышением статической прочности динамическая и усталостная прочность этих деталей, выплавленных по обычной технологии и с обычной термической обработкой, возрастает значительно медленнее. При этом коэффициент выносливости равный отношению предела выносливости к пределу прочности, уменьшается. На рис. 7.3 даны экспериментальные графики, количественно подтверждающие это положение [51]. Как видно из рис.7.3,а увеличение предела выносливости прекращается при возрастании предела прочности до 170 кг/мм², а при дальнейшем его увеличении предел выносливости уменьшается.



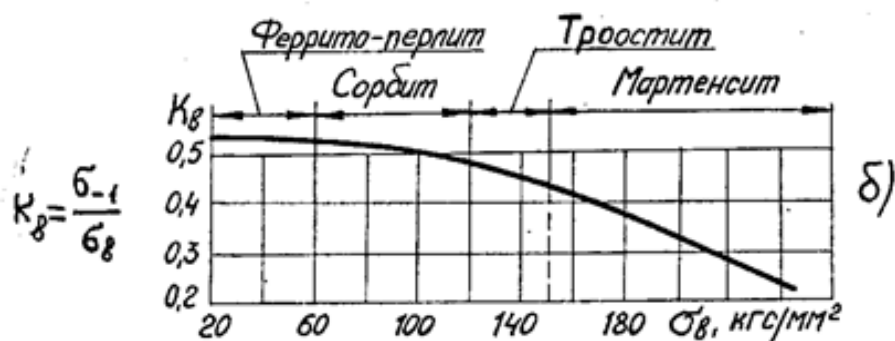


Рис.7.3. Влияние предела прочности и микроструктуры стали:

- а) на предел выносливости;
- б) на коэффициент выносливости

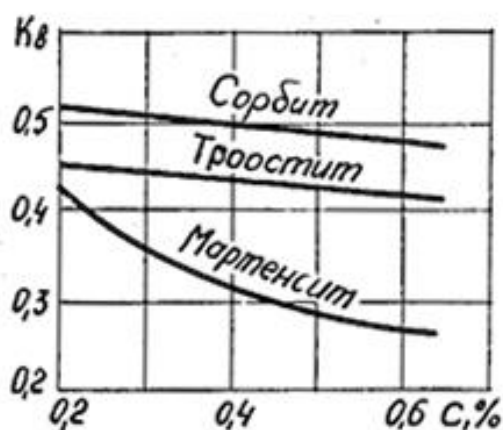


Рис.7.4. Влияние микроструктуры на коэффициент выносливости

Как видно из графика, при феррито-перлитной и сорбитной структурах сталей с увеличением статической прочности усталостная прочность также возрастает почти линейно. При троститной структуре сталей происходит заметное отставание роста ее, а при мартенситном строении происходит значительное замедление, затем прекращение роста и даже уменьшение усталостной прочности с увеличением статической прочности сталей. Коэффициент выносливости с увеличением предела прочности (рис.7.3) вначале медленно, а затем быстро уменьшается. Из рис.7.4 видно, что с увеличением углерода в сталях их коэффициент выносливости уменьшается (особенно мартенситной стали).

Одной из причин снижения коэффициента выносливости высокопрочных сталей являются силикатные и другие неметаллические включения, вызывающие

значительную концентрацию напряжений ввиду различия модуля их упругости. Стали, полученные плавкой в вакууме, электрошлаковым, вакуумно-дуговым, электронно-лучевым переплавом, а также рафинированием синтетическими шлаками имеют неметаллических вредных включений в 2- 2,6 раза меньше в сравнении со сталью, выплавленной по обычной технологии. Однако этот фактор не является доминирующим в обеспечении надежной выносливости высокопрочных сталей.

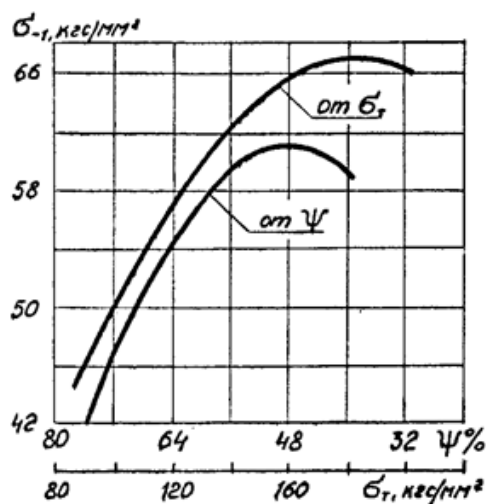


Рис.7.5. Влияние предела текучести и относительного сужения шейки высокопрочной стали на предел выносливости

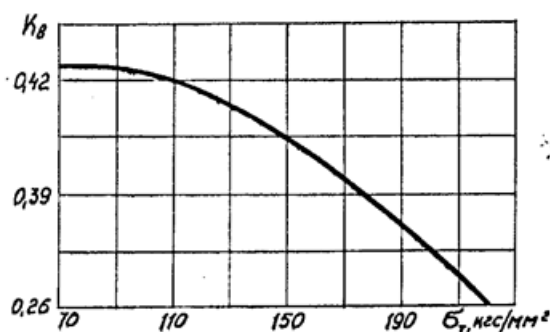


Рис.7.6. Влияние предела текучести высокопрочной стали на коэффициент выносливости

Исследования показали, что графики изменения предела выносливости и коэффициента выносливости σ_{-1} высокопрочных сталей в зависимости от пластичности (относительно сужения шейки) и предела текучести (рис.7.5 и 7.6) аналогичны графикам их изменения в зависимости от предела прочности (рис.7.3).

Зарождение усталостной трещины в высокопрочных сталях

лимитируется статической прочностью их, наличием остаточных напряжений и чувствительностью к концентрации напряжений, а на увеличение ее до критических размеров влияют два последние фактора и сопротивляемость хрупкому разрушению сталей.

На усталостную прочность оказывает влияние химико-термическая обработка сталей, поскольку она изменяет их вязкость, прочность и другие качества. Основные методы химико-термической обработки в следующем порядке (по возрастанию) влияют на твердость и прочность сталей: цементация, цианирование, азотирование, борирование. А на вязкость (характеризующую сопротивление хрупкому разрушению) они влияют в обратном порядке.

8. РАЗРАБОТКА ПУТЕЙ И МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОТВЕРСТИЙ ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Представлены методы и результаты лабораторных исследований повышения качества отверстий, обработанных быстрорежущими спиральными сверлами. Разработана математическая модель для расчета параметров качества отверстий, после сверления.

Известно, что более 60% деталей машин и механизмов имеют отверстия. Статистика показывает, что около 20% станочного парка машиностроительной и других отраслей промышленности составляют сверлильные станки, без учета выполнения операции сверления на станках типа токарных, револьверных, агрегатных и др. Сверление – единственный способ получения отверстий резанием, поэтому сверла являются одним из наиболее часто применяемых режущих инструментов. На промышленных предприятиях быстрорежущие спиральные сверла составляют от 11,3 до 22,8% от общего количества используемого инструмента. В общем объеме производства режущего инструмента наибольший удельный вес (около 30%) занимают быстрорежущие спиральные сверла.

В работе [53] представлены результаты анализа качества отверстий технологической оснастки: штампов, пресс-форм, лит-форм, применяемых на предприятиях г. Бишкек, таблица 8.1.

Таблица 8.1 - Параметры качества отверстий технологической оснастки

Диаметр, мм	Квалитет допуска размера	Шероховатость R_a , мкм	Допуск перпендикулярности оси отверстий, мм	Назначение отверстия
10-13	7	0,8	0,02	Под знаки
14-16	9-7	0,8	0,02	Под выталкиватели
16-20	7	0,8	0,04 – 0,06	Под направляющие втулки

Представленные в таблице 8.1 отверстия в основном содержат такие детали оснастки, как плиты: верхние, нижние, держатели матриц и пуансонов и т.п., каждая из которых имеет до десяти высокоточных отверстий различного диаметра. Технологический процесс обработки отверстий небольших диаметров, показанных в таблице 8.1, для достижения указанных параметров качества, содержит несколько переходов зенкерования и развертывания после сверления и достаточно трудоемок. При этом немаловажным фактором является стоимость металлорежущих инструментов, которая возросла более чем в сто раз, по сравнению с советским периодом. Поэтому в представленной работе рассмотрена достаточно актуальная проблема повышения качества отверстий, обработанных быстрорежущими спиральными сверлами, с целью снижения трудоемкости изготовления деталей.

Общепринятым технологическим способом повышения качества обработанной поверхности является увеличением скорости резания [54]. Однако этот способ неприемлем для обработки сверлением. Основанием для этого являются результаты лабораторных исследований, представленные на рисунке 8.1 [55].

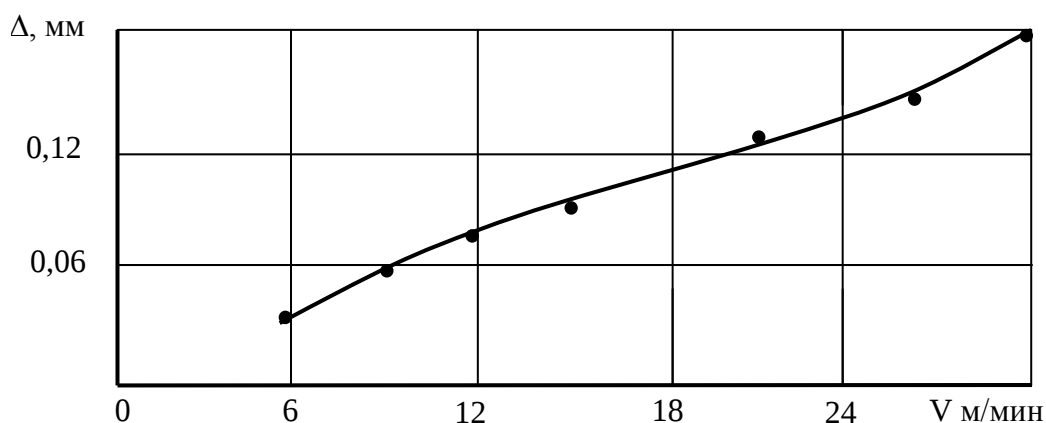


Рисунок 8.1 - Зависимость разбивки отверстия Δ от скорости резания V при сверлении

Разбивка определялась как разность между диаметром просверленного

отверстия и рабочим диаметром сверла.

При получении зависимости (рисунок 8.1) сверлились сквозные отверстия в заготовках их стали 45 190НВ спиральными сверлами диаметров 10,2 мм по ГОСТ [4] класс точности А1 с подачей $S = 0,23$ мм/об. Применялась двухплоскостная заточка режущей части сверл с доводкой алмазным инструментом. При установке в шпиндель станка (вертикально-сверлильный станок с ЧПУ модели 2Р135Ф2) контролировались осевое и радиальное биения режущих кромок, которые не превышали: радиальное - 0,08 мм, осевое – 0,05 мм.

Математическое выражение зависимости (рисунок 8.1) имеет вид

$$\Delta = 0,0063 \cdot V^{0,99}, \text{ мм.} \quad (8.1)$$

Увеличение скорости резания, например всего лишь до 100 м/мин приведет к увеличению разбивки отверстий до 0,6 мм (1), что практически недопустимо (максимальный допуск размера для отверстий диаметром 10 – 18 мм, обработанных сверлением, - 13 составляет 270 мкм [57]).

В работе [53] на основании экспериментальных исследований обоснован путь повышения качества отверстий, обработанных сверлением, применением скоростей резания меньших 6 м/мин. На скорости резания 6 м/мин рассчитанная по формуле (8.1) разбивка составляет 0,037 мм, что менее 9 квалитета допуска размера отверстий диаметром от 10 до 18 мм который составляет 43 мкм [57]. Для получения этого квалитета допуска для отверстий указанного диаметра рекомендуется чистовое зенкерование после чернового [57].

Помимо скорости резания на качество обработанных сверлением отверстий большое влияние оказывает толщина стружки – подача, от величины которой зависит сила давления стружки на передние поверхности режущих лезвий и высота нароста [58]. От силы резания зависит качество поверхностного слоя отверстий – величина и знак остаточных напряжений, а

также величина наклепа, нарост существенно и отрицательно влияет на качество обработанной поверхности [54].

На качество обработанных сверлением отверстий большое влияние оказывает погрешности заточки спиральных сверл, а именно осевое и радиальное биение режущих кромок, а также способ заточки задних поверхностей [59].

На основании изложенного выше определены задачи исследования:

- анализ и выбор вида заточки сверл для проведения лабораторных исследований;
- определение закономерностей влияния параметров режима резания на качество поверхности отверстий, обработанных сверлением;
- разработка математической модели для расчета параметров качества отверстий, обработанных сверлением.

В работе [59] отмечено, что значительно уменьшить погрешности заточки можно применением двухплоскостной заточки сверл, представленной на рисунке 8.2.

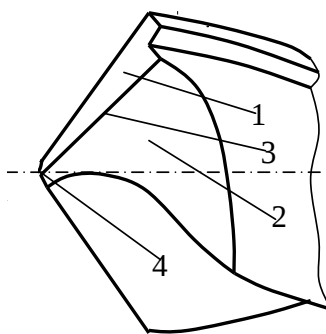


Рисунок 8.2 - Двухплоскостная заточка

Плоскость 1 затачивается под рабочим задним углом, плоскость 2 - под большим задним углом [60]. Погрешности заточки исключаются, если ребро 3 пересечения плоскостей 1 и 2 каждого лезвия проходит через ось сверла. При такой заточке достаточен визуальный контроль качества. У двухплоскостной заточки есть еще одно существенное преимущество.

Поперечная кромка 4 является ломаной линией с вершиной на оси сверла. Это исключает необходимость зацентровки отверстия перед сверлением, либо применения направляющих втулок.

Вторая задача исследований решалась проведением лабораторных испытаний быстрорежущих спиральных сверл диаметром 11,0 мм по ГОСТ [56] класс точности А1. Сверлились сквозные отверстия глубиной 3d в заготовках из стали 45 190НВ. Чтобы обеспечить действенный контроль перпендикулярности оси отверстий относительно технологических баз, заготовки фрезеровались и шлифовались в двух сторон.

Осевое и радиальное биения режущих кромок сверл, установленных в шпинделе станка, измерялись микрометром часового с ценой деления 0,01 мм, закрепленном на магнитном штативе. Таким же микрометром, установленным на стойке нутромера, измерялся диаметр отверстий.

Параметры режима резания, которые использовались при проведении лабораторных исследований, представлены в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Параметры режима резания

n, об/мин	63	80	100	125	160
V, м/мин	2,18	2,76	3,45	4,32	5,53
S, мм/об	0,2	0,16	0,13	0,1	0,078
	0,25	0,2	0,16	0,13	0,1
		0,25	0,2	0,16	0,13
			0,25	0,2	0,16
				0,25	0,20
					0,25

Чтобы обеспечить такие скорости резания испытания проводились на широкоуниверсальном фрезерном станке повышенной точности модели 675П. При установке в шпиндель станка контролировались осевое и радиальное биения режущих кромок.

Первоначально были проведены испытания спиральных сверл с конической заточкой задних поверхностей по ГОСТ [60] класс точности В, у которых допуск осевое и радиальное биения режущих кромок были в пределах допусков, установленных ГОСТ [61]. Для класса точности В ГОСТом [61] для сверл диаметром св. 10 мм установлен допуск радиального биения режущих кромок 0,16 мм, и осевого – 0,3 мм.

После установки в шпиндель станка радиальное и осевое биения режущих кромок составили 0,3 мм. В таблице 8.3 представлены максимальные величины разбивки отверстий при сверлении сверлами с конической заточкой.

Таблица 8.3 – Максимальная величина разбивки отверстий при сверлении сверлами с конической заточкой

S, м/об V, м/мин	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
2,18					0,26	0,26
2,76				0,23	0,25	0,27
3,45			0,25	0,27	0,30	0,27
4,32		0,34	0,34	0,32	0,27	0,27
5,53	0,34	0,30	0,29	0,30	0,27	0,27

В таблице 8.3 видно, что при низком качестве изготовления и заточки сверл скорость резания практически не оказывает влияния на разбивку отверстий. На скоростях резания 4,32 и 5,53 м/мин наблюдается некоторое уменьшение разбивки отверстий с увеличением подачи. Причиной этого может быть большое радиальное биение режущих кромок, при котором на малых подачах сверло практически работает одним зубом и момент резания приложен на один зуб сверла. С увеличением подачи в работу вступает

второй зуб, и работа сверла несколько стабилизируется. На рисунке 8.3 показан характер зависимости разбивки отверстий от подачи при работе на скорости резания 5,53 м/мин.

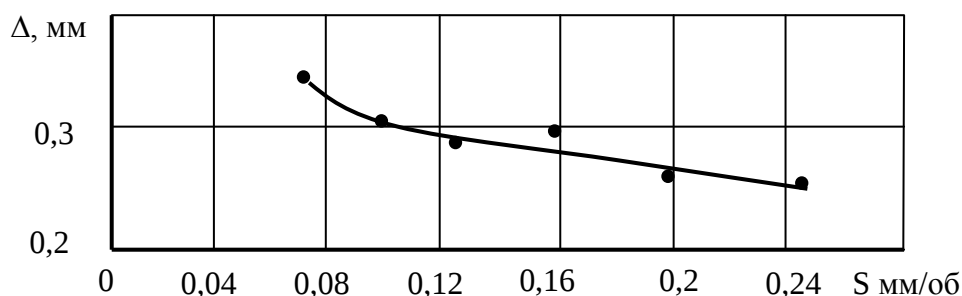


Рисунок 8.3 – Зависимость разбивки отверстия от подачи при сверлении сверлами с конической заточкой на скорости резания 5,53 м/мин

При работе сверлами с низким качеством изготовления и заточки точность отверстий не превышает 13 квалитет допуска размера отверстия.

ГОСТом [61] для сверл класса точности А1 диаметром св. 10 мм установлен допуск радиального биения режущих кромок 0,12 мм, и осевого – 0,06 мм. После установки в шпиндель станка радиальное и осевое биения режущих кромок сверл с двухплоскостной заточкой класса точности А1 составило 0,08 мм. В таблице 4 приведены величины максимальной разбивки отверстий при работе сверлами диаметром 11 мм высокого качества изготовления и заточки.

Таблица 8.4 – Максимальная величина разбивки отверстий при сверлении сверлами с двухплоскостной заточкой

S, мм/об	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
V, м/мин						
2,18					-0,01	-0,01
2,76				-0,01	-0,01	0,01
3,45			-0,01	0	0	0,02
4,32		0	0	0	0,02	0,03
5,53	0	0	0	0,02	0,04	0,05

В

таблице

8.4 видно, что при сверлении сверлами с высоким качеством изготовления и заточки разбивка отверстий значительно меньше, представленной в таблице 8.3 и лишь при работе на скорости 5,53 м/мин с подачей 0,25 мм/об превысила 9 квалитет допуска размера [57]. Характер изменения разбивки с увеличением скорости резания тоже изменился. С увеличением скорости резания разбивка отверстий значительно увеличивается (рисунок 8.4). При этом на скорости резания 4,32 м/мин качество отверстий находится в пределах 8 квалитета допуска размера. Подача также оказывает существенное влияние на разбивку отверстий, однако в отличие от результатов испытаний сверл низкого качества изготовления и заточки с увеличением подачи диаметр отверстий не уменьшается, а увеличивается (рисунок 8.5).

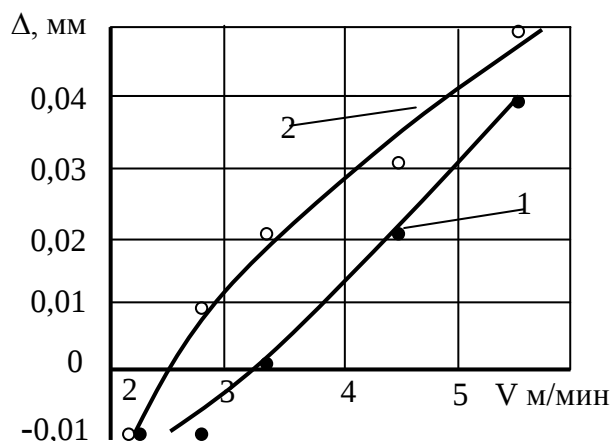


Рисунок 8.4 – Зависимость разбивки отверстий от скорости резания при сверлении сверлами с двухплоскостной заточкой: 1 – подача 0,2 мм/об, 2 – 0,25 мм/об

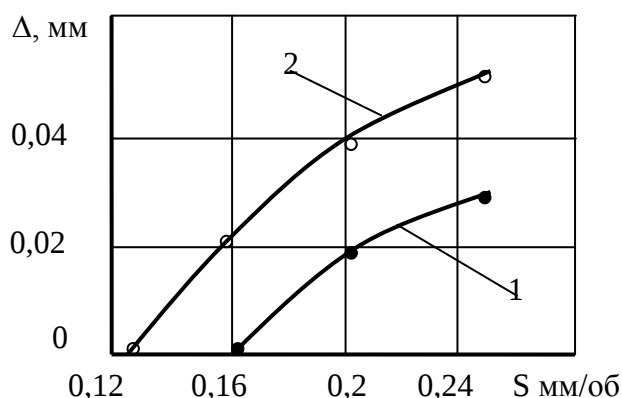


Рисунок 8.5 – Зависимость разбивки отверстий от подачи при сверлении сверлами с двухплоскостной заточкой: 1 – скорость резания 4,32 м/мин, 2 – 5,53 м/мин

В таблице 8.4 видно, что при работе на определенных скоростях резания диаметр отверстия практически равен рабочему диаметру сверла, а при работе на низких скоростях резания (2,18 - 3,45 м/мин) при определенных подачах диаметры просверленных отверстий меньше на 0,01 мм рабочего диаметра сверл. Причиной уменьшения диаметра может быть снижение температуры резания менее 200° С, как показано на рисунке 8.6 [53] при температуре менее 200° С твердость обрабатываемого материала растет. В результате этого происходит упругое последствие обрабатываемого материала после вывода сверла из отверстия.

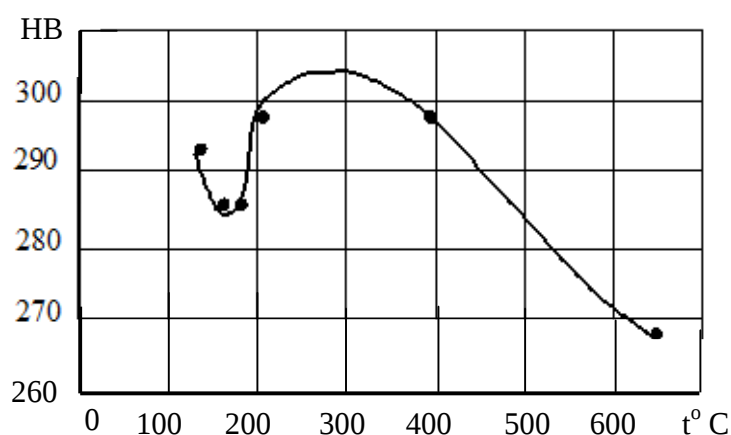


Рисунок 8.6 - Зависимость твердости (НВ) обрабатываемого материала от температуры

Уменьшение диаметра просверленного отверстия менее рабочего диаметра сверла нежелательное явление для технологии обработки отверстий, поэтому рациональными скоростями резания являются 5,53 м/мин при подачах 0,2 мм/об и меньших, и 4,32 м/мин при подачах 0,25 мм/об и меньших. На этих скоростях резания и подачах разбивка отверстий не превышает 8-9 квалитета допуска размера [57] (таблица 8.4).

В результате аппроксимации кривой 1 рисунка 4 получено уравнение

$$\Delta = 3,299 \cdot 10^{-4} V^{2,8}. \quad (8.2)$$

В таблице 8.5 представлены расчетные и фактические значения разбивки отверстий и погрешность расчетов.

Таблица 8.5 – Рассчитанные по зависимости (2) и фактические значения разбивки и погрешность расчетов

V	Δ расч.	Δ факт.	% погр.
4,32	0,0198	0,02	1,0
5,53	0,0396	0,04	1,0

В результате аппроксимации кривой 1 рисунка 8.5 получено уравнение

$$\Delta = 0,391S^{1,8475}. \quad (8.3)$$

В таблице 8.6 представлены расчетные и фактические значения разбивки отверстий и погрешность расчетов.

Таблица 8.6 – Рассчитанные по зависимости (8.3) и фактические значения разбивки и погрешность расчетов

S	Δ расч.	Δ факт.	% погр.
0,2	0,01999	0,02	0,05
0,25	0,03019	0,03	0,63

В результате несложной математической операции получена математическая модель

$$\Delta = 0,0065V^{2,8} S^{1,8475}. \quad (8.4)$$

В таблице 8.7 представлены расчетные и фактические значения разбивки отверстий и погрешность расчетов.

Таблица 8.7 – Рассчитанные по модели (8.4) и фактические значения разбивки и погрешность расчетов

V	S	Δ расч.	Δ факт.	% погр.
4,32	0,2	0,01999	0,02	0,05
4,32	0,25	0,03019	0,03	0,63
5,53	0,2	0,0399	0,04	0,25

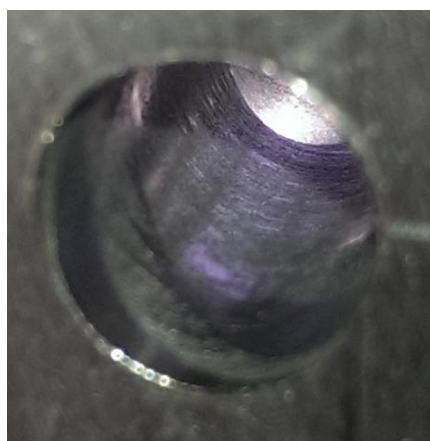
Высокое совпадение расчетных и фактических данных позволяет с

помощью модели (8.4) прогнозировать качество отверстий при варьировании параметрами режима резания, например, на скорости резания 4 м/мин при подаче 0,2 мм/об рассчитанные значения разбивки составят 0,016 мм, что соответствует 7 качеству допуска размера отверстий, обработанных точным развертыванием [57].

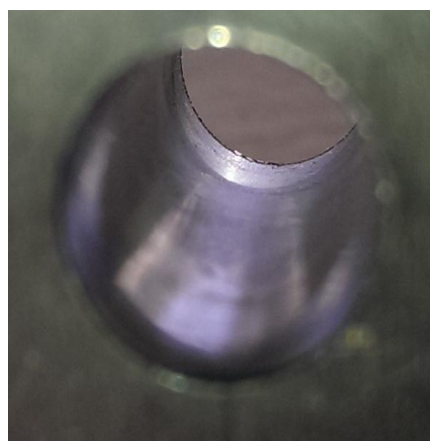
В справочнике [57] качество допуска 9 показан при обработке сверлением, зенкерованием и развертыванием, а 8 – зенкерованием и развертыванием, однако различаются шероховатость обработанной поверхности и глубина дефектного слоя.

При точном развертывании шероховатость поверхности R_a составляет от 6,3 мкм до 0,4 мкм. На рисунке 8.7 приведены фотографии обработанных поверхностей, 1 – сверлом с конической заточкой, 2 – сверлом с двухплоскостной заточкой, на скорости резания $V = 4,32$ м/мин при подаче $S = 0,2$ мм/об.

В таблице 8.8 представлена шероховатость поверхности отверстий, обработанных сверлом с двухплоскостной заточкой. Шероховатость определялась сличением с образцами шероховатости.



1



2

Рисунок 8.7 – Качество обработанных поверхностей: 1 – сверлом с конической заточкой, 2 – сверлом с двухплоскостной заточкой

Таблица 8.8 - Шероховатость поверхности отверстий Ra обработанных сверлом с двухплоскостной заточкой.

$S, \text{ мм/об}$ $V, \text{ м/мин}$	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
2,25					1,25	1,25
2,76				1,25	1,25	1,25
3,45			1,25	1,25	1,25	1,25
4,32		1,25	1,25	1,25	1,60	1,60
5,53	1,25	1,25	1,25	1,25	1,60	1,60

Как видно в таблице 8.8 на скоростях резания 4,32 и 5,53 м/мин шероховатость поверхности $Ra = 1,6$ мкм, что соответствует значению шероховатости поверхности обработанной точным развертыванием [57].

9. ЛИТЕЙНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ КАФЕДРЫ «ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ»: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

В современных условиях вузовская подготовка бакалавров и магистров машиностроителей требует все большего включения в программу прикладных и практических занятий. Отливки применяются во всех отраслях производства и развитие литейной лаборатории кафедры стало актуальной задачей. При этом в условиях простоя крупных предприятий Республики литейная лаборатория кафедры становится чуть ли не единственным местом ознакомления с технологией различных видов литья.

Общеизвестно огромное количество деталей, получаемых различными методами литья. Отрасли применения литых деталей представлены на рис. 1. Практически нет областей техники, где бы не применялись литые детали из металлических сплавов. Многообразие методов литья: от литья в песчаные формы до специальных видов литья, от литья черных металлов (чугуны, стали) до литья сплавов цветных металлов сделали технологию литья одной из основных технологий, а для ряда сложных деталей, таких как блоки цилиндров и головок блоков различных двигателей, деталей из труднообрабатываемых металлов и др. единственным способом изготовления. При этом литейное производство сегодня, сохраняя тысячелетние традиции, переживает настоящую техническую революцию, связанную с внедрением цифровых технологий, новых материалов и сплавов и технологий быстрого прототипирования. Очевидно актуальной становится изучение студентами технических специальностей азов литья металлов, проектирования и изготовления литых

деталей в лабораторных условиях. Появляется уникальная возможность для студентов и магистрантов, наряду с работой “руками” в лаборатории, проведение исследований в системе “сплав-форма” различных процессов: затвердевания отливок, гидравлических процессов при заливке расплавленных сплавов, плотности и твердости песчаных форм и др. Особо следует отметить возможность применения цифровых технологий и

технологий быстрого прототипирования, которые успешно применяются в литейной лаборатории кафедры.

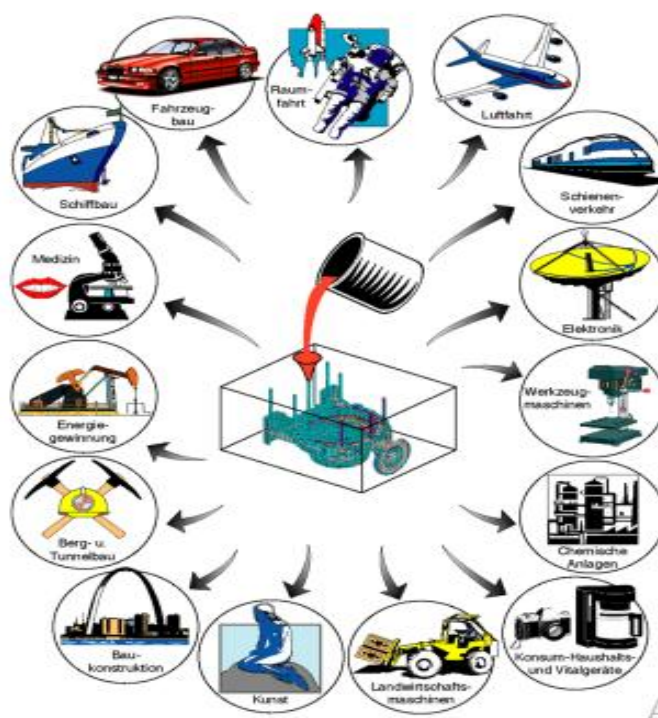


Рис. 9.1. Области применения литых деталей: Машиностроение; Авто-мото-железнодорожный транспорт; Авиация и Космос; Строительство; Металлургия; Электротехника; Судостроение; Энергетика и электроника; Химическая промышленность; Медицинская техника; Горное дело и горное машиностроение; Сельскохозяйственные машины и оборудование, Искусство и др. [62].

Литье в песчаные формы



Рис.9.2. Выполнения лабораторной работы по литью в песчаные формы.

Литьем в песчаные формы получают отливки из черных и цветных металлов весом от десятков грамм до сотен тонн. Достаточно отметить такие детали как блоки цилиндров различных двигателей внутреннего сгорания, корпуса электродвигателей, станины и корпуса станков и приборов, которые невозможно получить другими методами. В лаборатории этот метод реализуется современной лабораторной установкой, полученной по линии ДААД доц. Мухтарбек уулу Кубатом в тесном сотрудничестве с коллегами из высшей технической школы Бойдта в Берлине. На рис.9.2. студенты в литейной КГТУ лаборатории.



Рис. 9.3. Заливка литейной формы.

Литье в кокиль

Кокиль (фр. *coquille*) – металлическая форма, свободно (без давления) заполняемая расплавленным металлом. По сравнению с песчаной формой кокиль может быть использован многократно. В кокилях можно получать отливки практически из всех сплавов. Наибольшее применение имеют алюминиевые и магниевые сплавы – примерно 50 % отливок из этих сплавов получают в кокилях. Из чугуна (серого с пластинчатым или шаровидным графитом) в кокиль отливают примерно 10 % всех отливок, из стали – 5 %. В кокилях получают детали различных габаритных размеров с толщиной

стенок 3...100 мм, массой от нескольких граммов до 100 кг и выше [63]. Типичная деталь, получаемая литьем в кокиль – поршни и головки блока цилиндров авто-мото двигателей. На кафедре с 2017 года введена лабораторная установка литья в кокиль алюминиевых сплавов [64].

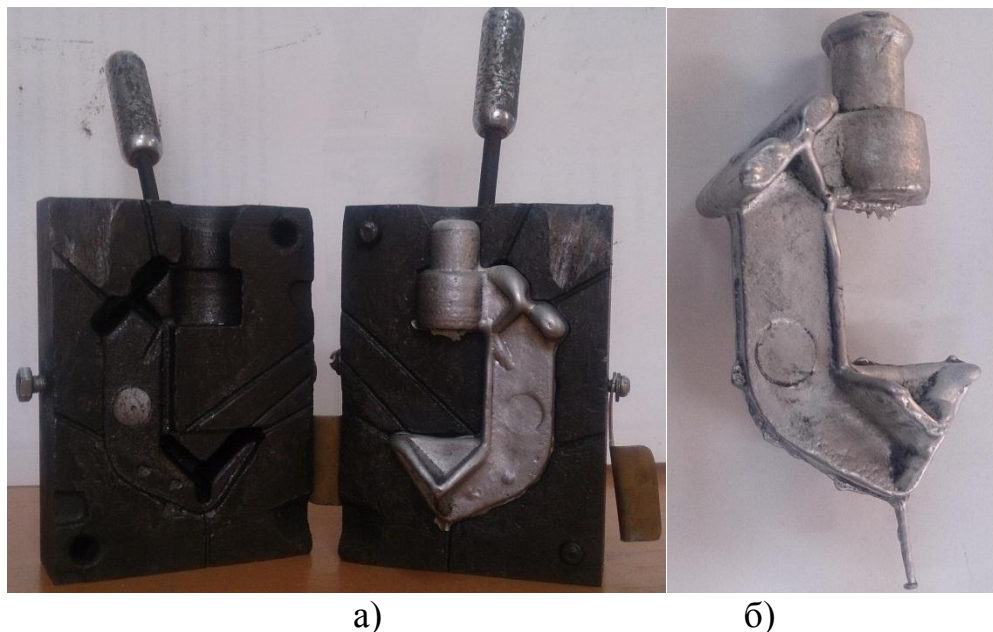


Рис. 9.4. Отливка «Скоба центрирующая» до (а) и после (б) извлечения из кокиля

Центробежное литье

Литье во вращающихся (вертикально или горизонтально) кокилях известно как центробежный способ получения отливок. Получают детали вращения – втулки, трубы из серого чугуна с пластинчатым и шаровидным графитом, стали, сплавов меди и легких металлов. Максимальный вес отливок может достигать 5 тонн. Благодаря действию центробежных сил на расплав механико – технологические свойства отливок $\approx$ на 30% выше чем при статических видах литья (например, кокильном) [65]. На кафедре с 2010 года работает спроектированная выпускниками Алымкуловым Б. и Сакибаевым Н. лабораторная установка, которая представлена на рис. 9.5. , на рис 9.6. представлена готовая отливка.

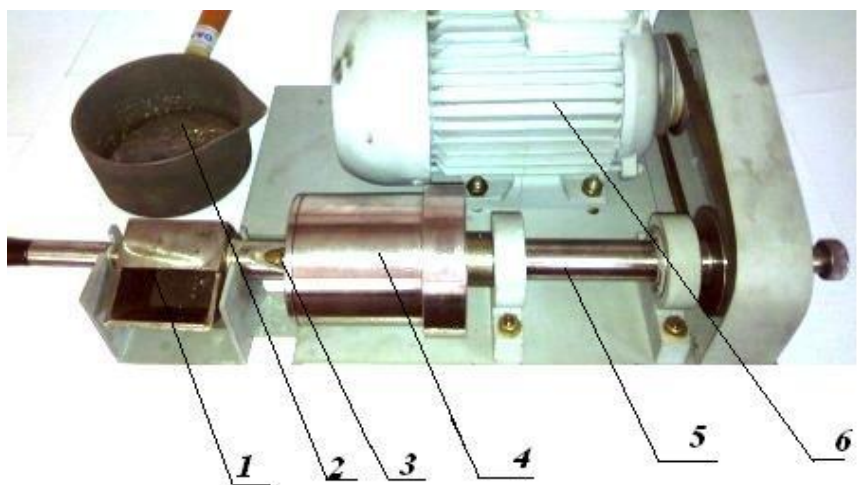


Рис. 9.5. Лабораторная установка центробежного литья: 1- заливочная труба, 2-заливочный ковш, 3- мундштук, 4- изложница, 5- трансмиссионный вал, 6 – электродвигатель.



Рис.9.6. Отливка, полученная на лабораторной установке центробежного литья.

Исследовательские проекты

В 2010-11 годах магистрант высшей технической школы Бойдта в Берлине Мамытбаева Асель выполнила свои исследования и практическую реализацию результатов в литейной лаборатории кафедры [66]. На рис. 9.7 предстала модель для литья в разовые песчаные формы для нашей лаборатории.



Рис.9.7. Предстала модель для литья в разовые песчаные формы для нашей лаборатории [66].

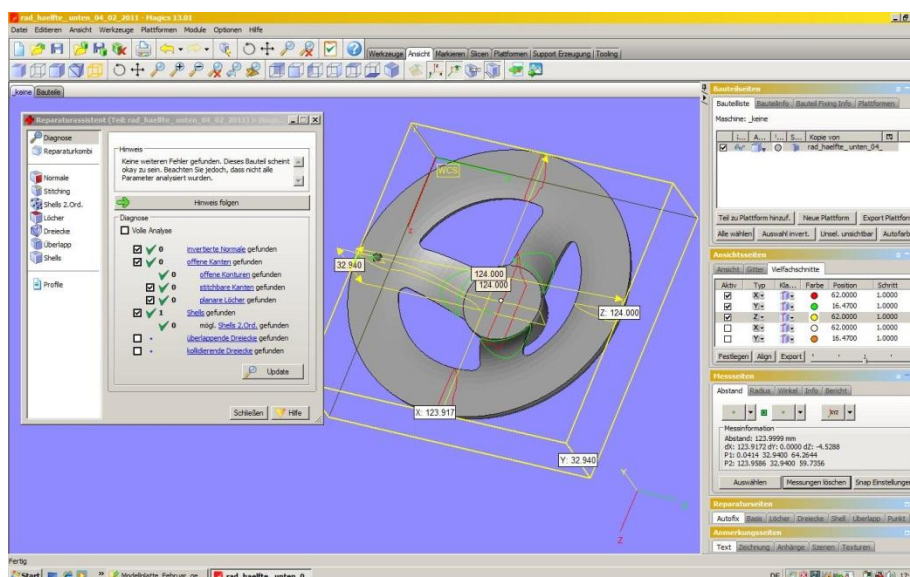


Рис. 9.8. Исследование модели отливки с программой Magics 13.0 [66].

В 2017-18 учебном году начаты работы по разработке технологических проб для определения литейных свойств сплавов, которые

будут доведены до практической реализации . Также в этом году планируется завершение опытов по созданию лабораторной установки литья по выплавляемым моделям. На рис 9.9 представлены модельная оснастка, представленная проф. М. Паашем из высшей технической школы Бойдта в Берлине.



Рис.9.9.Модельная оснастка для изготовления литейной восковой модели.

На рис.10 показана парафин-стеариновая выплавляемая модель, выполненная в литейной лаборатории студентами Колбаевым А. и Макеновой А.



Рис.9.10. Парафин-стеариновая выплавляемая модель.

Заклучение и перспективы

Поставленное в 2015 году по линии сотрудничества с высшей технической школой Бойдта в Берлине 3Д принтер с комплектующими позволили выполнить современные исследования и работы и в литейной лаборатории. Рис. 9.11, 9.12, 9.13 представлены примеры работ студентов.



Рис. 9.11. Распечатка модели детали “Звездочка” на 3D принтере.

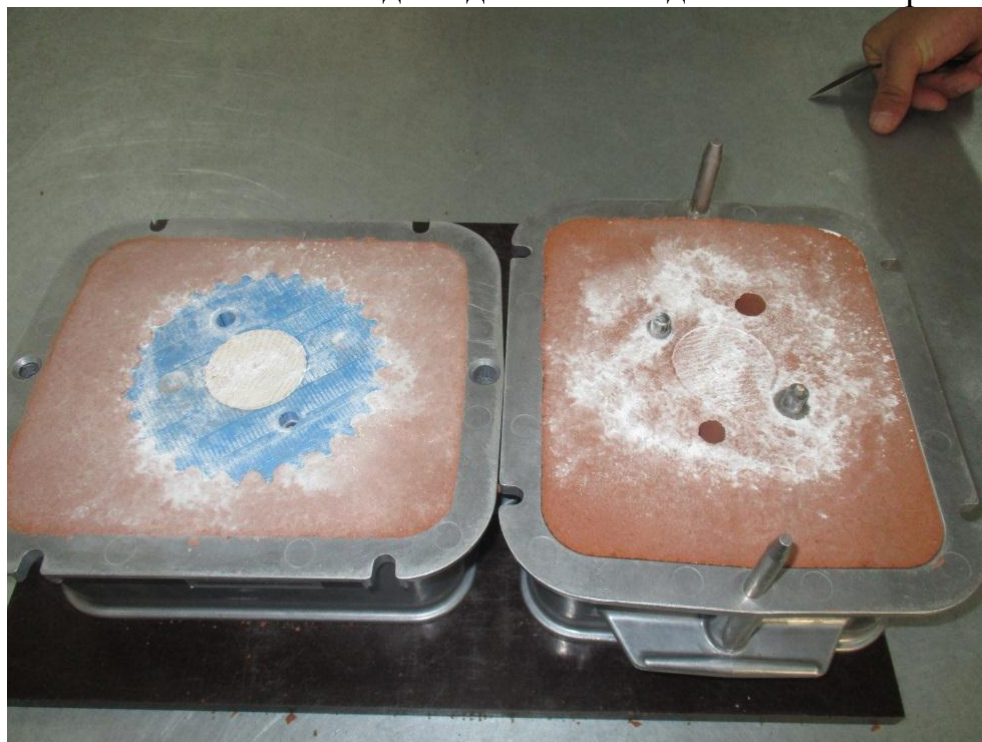


Рис. 9.12. Формовка детали “Звездочка”.



Рис.9.13. Отливка детали “Звездочка”.

В этом году ожидается оборудование-грант бывших стипендиантов ДААД – доц. Мухтарбек уулу Кубата и доц. Мамбеталиева Т. С. Это CNC фрезерная машина, 3Д принтер, 3Д Сканер, Электронный измерительный стол, комплектующие и управляющий РС. Они позволят реализовать и в литейной лаборатории совместный с коллегами из высшей технической школы Бойдта в Берлине проект цифровой реализации “От идеи до готового продукта”.

10. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ СВАРОЧНЫЕ РЕЖИМЫ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА (AL-MG) 5083 ПРИ СВАРКЕ СМТ.

Проведены сравнительные исследования по режимам сварки алюминиевых сплавов (Al-Mg) марки 5083 с разными подачами проволоки параметрами для выбора режимов сварки в среде защитного газа МИГ, а именно новейшего метода сварки СМТ.

Упрочняемым алюминиевым сплавам относятся 6000 сплавы Al-Mg-Si, и не упрочняемым термической обработкой относят 5000 Al-Mg сплавы. Сплавы 6xxx-групп имеют широкое применение, особенно в строительстве, авиационной и автомобильной промышленности [67]. В работе [68] рассматриваются материалы 5083 и 6082, как представители алюминиевых сплавов, которые хорошо свариваются лазерной сваркой. Способами сварки достигают приемлемых прочностей сваркой с малой теплотой, таким образом, меньшее влияние на микроструктуру, базовые материалы подвергаются уменьшенным искажениям [69].

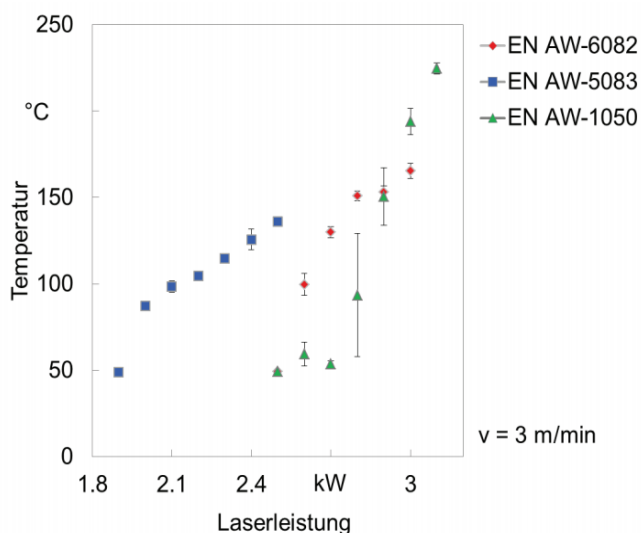


Рис. 10.1. Температура на поверхности, обращенной от лазера [68]

Из рис. 10.1 источника [68] следует, что результаты показывают, что сплав EN AW-5083 достигает тех же температур при более низких уровнях мощности, чем сплавы EN AW-6082 и EN AW-1050 при мощности лазера.

Дальнейшее увеличение мощности приводит к линейному повышению температуры. Из работы [71] известно, что, сплав EN AW6082 является одним из алюминиево-магниево-кремниевых сплавов и обладает очень хорошей свариваемостью, но его прочность снижается в зоне сварки. Алюминиево-магниевые сплавы представляют собой сплавы без термической обработки, которые обеспечивают хорошие механические свойства, коррозионной стойкости, хорошей обрабатываемости и свариваемости [70]. Во многих исследованиях основное внимание уделялось сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов, и хорошо известно, что некоторые из алюминиевых сплавов не могут быть сварены методом сварки плавлением. Воздействие повышенных температур выше 150°C для сплавов 6082 и 250°C для 5083-H116 в течение любого периода времени приводит к изменению механических свойств как для алюминиевых сплавов 5083, так и 6082 [68]. Для обеих пластин 5083-H116 минимальное значение остаточного предела текучести происходит при 500 °C. Было обнаружено, что избыток Si ($Mg / Si > 1,73$) оказывает отрицательное влияние на пластичность сплавов Al-Mg-Si без наличия дополнительных легирующих элементов [73]. AA6XXX и AA5XXX виды алюминиевых сплавов, наиболее широко применяемые в сварочной области [73, 74]. В алюминиевых сплавах 6xxx группы образуют внутри интерметаллические частицы, которые образуются во время затвердевания. Легирующие элементы как Fe, Mn и Cr вызывают формирование нового фазового компонента [67]. Алюминий 5083 характеризуется хорошей свариваемостью, отличной коррозионной стойкостью и умеренной прочностью [75]. Алюминиевые сплавы с числом «6» в качестве первой цифры в обозначении сплава легируются комбинацией магния и кремния. Магний и кремний объединяются с образованием силиката магния (Mg_2Si), который, в свою очередь, образует простую эвтектическую систему с алюминием.

Материалы и методика экспериментов. Сварочные работы на сплаве Al-Mg 5083 были выполнены на установке Института сварки и

разделительных технологий металлов (ISAF TU Clausthal, Germany) с использованием сварочной установки CMT (рис.10.1), которая позволяет провести сварку/наплавку металлических материалов как в режиме CMT так и в режиме CMT Impuls. В данной работе были использованы в качестве основного свариваемого материала листы алюминиевого сплава (Al-Mg) марки 5083 с толщиной 2 мм и в качестве сварочной проволоки AW-ALMg 4,5 марки 5087 с диаметром 1,2 мм. В таблице 1 приведены химические составы основного материала и сварочной проволоки.

Табл. 10.1. Химический состав основного металла и сварочной проволоки
(масс %)

Таблица 10.1

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
AlMg4,5 5083	0,40	0,40	0,10	0,40-1,0	4,0-4,9	0,05-0,25	0,25	0,15	-
AW-ALMg 4,5 5087	0,25	0,40	0,05	0,9	4,9	0,15	0,25	0,15	0,15

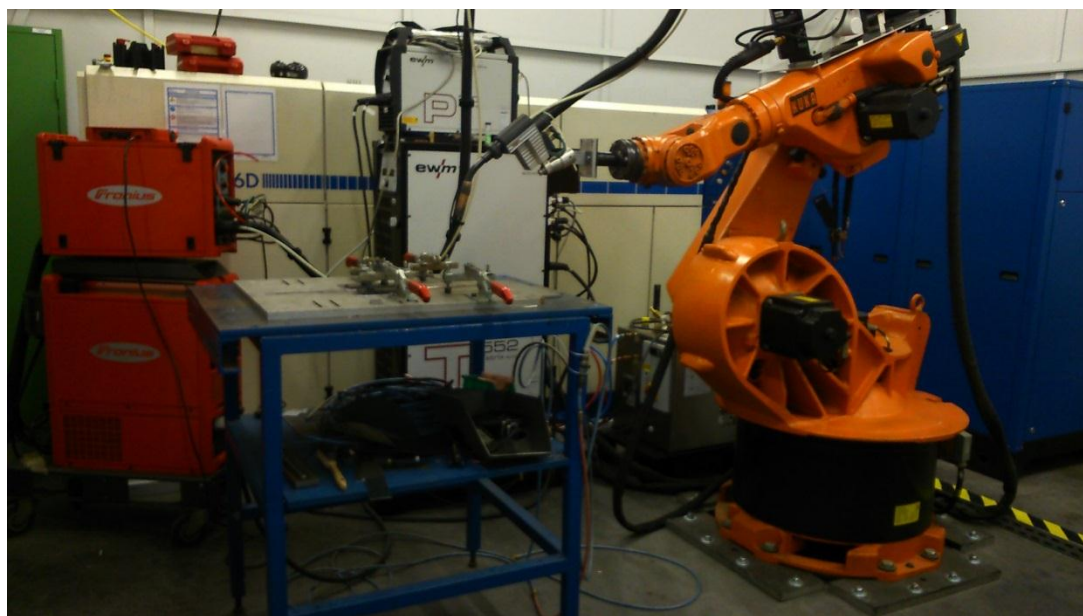


Рис.10.1. Сварочная установка ISAF с техникой CMT

В качестве защитного газа был применен Varigon HE 30 (He 30%+Ar 70%) с объемом потребления 15 л/мин. Способ сварки CMT. Параметры процесса сварки приведены в таблице.2.

Табл. 10.2. Параметры сварки и технологии для сварочных работ.

Таблица 10.2

№	Скорость подачи проволоки [м/мин]	Скорость сварки [м/мин]
1	4	0,4

На рис.10.2 показаны сварочные работы, полученные в соответствии со сварочно-технологическими параметрами из табл.10.2. Из параметров можно отметить, что, варьируя скоростью подачи проволоки, был выбран режим для сплава 5083. Остальные параметры не изменялись. Микроанализ сплава (рис.10.2 а,b).



Рис.10.2. Микроанализ сплава 5083

Рекомендуется подача проволоки 4м/мин. Благодаря меньшей энергии, вносимой в поверхность металла во время сварки СМТ процесса, формируется ровный сварочный шов без брызг.

Благодарность:

Автор выражает благодарность Высшей школе им. Бойта (Beuth Hochschule) для поддержки в проведении данного исследования.

11. A MATHEMATICAL MODEL FOR TOP NUTATION BASED ON INERTIAL FORCES OF DISTRIBUTED MASSES

The main property of gyroscopic devices is maintaining the axis of a spinning rotor, a mathematical model formulated on the principle of the change in the angular momentum. This principle is used for mathematical modeling of the motions of a top at known publications. Nevertheless, practical tests of gyroscopic devices do not correspond to this analytical approach. Recent investigations have demonstrated that the origin of gyroscope properties is more complex than that represented in known publications. The applied torque on a gyroscope produces internal torques of the spinning rotor based on the action of the several inertial forces. These forces are the centrifugal, Coriolis, and common inertial forces as well as the change in the angular momentum generated by the mass elements and center-mass of the spinning rotor. The action of these torques manifests itself in the resistance and precession torques of the gyroscopic devices. These inertial torques act simultaneously and interdependently around two axes and represent the fundamental principles of the gyroscope theory. The new inertial torques enable deriving mathematical models for the motions of well-known top that is the simplest form of gyroscopic devices. The novelty of the work is mathematical models for the motions of the top based on action of eight inertial forces acting around its two axes. The obtained mathematical models for the top nutation and self-stabilization are represented in terms of machine dynamics and vibration analysis. The new analytical approach for motions of the well-balanced top and top with eccentricity of the center-mass definitely responds to the practical results

1. Introduction

L. Euler first laid out the mathematical foundations for the gyroscope theory in his work on the dynamics of rigid bodies back in 1765. Since Industrial Revolution time, I. Newton, J.-L. Lagrange, L. Poinsot, J. L. R. D'Alembert, P.-S. Laplace, L. Foucault, and other brilliant scientists have investigated, developed, and added new interpretations of the gyroscope effects, which are in full display in the rotor's persistence in maintaining its plane of rotation. The applied theory of gyroscopes emerged mainly in the twentieth century in numerous publications that described the gyroscope effects [1]. The gyroscope properties feature many engineering mechanisms and devices with rotating parts, which thus need to be computed for their proper functioning [2, 3]. Gyroscope effects are used in numerous gyroscopic devices in aerospace engineering, as well as on ships and other industries [4, 5]. The most basic textbooks of classical mechanics have chapters on the gyroscope theory [6, 7] and consider motions with

vibrations analysis [8]. Numerous and valuable publications have dedicated themselves to gyroscope effects and their applications in engineering [9–12]. Intuitively and without mathematical models, some researchers have noted that, on a gyroscope, the inertial forces that manifest the gyroscope effects are acting. However, in known publications, mathematical models for the gyroscope effects do not seem to match their practical applications in gyroscopic devices [13–17]. Therefore, researches have spawned artificial terms such as gyroscope resistance and gyroscope couple, as well as fantastical properties that contradict rules of classical mechanics. It is for this reason that the gyroscope theory still attracts many researchers who seek to discover true gyroscope theory [16, 18].

Mechanically, a gyroscope is a spinning disc in which the axle is free to assume any orientation. The simplest gyroscope is represented by a top toy that is one of the most remarkable and widely recognized toys in the world. They still attract attention through their astonishing behavior and

TABLE 1: Internal torques acting on a gyroscope.

Type of a torque generated by	Equation (N·m)
Centrifugal forces, $T_{ct,i}$	$T_{ct,i} = T_{in,i} = 2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 J \omega \omega_i$
Inertial forces, $T_{in,i}$	
Coriolis forces, $T_{cr,i}$	$T_{cr,i} = \left(\frac{8}{9} \right) J \omega \omega_i$
Change in an angular momentum, $T_{am,i}$	$T_{am,i} = J \omega \omega_i$
Resistance torque, $T_{r,i} = T_{ct,i} + T_{cr,i}$	$T_{r,i} = \left[2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 + \frac{8}{9} \right] J \omega \omega_i$
Precession torque, $T_{p,i} = T_{in,i} + T_{am,i}$	$T_{p,i} = \left[2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 + 1 \right] J \omega \omega_i$

unusual gyroscopic properties. The motions of top toy have been described analytically in numerous publications and with complex numerical modeling [19] based on Lagrangian dynamics on Euler coordinates that are solved with computer software [20].

However, all publications contain approximations, assumptions, and simplifications and explain gyroscope effects by the physical principle of the spinning rotor's angular momentum that generates the precession torque and motions. Gyroscope effects still represent a problem that remains to be solved. The origin of gyroscope effects is more complex than those represented in the theories known to date. Recent investigations into the physical principles of gyroscope motions demonstrate four classical inertial forces acting upon a spinning rotor to generate the gyroscope effects. Research shows that centrifugal, common inertial, and Coriolis forces, in addition to change in the angular momentum of spinning rotors, are the basis for all gyroscope effects and properties [21–24]. Applied to the gyroscope, an external torque generates several torques based on the action of the aforementioned forces. In turn, the centrifugal and Coriolis forces of the rotating mass elements generate a resistance torque that counteracts the inclination of the rotor's location. Common inertial forces, rotating mass elements, and change in the angular momentum of a spinning rotor generate a precession torque. All torques are interrelated and occur simultaneously. New mathematical models for acting torques accurately describe the physics of gyroscope effects and are validated by tests [21]. Table 1 represents four different torques generated by the inertial forces of the mass elements and center-mass of the spinning rotor under the action of the external torque that was applied to the gyroscope. The action of these torques should be considered for mathematical models of the gyroscopic devices and the top's motions and nutation.

In Table 1, $T_{r,i}$ is a resistance torque generated by the centrifugal ($T_{ct,i}$) and Coriolis ($T_{cr,i}$) forces acting around axis i ; $J = (mR^2/2)$ is the mass moment of inertia of the disc around axis ox or oy [6]; $T_{p,i}$ is a precession torque generated by the common inertial forces ($T_{in,i}$) and change in the angular momentum ($T_{am,i}$) acting around axis i ; and ω is the angular velocity of a spinning rotor.

When applied to a gyroscope, an external torque generates angular velocities of precessions around two axes and activates simultaneously and interdependently eight internal torques. The equations of these torques (Table 1) demonstrate

that the centrifugal, common inertial, and Coriolis forces of the spinning rotor are real active physical components, just like the change in the angular momentum. The new equations for the internal torques demonstrate their proportional dependence on a rotor's mass moment of inertia and angular velocity of the spinning rotor, as well as on the angular velocity of its precession. New mathematical models for these torques clearly describe the physics of gyroscope properties and explain the unusual motions of gyroscopic devices. The aim of this paper is to represent mathematical models for the motions of the well-balanced top and with its eccentricity of the center-mass. This analytical approach is based on the action of centrifugal, common inertial, and Coriolis forces as well as the change in the angular momentum generated by the mass elements and center-mass of a spinning rotor. New mathematical model for the top motions describes the physics of forces acting on the top and its motions that represents the novelty of the work. The obtained mathematical models for top nutation and self-stabilization are represented in terms of machine dynamics and vibration analysis.

2. Materials and Methods

The new mathematical models for gyroscope motions will consider the simultaneous and interdependent actions of internal torques (Table 1). The external load torque generates eight internal resistance and precession torques acting around two axes and reveals new gyroscope properties [21]. The interdependent action of internal torques is used to model the behavior of different gyroscopic devices, including the simplest top.

Observation of a fast-spinning top shows that it preserves the vertical position of the axis, remains steady on the supporting pivot, and avoids tilting or falling to the ground. If the axis of a spinning top toy is inclined from the vertical axis under the action of an external torque, the axis starts to describe the vertical circular cone of the precessed motion. Then the spinning top stabilizes itself and its spin axis goes to a vertical position.

However, the axis of a spinning top has free oscillation of the periodic complex motion, which is called nutation, and reveals itself as fast shivering of the precessing axis. This phenomenon of the top's gyroscope nutation represents small but fast oscillations of the spinning rotor's axis at about its mean position. The nature of gyroscope nutation is represented by the following sources: the center-mass is displaced from the axis of rotation, the shocked displacement of the center-mass is generated by the action of an external force and the imperfect surface geometry of the tip of the top's leg, and so forth.

The action of the center-mass, having been displaced from the spinning top, represents the continuing existence of a disturbing force that generates a forced oscillation. Any free oscillation of the spinning top is connected with an angular acceleration that eventually ceases because of a loss of energy. The amplitudes of free oscillated motions are very small in the case of a rapidly rotating top. Because of the inevitable presence of resistances, these oscillations for a

well-balanced top toy are subject to asymptotically rapid decay. In most cases, the nutation of a well-balanced top toy is quickly damped by the action of inertial resistance forces and friction forces in the bearing, leaving uniform precession.

Gyroscopes with a high angular velocity represent over-damped or critically damped systems according to the theory of vibration [8]. This makes it possible to neglect nutation in solving most engineering problems and to formulate a gyroscope theory that takes into account only the precessions. However, for a gyroscope with low angular velocity, nutation is a regular process and represents a simple damped system.

The nutation process of the top can be considered in terms of machine dynamics, particularly in terms of vibration analysis [8]. The acting forces on the top are its weight and the force generated by centrifugal forces of the top toy's center-mass, torques generated by the inertial forces of the rotating mass elements, and change in the angular momentum. The simulation of a free nutation process is presented by modeling it with a damping process and energy losses in the oscillation of a not so well-balanced spinning top.

Vibration analysis often takes into account the energy losses by means of a single factor called the damping factor. The nutation model of the spinning top consists of a not so well-balanced mass and a damper that represents the action of the top's weight and several internal torques. In the case of a gyroscope's free nutation process, the action of the single shock type torque on a spinning top toy represents one period of an oscillation with a short time for a single cycle. The damping resistance torques decay the action of one shock torque, resulting in the inclination of only the spinning top's axis. For well-balanced gyroscopic devices and a top with high angular velocities, the process of the damped oscillation is not displayed.

For a top that possesses an eccentric rotating mass, that is, the center-mass being displaced on some small distance from the top's axis, nutation is a regular process. The centrifugal force of the offset mass is asymmetric, which causes an angular displacement of the top's shaft. The spinning top toy is constantly being displaced and moved by these asymmetric forces. The eccentric rotating mass of the top represents harmonic nutation, which means that the top is forced to nutate at the frequency of excitation [8]. A plot using the nutation amplitude along one axis and the forcing frequency along the other axis is then described as a performance or response curve for the system. The eccentric rotation of the mass at about the top's axis is modeled as a sinusoidal wave, as shown in Figure 1. Here, the function $y = e \sin \alpha$ denotes the displacement of the eccentric mass that represents the excitation input, where e is the eccentricity of mass location. The frequency of this sine wave is also the frequency at which nutation occurs.

The analysis of a gyroscope motions and nutation is conducted using the example of a top that is not well balanced and is thus tilted (Figure 2). The motions of the spinning top are considered at around the point of support O . If the axis of a top is adjusted on the angle γ to the horizontal position and released, then, under the influence of the force of gravity, its axis should tilt in the direction of the action of this force.

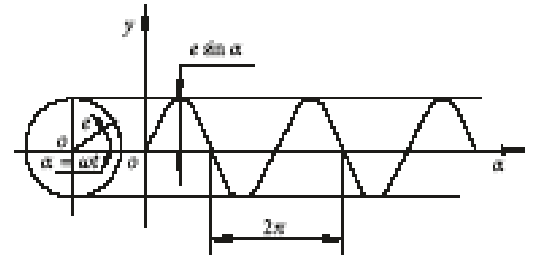


FIGURE 1: The position of a top's eccentric motion according to sinusoidal law.

As a result, the top's axis will begin to precess at about the vertical and horizontal positions. The precessions of the top are also accompanied by visually undetectable nutational oscillations, which decay rapidly according to the action of the internal torques. Because of the internal torques' resistance forces, the proper rotation of the top gradually slows down, while the precession velocities correspondingly increase. When the angular velocity of the top becomes smaller, the resistance forces of the internal torques become weaker, and the top becomes unstable and falls. In the case of a slowly rotating top, the nutational oscillations are noticeable and manifest a substantial change in the pattern of the top toy's axial movement. In this case, the end of the top's axis can describe a clearly visible wavy or looped curve alternately departing from the vertical position. In the case of a highly rotating top, the nutational oscillations can decrease and manifest the stabilization of the top's axial movement. The top's axis can approach the vertical position.

The motions of a not so well-balanced spinning top are complex. The equation of nutation is formulated by the action of several forces on the top. These forces represent the top's weight, the centrifugal forces of eccentric mass and center-mass, the centrifugal and Coriolis forces generated by the rotating mass elements, the common inertial forces, and the rate of change in the angular momentum of the spinning toy. These forces produce the torques acting on the top. These are demonstrated in Figure 2 and formulated by the equations presented in Table 1.

The centrifugal force of the eccentric mass generates the variable torque represented by the following equation [7]:

$$T_{ex} = \pm F * l = \pm m e \omega^2 l \sin \alpha \quad \text{by axis } ox, \quad (1)$$

$$T_{ey} = \pm F * l = \pm m e \omega^2 l \cos \gamma \cos \alpha \quad \text{by axis } oy, \quad (2)$$

where $F = m e \omega^2$ is the centrifugal force generated by the rotated eccentric mass m , l is the length of the top's leg, γ is the tilt angle of the top's axis, α is the angle that should be used for calculating the maximum magnitude, and T_{ex} and T_{ey} are the torques acting around axes ox and oy , respectively.

The weight of a top generates torque, for which the equation is as follows: $T = W * l = m g l \cos \gamma$. T_{cmoy} is the torque generated by the centrifugal force of the rotating top's center-mass m around axis oy . Other acting torques are presented in Table 1.

The parameters defined above allow for the formulation of a mathematical model for a top's motion around axes ox

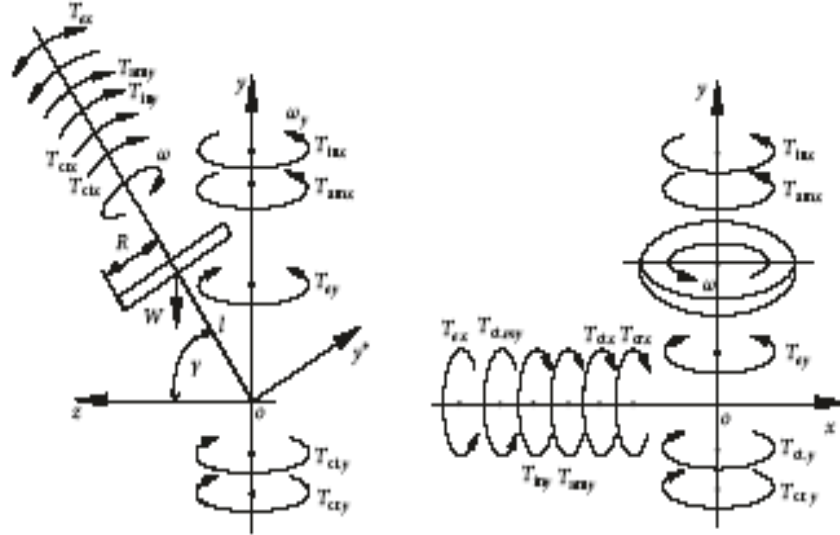


FIGURE 2: Forces acting on a spinning top.

and oy in Euler's form. The torques acting on the top are similar to torques acting on the gyroscope suspended from a flexible cord [22, 23]. Both models consider the gyroscope with one-side support to be equal except for the added torque generated by the centrifugal force of the eccentric rotating center-mass. As such, the mathematical model for a top's motion around axes ox and oy is represented by the following system of equations:

$$J_x \frac{d\omega_x}{dt} = T + T_{c,ayy} \pm T_{ax} - T_{cx} - T_{cyy} - T_{iny} \cos \gamma - T_{amy} \cos \gamma, \quad (3)$$

$$J_y \frac{d\omega_y}{dt} = (\pm T_{ey} + T_{inx} + T_{amx} - T_{cxy} - T_{cry}) \cos \gamma, \quad (4)$$

where $J_i = (mR^2/4) + ml^2$ is the top's mass moment of inertia around axis i [6], while the sign $(\pm)$ denotes $(+)$ and $(-)$ as the positive and negative directions of the action, respectively, for the torque generated by the eccentric mass.

The torques generated by the centrifugal forces of the rotating top's center-mass around axis oy are defined by the following equation:

$$T_{c,ayy} = F_{c,ayy} l \sin \gamma = ml \cos \gamma \omega_y^2 l \sin \gamma = ml^2 \cos \gamma \sin \gamma \omega_y^2, \quad (5)$$

where $F_{c,ayy} = ml \cos \gamma \omega_y^2$ is the centrifugal force of the top's center-mass rotating around axis oy and ω_y is the angular velocity of the top around axis oy ; the other components are as specified above.

The methodology towards a solution for (3) and (4) by adding the ratio of the angular velocities of a gyroscope around axes $\omega_y = f(\omega_x)$ is presented in Usabamatov [22, 23]. Substituting the defined parameters (1), (2), and (5) and

Table 1) into (3) and (4), transformation yields the equations of the top's motions as follows:

$$J_x \frac{d\omega_x}{dt} = mgl \cos \gamma + ml^2 \sin \gamma \cos \gamma \omega_y^2 \pm me\omega^2 l \sin \alpha - \left[2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 + \frac{8}{9} \right] J \omega \omega_x - J \omega \omega_y \cos \gamma, \quad (6)$$

$$J_y \frac{d\omega_y}{dt} = \left[\pm me\omega^2 l \cos \alpha + \left[2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 + 1 \right] J \omega \omega_x - \frac{8}{9} J \omega \omega_y \right] \cos \gamma, \quad (7)$$

$$\omega_y = - \left(\frac{2\pi^2 + 8}{\cos \gamma} + 2\pi^2 + 9 \right) \omega_x, \quad (8)$$

where all parameters are as specified above.

Solving (6), (7), and (8) yields the maximum and minimum angular precessions ω_x and ω_y which allow for defining the nutation amplitudes around axes ox and oy , respectively. Changes in the angular velocities of precessions around two axes make it possible to depict the trajectory of a top's center-mass nutation. The mathematical model for the motions of a tilted top is derived from (6), (7), and (8). Substituting the expression ω_y from (8) into (6), transformation yields the following equation:

$$J_x \frac{d\omega_x}{dt} = mgl \cos \gamma + ml^2 \tan \gamma (2\pi^2 + 8 + [2\pi^2 + 9] \cos \gamma) \omega_x^2 \pm me\omega^2 l \sin \alpha - \left[2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 + \frac{8}{9} \right] J \omega \omega_x - (2\pi^2 + 8 + [2\pi^2 + 9] \cos \gamma) J \omega \omega_x, \quad (9)$$

where all parameters are as specified above.

TABLE 2: Technical data of a top.

Parameter	Data
Angular velocity, ω	2000 rpm
Radius of the disc, R	0.025 m
Length of the leg, l	0.02 m
Eccentricity of the centre mass, e	0.0001 m
Angle of tilt, γ	75.0°
Weight, W	0.02 kg
Mass moment of inertia, kgm^2	
Around axis oz , $J = mR^2/2$	0.625×10^{-5}
Around axes ox and oy of the centre mass, $J = mR^2/4$	0.3125×10^{-5}
Around axes ox and oy at the point of support, $J_x = J_y = mR^2/4 + ml^2$	1.1125×10^{-5}

Self-Stabilization. The practical observation of a tilted, well-balanced spinning top with a high angular velocity proves its capacity for self-stabilization. The axis of the tilted spinning top goes to the vertical position by the action of the internal torques, whose magnitudes are bigger than torques generated by the top's weight. The necessary condition for a top's self-stabilization is formulated in the following approaches. The expression of the variable torque generated by the eccentric mass is omitted from (9). The torques generated by the top's weight and by the centrifugal forces of the rotating top's center-mass around axis oy are acting in an anticlockwise direction. By contrast, the torques based on the action of the centrifugal and Coriolis forces as well as the factored change in the angular momentum are acting in a clockwise direction. The torques acting in a clockwise direction account for the self-stabilization of the top, as expressed in the following equation:

$$\begin{aligned}
 & ml \left\{ g \cos \gamma + l \tan \gamma \left(2\pi^2 + 8 + [2\pi^2 + 9] \cos \gamma \right) \omega_x^2 \right\} \\
 &= \left[2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 + \frac{8}{9} \right] J \omega \omega_x \\
 &+ (2\pi^2 + 8 + [2\pi^2 + 9] \cos \gamma) J \omega \omega_x.
 \end{aligned} \quad (10)$$

Analysis of (10) shows that equilibrium of the acting torques depends on two main components, that is, the angular velocity of the top and the angle of its inclination. The angular velocity of precession depends on the first one. The stabilization process is intensive when the radius of gyration and angular velocity of spinning both have big value in addition to the length of the top's leg being short, that is, the center-mass of the top is located towards the lower part. These components explain the unstable spinning of a top and other spinning objects with a long leg and small radius. This property is confirmed by ordinary tests. A detailed analysis of (10) demonstrates that the magnitude of its right component is always bigger than its left one except for the very low value of the top's angular velocity that does not support its rotation. This top property is validated by practical observation. The low critical angular velocity of the top, which leads to a loss of self-stabilization, is defined when both the right and left sides of (10) are equal.

3. Working Example

The example considers the nutation process of a disc-type top whose data is presented in Table 2, whose formulas of the mass moment of inertia are represented in Hibbeler [6]. The center-mass of the top is located at the plane of the disc (Figure 2). The top initially possesses a displaced mass, while spinning around a vertical axis is conducted with nutation.

The torque generated by the top's weight is as follows:

$$\begin{aligned}
 T &= mg l \cos \gamma = 0.02 \times 9.81 \times 0.02 \cos 75.0^\circ \\
 &= 1.015605932 \times 10^{-3} \text{ Nm}.
 \end{aligned} \quad (11)$$

The torque generated by the centrifugal force of the top's center-mass rotation around axis oy is as follows:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{cm}y} &= ml \cos \gamma \omega_y^2 l \sin \gamma \\
 &= 0.02 \times 0.02 \times \cos 75^\circ \\
 &\times \left(\frac{2\pi^2 + 8}{\cos 75^\circ} + 2\pi^2 + 9 \right) \omega_x^2 0.02 \sin 75^\circ \\
 &= 0.036945927 \omega_x^2 \text{ Nm}.
 \end{aligned} \quad (12)$$

The maximal torque generated by the centrifugal forces of the eccentric rotating center-mass around axis ox is as follows:

$$\begin{aligned}
 T_{\text{ex}} &= me \omega^2 l \sin \alpha \\
 &= \pm 0.02 \times 0.0001 \times \left(2000 \times \frac{2\pi}{60} \right)^2 0.02 \sin 90.0^\circ \\
 &= \pm 1.752817777 \times 10^{-3} \text{ Nm},
 \end{aligned} \quad (13)$$

where all parameters are as specified above.

Substituting the defined parameters (Table 2, (11), (12)) into (9), transformation yields the following differential equation:

$$\begin{aligned}
 1.1125 \times 10^{-5} \frac{d\omega_x}{dt} &= 1.015605932 \times 10^{-3} \\
 &+ 0.036945927 \omega_x^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \pm 1.752817777 \times 10^{-3} \\
& - \left[2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 + \frac{8}{9} \right] \times 0.625 \\
& \times 10^{-5} \times 2000 \left(\frac{2\pi}{60} \right) \omega_x \\
& - (2\pi^2 + 8 + [2\pi^2 + 9] \cos 75^\circ) \\
& \times 0.625 \times 10^{-5} \\
& \times 2000 \left(\frac{2\pi}{60} \right) \omega_x.
\end{aligned} \tag{14}$$

Simplification and transformation of (14) yield the following equation:

$$\begin{aligned}
& 3.011157318 \times 10^{-4} \frac{d\omega_x}{dt} \\
& = 0.027488981 \pm 0.047442787 - 1.354853169\omega_x \\
& + \omega_x^2.
\end{aligned} \tag{15}$$

Separation of variables and transformation for the differential equation (15) yield the following expression:

$$\begin{aligned}
& \frac{d\omega_x}{\omega_x^2 - 1.354853169\omega_x + 0.027488981 \pm 0.047442787} \\
& = 3320.982248327 dt.
\end{aligned} \tag{16}$$

The denominator on the left side of (16) is represented by an equation with a known solution:

$$\omega_x^2 - a\omega_x + b = 0, \tag{17}$$

where the solutions are $\omega_x = a/2 \pm \sqrt{(a/2)^2 - b}$ and yield the following results: $a = 1.354853169$, $b = 0.047442787(0.579413283 \pm 1)$.

Substituting the new expressions into (16) and then converting to integral forms with definite limits yield the following expression:

$$\begin{aligned}
& \int_0^{\omega_x} \frac{d\omega_x}{(\omega_x - a/2 + \sqrt{(a/2)^2 - b}) \times (\omega_x - a/2 - \sqrt{(a/2)^2 - b})} \\
& = 3320.982248327 \int_0^t dt.
\end{aligned} \tag{18}$$

Integral equation (18) is transformed and represented by the following equation:

$$- \frac{1}{2\sqrt{(a/2)^2 - b}} \int_0^{\omega_x} \left[\frac{1}{(\omega_x - a/2 + \sqrt{(a/2)^2 - b})} \right.$$

$$\begin{aligned}
& \left. - \frac{1}{(\omega_x - a/2 - \sqrt{(a/2)^2 - b})} \right] d\omega_x \\
& = 3320.982248327 \int_0^t dt.
\end{aligned} \tag{19}$$

Left integral of (19) is tabulated and presents integral $\int (dx/(x-a)) = \ln|a-x| + C$. Right integral is simple, and finally integrals have the following solution:

$$\begin{aligned}
& \ln \left(\omega_x - \frac{a}{2} + \sqrt{\left(\frac{a}{2} \right)^2 - b} \right) \Big|_0^{\omega_x} \\
& - \ln \left(\omega_x - \frac{a}{2} - \sqrt{\left(\frac{a}{2} \right)^2 - b} \right) \Big|_0^{\omega_x} \\
& = - \left(6641.964496654 \sqrt{\left(\frac{a}{2} \right)^2 - b} \right) t \Big|_0^t
\end{aligned} \tag{20}$$

giving rise to the following:

$$\begin{aligned}
& \ln \left(\frac{\omega_x - a/2 + \sqrt{(a/2)^2 - b}}{-a/2 + \sqrt{(a/2)^2 - b}} \right) \\
& - \ln \left(\frac{\omega_x - a/2 - \sqrt{(a/2)^2 - b}}{-a/2 - \sqrt{(a/2)^2 - b}} \right) \\
& = - \left(6641.964496654 \sqrt{\left(\frac{a}{2} \right)^2 - b} \right) t.
\end{aligned} \tag{21}$$

The next transformation yields the following result:

$$\begin{aligned}
& \frac{[\omega_x - a/2 + \sqrt{(a/2)^2 - b}] \times [-a/2 - \sqrt{(a/2)^2 - b}]}{[\omega_x - a/2 - \sqrt{(a/2)^2 - b}] \times [-a/2 + \sqrt{(a/2)^2 - b}]} \\
& = e^{-(6641.964496654 \times \sqrt{(a/2)^2 - b})t}.
\end{aligned} \tag{22}$$

The right component of (22) has small value of a high order that can be neglected. Substituting expressions a and b into simplified equation (22), transformation yields the following result:

$$\begin{aligned}
& \omega_x = \frac{1.354853169}{2} \\
& - \sqrt{\left(\frac{1.354853169}{2} \right)^2 - 0.047442787(0.579413283 \pm 1)} \\
& = 0.677426584 \\
& - 0.217813652 \sqrt{9.672846089 - (0.579413297 \pm 1)}.
\end{aligned} \tag{23}$$

Solving (23) yields the maximal and minimal value of the precession angular velocity for the gyroscope around axis ox :

$$\begin{aligned}\omega_{x,\max} &= +0.0577694142 \text{ rad/s}, \\ \omega_{x,\min} &= -0.0145709463 \text{ rad/s},\end{aligned}\quad (24)$$

where the signs (+) and (−) represent motion in an anticlockwise and clockwise direction around axis ox , respectively.

Equation (24) enables the angular velocity of a well-balanced top precession around axes ox and oy to be defined, as represented by the following magnitudes:

$$\omega_x = 0.020602562 \text{ rad/s} \quad (25)$$

$$\omega_y = \left(\frac{2\pi^2 + 8}{\cos 75^\circ} + 2\pi^2 + 9 \right) \omega_x = 2.800203014 \text{ rad/s} \quad (26)$$

The precession's linear velocities of a balanced top's center-mass around axes ox and oy have the following magnitudes:

$$\begin{aligned}V_x &= \omega_x l \cos \gamma = 0.020602562 \times 20 \cos 75.0^\circ \\ &= 0.106646708 \text{ mm/s},\end{aligned}\quad (27)$$

$$\begin{aligned}V_y &= \omega_y l \cos \gamma = 2.800203014 \times 20 \cos 75.0^\circ \\ &= 14.494917406 \text{ mm/s}.\end{aligned}\quad (28)$$

The distance of precessed motion for the center-mass of a balanced top per nutation of half oscillation time is as follows:

$$a_x = V_y t = 14.494917406 \times 0.015 = 0.217 \text{ mm}. \quad (29)$$

The maximal and minimal value of the linear velocity of the top's center-mass around axis ox have the following magnitudes:

$$\begin{aligned}V_{x,\max} &= \omega_{x,\max} l = 0.0577694142 \times 20 \cos 75^\circ \\ &= -0.2990 \text{ mm/s}, \\ V_{x,\min} &= \omega_{x,\min} l = 0.0145709463 \times 20 \cos 75^\circ \\ &= +0.0754 \text{ mm/s},\end{aligned}\quad (30)$$

where the signs (−) and (+) represent linear velocity in negative and positive direction along axis oy , respectively.

The time spent on a half oscillation is as follows:

$$t = \frac{\pi}{\pi} = \frac{\pi}{2000 \times 2\pi/60} = 0.015 \text{ s}. \quad (31)$$

The maximal and minimal value of the amplitudes of center-mass nutation around axis ox as well as the location of a balanced top are as follows:

$$\begin{aligned}a_{y,\max} &= V_{x,\max} t = 0.2990 \times 0.015 = -0.0044 \text{ mm}, \\ a_{y,\min} &= V_{x,\min} t = -0.0754 \times 0.015 = +0.0011 \text{ mm}, \\ a_y &= V_x t = 0.1066 \times 0.015 = 0.0016 \text{ mm}.\end{aligned}\quad (32)$$

The total amplitude of oscillation around axis ox is as follows:

$$\begin{aligned}a_y &= |a_{y,\max}| + a_{y,\min} = 0.0044 + 0.0011 \\ &= 0.0055 \text{ mm}.\end{aligned}\quad (33)$$

The maximal and minimal value of the angular velocity for top's precession around axis oy are defined by (8). Substituting the parameters defined above and in Table 2 into (26), transformation yields the following results:

$$\begin{aligned}\omega_{y,\max} &= \left(\frac{2\pi^2 + 8}{\cos \gamma} + 2\pi^2 + 9 \right) \omega_{x,\max} \\ &= \left(\frac{2\pi^2 + 8}{\cos 75^\circ} + 2\pi^2 + 9 \right) 0.0577694142 \\ &= +7.851746194 \text{ rad/s},\end{aligned}\quad (34)$$

$$\begin{aligned}\omega_{y,\min} &= \left(\frac{2\pi^2 + 8}{\cos \gamma} + 2\pi^2 + 9 \right) \omega_{x,\min} \\ &= \left(\frac{2\pi^2 + 8}{\cos 75^\circ} + 2\pi^2 + 9 \right) (-0.0145709463) \\ &= -1.980414277 \text{ rad/s},\end{aligned}\quad (35)$$

where the signs (+) and (−) represent motion in an anticlockwise and clockwise direction around axis oy , respectively.

The maximal and minimal value of the linear velocities of the top center-mass around axis oy indicate the following magnitudes:

$$\begin{aligned}V_{y,\max} &= \omega_{y,\max} l \cos \gamma = 7.851746194 \times 20 \cos 75.0^\circ \\ &= +40.643629046 \text{ mm/s}, \\ V_{y,\min} &= \omega_{y,\min} l \cos \gamma = -1.980414277 \times 20 \cos 75.0^\circ \\ &= -10.251378643 \text{ mm/s},\end{aligned}\quad (36)$$

where the signs (+) and (−) represent linear velocity in positive and negative direction along axis ox , respectively.

The maximal and minimal value of the amplitudes of the center-mass nutation around oy as well as the location of a balanced top (29) are as follows:

$$\begin{aligned}a_{x,\max} &= V_{y,\max} t = 40.643629046 \times 0.015 \\ &= +0.6096 \text{ mm}, \\ a_{x,\min} &= V_{y,\min} t = -10.251378643 \times 0.015 \\ &= -0.1537 \text{ mm}.\end{aligned}\quad (37)$$

The total amplitude of oscillation around axis oy is as follows:

$$\begin{aligned}a_{x,t} &= a_{x,\max} + |a_{x,\min}| = 0.6096 + 0.1537 \\ &= 0.7633 \text{ mm}.\end{aligned}\quad (38)$$

The positive and negative values of the angular velocities around axes ox and oy ((34) and (35)), respectively, mean

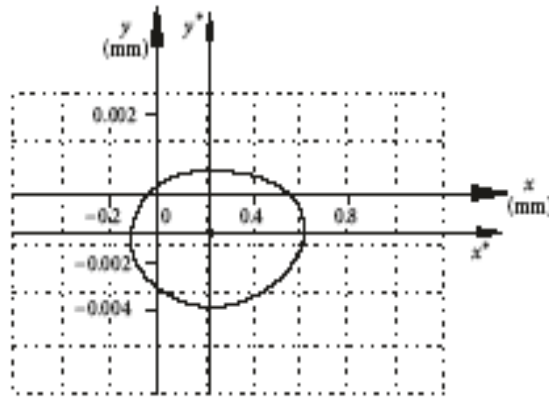


FIGURE 3: Nutation's amplitudes of top's center-mass.

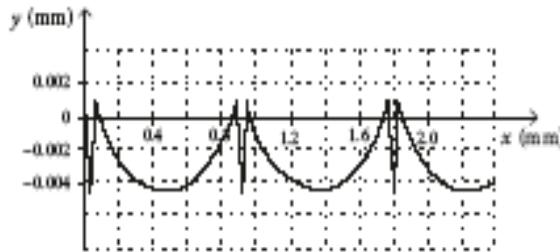


FIGURE 4: Deployed diagram of top's nutation.

rotation in anticlockwise and clockwise directions. Hence, the linear motions of the top's center-mass will be in negative and positive directions along the axes. This situation is expressed in the diagrams of nutation amplitudes.

This diagram of the top's nutation loop is presented in Figure 3 and contains two coordinate systems. The system with asterisks is accepted for the motions of a balanced top. The figure demonstrates that the actual loop of amplitudes for top's center-mass has stretched down along the axis oy . This is a natural result, because any action of the centrifugal force in the direction of top toy's weight increases the amplitude. Any action in the opposite direction decreases the amplitude of nutation.

The magnitudes of precessed motion's distance (29) and the amplitudes of oscillations around axes ox (37) and oy (32) make it possible for diagrams of top's nutation to be depicted. The distance of the center-mass's motion along axes oy and ox is bigger than the minimal value of the amplitude. It means that the deployed diagram of top's nutation does not have loops of oscillated motions. The following represent the half-cyclic nutation of top along the axis ox :

$$\begin{aligned} a_{xc,max} &= a_x + a_{x,max} = 0.217 + 0.609 = 0.826 \text{ mm}, \\ a_{xc,min} &= a_x - a_{x,min} = 0.217 - 0.153 = 0.064 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (39)$$

Deployed diagram of top's nutation (illustrated in Figure 4).

The deployed diagram of top's nutation can have loops if the negative amplitude of oscillation along axis ox is bigger than the distance of top's motion for the same precessing time. Equations of top's motions with the given and calculated data of nutation parameters demonstrate that the amplitude and frequency of nutation are cyclic. The cycles are different,

because the centrifugal force of top's eccentric center-mass acts at the first semicircle of rotation in the direction of precessed motions and at the second semicircle in a direction opposite to that of the precessed motions. The result of this example demonstrates that the axis of a spinning top toy precesses with a rapid tremor of small amplitude. For top with a big, eccentric, rotating center-mass, the tremor can be visible; however, for small eccentrics, this can hardly be noticeable to the naked eye.

Self-Stabilization. The presented data of a tilted spinning top allow the condition for its self-stabilization to be checked. To make it simple, this is considered a well-balanced top that does not have the eccentric mass. Substituting the data defined above and in Table 2 into (10), transformation yields the following result:

$$\begin{aligned} & 2 \times 0.02 \left[9.81 \cos 75^\circ + 0.02 \tan 75^\circ \right. \\ & \times \left(2\pi^2 + 8 + [2\pi^2 + 9] \cos 75^\circ \right)^2 0.020602562^2 \left. \right] \\ & = \left\{ \left[2 \left(\frac{\pi}{3} \right)^2 + \frac{8}{9} \right] + 2\pi^2 + 8 + [2\pi^2 + 9] \cos 75^\circ \right\} \\ & \times 0.025^2 \times 2000 \left(\frac{2\pi}{60} \right) 0.020602562 \end{aligned} \quad (40)$$

or $0.10313000 < 0.1031808$.

The right component is bigger than the left one, that is, the top stabilizes itself.

4. Results

The simplest form of a gyroscope is a top, whose motions are described by known publications in terms of mathematical models based on the change in the angular momentum. The analytical study of forces acting on a well-balanced top and on a top toy with the eccentricity of center-mass has formulated new mathematical models for its motions. These models are based on action of several internal forces generated by the mass elements and center-mass of a top. The action of a top's weight produces its own internal torques that interrelate and act at one time and expresses precession motions. A top rotating eccentric center-mass manifests a nutation process. The obtained mathematical models for the top's motions enable describing physical principles of acting forces. These models of motions for a well-balanced top allowed its minimal angular velocity for self-stabilization to be defined. The diagram of a top's nutation represents the motions of the top with eccentricity of its center-mass. The new mathematical models for the motions of the well-balanced top and with eccentricity of its center-mass definitely respond to the practical results.

5. Discussion

New studies of the gyroscope effects have shown that the origin of the acting forces and motions in a gyroscope is more complex. The gyroscope effects result from action of the several inertial torques generated by the centrifugal,

Coriolis, and common inertial forces as well as the change in the angular momentum of the spinning rotor. The action of the new internal torques clearly describes the physics of gyroscope's motions and changes the traditional presentation of gyroscope effects. This new study enables describing gyroscope properties that were unexplainable at former time. Today new mathematical models for acting internal torques can be applied to any gyroscopic devices and manually solve all technical problems. These new analytical solutions were applied for describing the forces acting on a well-balanced top and on a top with the eccentricity of center-mass. The new physical principles enabled formulating mathematical models of top processed motions, nutation, and its ability to rotate vertically.

6. Conclusion

In gyroscope theory, the top's motions are one of the most complex and intricate in terms of analytical solutions. Known mathematical models for the top motions are accepted with simplifications and do not adequately express a real picture of its motions. The new mathematical models for gyroscope torques consider the simultaneous and interdependent action of several inertial forces generated by the rotating mass of the spinning rotor. As a practical application, these new physical principles for gyroscope motions were used for modeling a top's motions that include micro oscillation and self-stabilization. These mathematical models are thus distinguishable from those in well-known publications, which tend to have complex numerical modeling that does not interpret the origin of gyroscope effects. The application of new mathematical models for the top's motions effectively and clearly demonstrates physical principles of acting forces and motions. In that regard, this is also a good example of educational processes.

Nomenclature

a_{xi}	Linear motion along axis i , that is, a_x or a_y along axis ox or oy , respectively
$a_{i,max}; a_{i,min}$	Maximal and minimal linear motion along axis i , respectively
g	Gravity acceleration
F_i	Centrifugal force
$F_{ct,xy}$	Centrifugal force of a top toy's center-mass rotating around axis oy
i	Index for axis ox or oy
J_i	Mass moment of inertia of a top
J_i	Mass moment of inertia of a top around axis i
l_i	Length of a top's leg
m	Mass of a top
T_i	Load torque
$T_{am,i}, T_{ct,i}, T_{cr,i}, T_{in,i}$	Torque generated by the change in the angular momentum, centrifugal, Coriolis, and common inertial forces acting around axis i , respectively
T_{ri}, T_{pi}	Resistance and precession torque acting around axis i , respectively

T_{ox}, T_{oy}	Torques generated by eccentricity of the center-mass and action around axes ox and oy , respectively
V_i	Linear velocity along axis i
$V_{i,max}; V_{i,min}$	Maximal and minimal value of the linear velocity along axis i , respectively
t	Time
α	Angle for calculating the maximal value of the torques' magnitude
γ	Tilt angle of a top's axis
ω	Angular velocity of a top
ω_i	Angular velocity of precession around axis i
$\omega_{i,max}; \omega_{i,min}$	Maximal and minimal value of the angular velocity of precession around axis i , respectively

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

References

- [1] F. Dell'Olio, T. Tatoli, C. Ciminelli, and M. N. Armenise, "Recent advances in miniaturized optical gyroscopes," *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, vol. 9, Article ID 14013, 2014.
- [2] G. Greenhill, *Report on Gyroscopic Theory*, Ein Dienst der ETH-Bibliothek ETH, Zürich, Schweiz, 2017.
- [3] J. B. Scarborough, *The Gyroscope Theory and Applications*, Nabu Press, London, UK, 2014.
- [4] Q. Hu, Y. Jia, and S. Xu, "Adaptive suppression of linear structural vibration using control moment gyroscopes," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 37, no. 3, pp. 990–996, 2014.
- [5] J. Li, M.-G. Suh, and K. Vahala, "Microresonator Brillouin gyroscope," *Optica*, vol. 4, no. 3, pp. 346–348, 2017.
- [6] R. C. Hibbeler, *Engineering Mechanics - Statics and Dynamics*, Prentice Hall, Pearson, Singapore, 13th edition, 2015.
- [7] K. Russell, Q. Shen, and R. S. Sodhi, *Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems: Implementation in MATLAB® and SimMechanics®*, CRC Press Taylor and Francis Group LLC, Boca Raton FL, USA, 2016.
- [8] S. H. H. Kachapi and D. D. Ganji, *Dynamics and Vibrations: Progress in Nonlinear Analysis*, Solid Mechanics and its Applications, Springer Dordrecht Heidelberg, London, UK, 2014.
- [9] S. Aslari, M. H. Asadian, K. Kakavand, and A. M. Shkel, "Vacuum sealed and getter activated MEMS Quad Mass Gyroscope demonstrating better than 1.2 million quality factor," in *Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, ISS 2016*, pp. 142–143, USA, February 2016.
- [10] L. Gu and Z. Gan, "Phase conjugate fiber optic gyroscope," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 9, Article ID 6750014, pp. 1663–1668, 2014.
- [11] I. Pasciuto, G. Ligorio, E. Bergamini, G. Vannozzi, A. M. Sabatini, and A. Cappozzo, "How angular velocity features and different gyroscope noise types interact and determine orientation estimation accuracy," *Sensors*, vol. 15, no. 9, pp. 23983–24001, 2015.

- [12] T. Su, S. Nitzan, P. Taheri-Tehrani, M. Kline, B. Boser, and D. A. Horsley, "Silicon MEMS disk resonator gyroscope with an integrated cmos analog front-end," *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 10, 2014.
- [13] B. Edamana, Y. Chen, D. Slavin, E. E. Aktakka, and K. R. Oldham, "Estimation with Threshold Sensing for Gyroscope Calibration Using a Piezoelectric Microstage," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 5, pp. 1943–1951, 2015.
- [14] M. Glueck, D. Oshinubi, and Y. Manoli, "Automatic real-time offset calibration of gyroscopes," *Microsystem Technologies*, vol. 21, no. 2, pp. 429–443, 2014.
- [15] M. Häußler, R. Reichart, A. Bartl, and D. J. Rixen, "Post correcting for gyroscopic effects via dynamic substructuring," in *Proceedings of the 24th International Congress on Sound and Vibration, ICSV 2017*, July 2017.
- [16] D. Senkal, A. Efimovskaya, and A. M. Shkel, "Minimal realization of dynamically balanced lumped mass WA gyroscope: Dual Foucault pendulum," in *Proceedings of the 2nd IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, IEEE ISSS 2015*, USA, March 2015.
- [17] Z. Mohammadi and H. Salarieh, "Investigating the effects of quadrature error in parametrically and harmonically excited MEMS rate gyroscopes," *Measurement*, vol. 87, pp. 152–175, 2016.
- [18] S. A. Zotov, I. P. Prikhodko, B. R. Simon, A. A. Trusov, and A. M. Shkel, "Self-calibrated MEMS gyroscope with AM/FM operational modes, dynamic range of 180 dB and in-run bias stability of 0.1 deg/hr," in *Proceedings of the Inertial Sensors and Systems – Symposium Gyro Technology*, Karlsruhe, Germany, September 2014.
- [19] E. Klein and A. Sommerfeld, *The Theory of the Top*, vol. I-IV, Springer, Birkhäuser, New York, NY, USA, 2008-2014.
- [20] W. Gander, M. J. Gander, and F. Kwok, *Scientific Computing - An Introduction using Maple and MATLAB*, Texts in Computational Science and Engineering, Springer, London, UK, 2014.
- [21] R. Usabamatov, "Mathematical model for gyroscope effects," in *Proceedings of the AIP Conference*, vol. 1661, American Institute of Physics, 2015.
- [22] R. Usabamatov, "Gyroscope internal kinetic energy and properties," *International Journal of Advancements in Mechanical and Aeronautical Engineering*, vol. 3, pp. 16–20, 2016.
- [23] R. Usabamatov, "A mathematical model for motions of gyroscope suspended from flexible cord," *Cogent Engineering*, vol. 3, no. 1, Article ID 1245901, 2016.
- [24] R. Usabamatov, "Mathematical models for principles of gyroscope theory," in *Proceedings of the AIP Conference*, pp. 020133-1–020133-21, 2017.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных кафедрой аналитических и экспериментальных исследований можно сформулировать следующее:

1. Разработанный учебно-лабораторный стенд позволит автоматически регулировать режимы работы камнеобрабатывающего станка в зависимости от изменения физико-механических свойств обрабатываемого материала, повысить точность и достоверность измерений, сократить время на обработку экспериментальных данных, предоставить возможность проводить необходимые математические и статистические вычисления, создавать массивы экспериментальных данных, графически представлять выходные данные в режиме реального времени.

2. Анализ технологических схем распиловки камня показывает, что для получения плиток шириной 150-300 мм достаточно установить на ортогонально-фрезерных станках, выше указанных моделей, алмазные дисковые пилы диаметром 700-800 мм. Такое техническое решение позволит уменьшить ширину пропила до 10 мм, снизить потери сырья при распиловке на 34%, сократить расход охлаждающей жидкости на 50%, а скорость резания увеличить в два раза.

3. Разработаны и классифицированы способы повышения надежности быстрорежущих спиральных сверл.

4. С целью повышения стойкости сверл классификация позволяет решать вопросы выбора прогрессивной конструкции их режущей части и параметров режима резания при максимальной стойкости сверл.

5. Для обеспечения безотказности сверл разработаны критерий функционального отказа, критериальная модель для типа производства, способы эксплуатации и восстановления и проведен сравнительный анализ их экономической эффективности.

6. Использование и внедрение систем поддержки принятия решений соответствуют современным тенденциям развития в области цифровых

производств;

7. Системы поддержки принятия решений могут служить основой дальнейшей системной интеграции производственных процессов и технологического оборудования в цифровой среде;

8. Доказана работоспособность предложенной архитектуры и модели взаимодействия программно-аппаратных компонентов на примере тестового стенда.

9. Разработанной программе максимально учтены знания о поведении формовочной смеси при динамических нагрузках и данные экспериментальных исследований.

10. Возможность широкого регулирования деформационных характеристик уплотняемой формы в установленных «реальных» диапазонах позволяет эффективно проводить исследования и практические расчеты.

11. Выведенные математические модели для производительности, отдельной технологической машины и АЛ параллельного действия на основе технологического процесса, показателей надежности машин и компонентов, включают специфику проектирования машин и систем, позволяют вычислять оптимальные режимы обработки и оптимальные структуры АЛ.

12. Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что повышения ресурса работы плазмотрона с гафниевой вставкой зависит от частоты включения, а также от интенсификации охлаждения электрода.

13. Выявлено, что наибольшее влияние на скорость резки оказывает ток дуги. При увеличении тока дуги от 200 до 400А скорость резки нержавеющей стали увеличивается в 2-3 раза.

14. Установлена взаимосвязь между глубиной прорезания нержавеющей стали, параметрами режима работы плазмотрона, его геометрии сопла. Наибольшая прорезающая способность $90 \cdot 10^{-3}$ м получена при токе дуги 320А, расходе воздуха $1,49 \cdot 10^{-3}$ мкг/с, диаметре сопла $3,8 \cdot 10^{-3}$ м.

15. Кроме этого установлено, что при резке алюминиевых сплавов необходимо применять ток обратной полярности, так как при этом создается условие для удаления тугоплавкой окисной пленки на поверхности алюминиевых сплавов, которые способствует к снижению мощности плазменной дуги при резке алюминиевых сплавов

16. На усталостную прочность оказывает влияние химико-термическая обработка сталей, поскольку она изменяет их вязкость, прочность и другие качества. Основные методы химико-термической обработки в следующем порядке (по возрастанию) влияют на твердость и прочность сталей: цементация, цианирование, азотирование, борирование. А на вязкость (характеризующую сопротивление хрупкому разрушению) они влияют в обратном порядке.

17. Детали технологической оснастки, такие как плиты: верхние, нижние, держатели матриц и пуансонов и т.п., имеют до десяти высокоточных отверстий диаметром менее 20 мм 7 квалитета допуска размера и шероховатости $Ra = 0,8$ мкм.

18. Общепринятый технологический способ повышения качества поверхности увеличением скорости резания для обработки сверлением неприемлем, качество обработанных сверлением отверстий можно повысить применением скоростей резания меньших 6 м/мин.

19. На качество обработанных сверлением отверстий большое влияние оказывает погрешность заточки спиральных сверл, а именно осевое и радиальное биения режущих кромок.

20. При работе сверлами с конической заточкой низкого качества изготовления и заточки со скоростями резания меньшими 6 м/мин точность отверстий не превысила 13 квалитет допуска размера. При этом скорость резания практически не влияет на качество обработанных отверстий.

21. При работе сверлами с двухплоскостной заточкой высокого качества изготовления и заточки на скоростях резания от 4 до 5,5 м/мин, и подачах 0,2 и 0,25 мм/об, получены: 8 квалитет допуска размера отверстий и

шероховатость поверхности $Ra = 1,6$ мкм. При этом с уменьшением скорости резания и подачи качество обработанных отверстий возрастает.

22. Разработана математическая модель по результатам испытаний сверл, позволяющая рассчитывать и прогнозировать параметры качества поверхности отверстий с высокой степенью точности.

23. Обработка сверлением сверлами с двухплоскостной заточкой и высоким качеством изготовления и заточки на скоростях резания 4-5 м/мин позволяет исключить переходы чернового и чистового зенкерования и точного развертывания.

24. Рекомендуется подача проволоки 4м/мин. Благодаря меньшей энергии, вносимой в поверхность металла во время сварки СМТ процесса, формируется ровный сварочный шов без брызг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В.А., Алексеенко Н.А., Мечник В.А. Исследование силовых и энергетических параметров резки гранита алмазными дисковыми пилами // Сверхтвёрдые материалы. - 1984. - №6. - С. 35-39.
2. Александров В.А. Обработка природного камня алмазным дисковым инструментом. Киев: Наукова думка, 1979, 239с.
3. Романов В.Ф, Сафронов В.Г. др. Алмазный инструмент. Каталог. НИИТЭРМ. М.: 1985, 117с.
4. Сычев Ю.И., Берлин Ю.Я. Распиловка камня. М.: Недра, 1989, 319с.
5. Карпушевич З.Г., Трегубов А.В. Методика выбора основных параметров регулятора автоматической системы регулирования режимами работы привода подачи инструмента. Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова № 17. Бишкек, 2009 г.
6. Алмазный инструмент. Каталог. М.: ВНИИалмаз, 1985. 119 с.
7. Василевский В.В. Алмазный инструмент для резания горных пород // Разрушение горных пород механическими способами. М.: Наука, 1966. С. 160-167.
8. Добыча и обработка природного камня: Справочник под ред. А.Г. Смирнова. М.: Недра, 1990. 445 с.
9. Оборудование для производства облицовочных материалов из природного камня. Н.Г. Картавый, Ю.И. Сычев и др. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
10. Першин Г.Д., Митин А.Н. Расчёт количества контактов алмазных зёрен дискового камнерезного инструмента с распиливаемой горной породой // Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. унив-та им. Г.И.Носова, 2012. С. 142-150.

11. Проспекты итальянских фирм PELLEGRINI, TERZAGO, BRETON, BRA (1991-2011 г.г.).

12. А. с. 1278117 СССР, МКИ³ В23В51/02. Сверло. / Б.Д. Даниленко, А.Е. Древаль, Н.А. Рагрин (СССР). № 3866191/25 – 08; заявл. 15.03.8; опубл. 23.12.86, Бюл. № 47. – 2 с. : ил.

13. А. с. 1437160 СССР, МКИ³ В23В51/02. Сверло. / А.Е. Древаль, Н.А. Рагрин, Р.Ч. Рафиков (СССР). № 4126392/25 – 08; заявл. 14.07.86; опубл. 15.11.88, Бюл. № 42. – 3 с. : ил.

14. Рагрин Н.А., Самсонов В.А., Айнабекова А.А. Закономерности повышения качества поверхности обработанной сверлением // Вестник КРСУ. 2017, Том 17. № 1. - С. 92-94.

15. Рагрин Н.А., Айнабекова А.А., Самсонов В.А. Повышение стойкости спиральных сверл заточкой задних поверхностей режущих лезвий. Свидетельство № 3073. Объект авторского права. Бишкек, 2016.

16. Рагрин Н.А. Разработка и анализ способов определения скоростей резания максимума стойкостью зависимости при сверлении // Технология машиностроения. 2014, № 7(195). - С. 20-24.

17. Рагрин Н.А. Классификация способов определения скоростей резания при максимумах стойкости и наработки спиральных сверл // Технология машиностроения. 2015, № 2(152). - С. 11-14.

18. А.с. 1194582 СССР, МКИЗ В23В01/00. Способ определения оптимальной скорости резания соответствующей максимальной стойкости режущего инструмента. / В.Н. Подураев, А.Е. Древаль, Н.А. Рагрин // Б.И. – 1985. - №44.

19. Рагрин Н. А. Разработка статистической стойкостной модели спиральных сверл при различных типах производства // Технология машиностроения. 2015, № 11. - С. 156-159.

20. Рагрин Н.А. Критерий функционального отказа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2012, № 26. – С. 18-20.

21. Рагрин Н.А. Разработка и обоснование критериальной модели для

типа производства с применением спиральных сверл // Технология машиностроения. – М., 2016. - № 4. - С. 57-63.

22. Рагрин Н.А. Планирование, организация экспериментов, обработка экспериментальных данных: Учебник для вузов / КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек: Текник, 2016. – 156 с.

23. Общемашиностроительные нормативы по износу, стойкости и расходу спиральных сверл. - М. : НИИМАШ, 1980. - 40 с.

24. Общемашиностроительные типовые нормы времени на заточку режущего инструмента. - М.: ЦБНТ, 1972. – 115 с.

25. Kelly K. New Rules for the New Economy: 10 radical strategies for a connected world / K. Kelly. – New York: Viking, 1998. – 224 p.

26. Кунцман А.А. Трансформация внутренней и внешней среды бизнеса в условиях цифровой экономики [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

http://uecs.ru/index.php?option=com_flexicontent&view=items&id=4131, дата обращения: 14.12.2016.

27. Алексеев И.В. Цифровая экономика: особенности и тенденции развития электронного взаимодействия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://interactive-plus.ru/ru/article/116328/discussion_platform, дата обращения - 14.12.2016.

28. О Программе цифровой трансформации Кыргызской Республики «Таза Коом» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tazakoom.kg/site/concept/4>, дата обращения - 14.12.2016.

29. Klaus Schwab the Fourth Industrial Revolution. – World Economic Forum, 2016. – 184 с.

30. Мамбеталиев Т.С., Соколов Д. А. Моделирование процесса уплотнения разовых песчаных форм при ударном нагружении. Труды / КГМИ им. У. Асаналиева, 1999, с. 78-83.

31. Мамбеталиев Т.С. Моделирование процессов импульсного уплотнения песчаных форм. Труды / КИМС, Бишкек, 2000, с. 175-183.

32. Мамбеталиев Т.С. Исследование уплотнения песчаных форм при импульсном нагружении. Труды / КИМС, Бишкек, 2000, с. 183-190.
33. Мамбеталиев Т.С. Исследование и математическое моделирование газо-импульсного уплотнения литейных форм. Доклады международной конференции: Проблемы управления и информатики, Бишкек, 2000, с.331-335.
34. Мамбеталиев Т.С. Эффективность уплотнения литейных форм при ударном нагружении. Наука и новые технологии, №4, Бишкек, 2000, с. 65 – 67.
35. Мамбеталиев Т.С. Волновые процессы в формовочной смеси при импульсном нагружении. Наука и новые технологии, №6, 1 Часть, Бишкек, 2000, с. 180 – 183.
36. Chryssolouris G., 2006, Системы производства: теория и практика. 2-й энд, Спрингер, Нью-Йорк.
37. Groover M. P., 2010, Основы современного производства: материалы, процессы и системы, 4-е изд., (Lehigh University), Wiley.
38. Grewal S., 2011, Проектирование и калькуляция производственных процессов: комплексный подход, Springer-Verlag, Лондон.
39. Волчкевич Л., 2005, Автоматизация производственных процессов, Машиностроение, Москва.
40. Усубаматов Р., Исмаил К.А., Сах Дж. М., 2013, Математические модели производительности и доступности автоматизированных линий, Международный журнал передовых технологий производства: Vol. 66, выпуск 1, стр. 59-69.
41. Усубаматов Р., Син Т. С. и Ахмад Р., 2016, Математические модели производительности автоматизированных линий с разной частотой отказов для станций и механизмов, Международный журнал передовых технологий производства. 82, pp. 681-695.

42. Васильев К. В. Плазменно-дуговая резка – перспективный способ термической резки / К. В. Васильев // – «Сварочное производство». -2002. - №9 стр. 28-32.
43. Заякина С. Б. Двухструйный дуговой плазмотрон в атомно-эмиссионном анализе геологических проб и дисперсных технологических материалов / С. Б. Заякина. Новосибирск, 2009. – 351 с.
44. Иванов Д. В. Исследование высокочастотного индукционного плазмотрона с тремя независимыми потоками газа / Д. В. Иванов. Санкт-Петербург. 2002. – 376 с.
45. Фролов В. В. Теория сварочных процессов / Под ред. В. В. Фролова. – М: «Высшая школа», 1988
46. Железнов Ю. А. Экспериментальный метод пассивной оптической диагностики плазмы / Ю. А. Железнов, В. Ю. Хомич. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 60-66.
47. Paul Eddie. Plasma Cutting Handbook / Paul Eddie. PenguinGroup USA.22/05/2013. P.144
48. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О. П. Солоненко, А. П. Алхимов, В. В. Марусин и др.. - Новосибирск: Наука, 2000. - 425 с.
49. Костецкий Б.И. Надежность и долговечность машин. Киев: Техника, 1995.
50. Яковлев Г.М. Технологические основы надежности и долговечности машин. Минск. Беларусь, 1984.
51. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. М.: Машиностроение, 1998.
52. Гальперин А.С., Сушкевих М.И. Определение оптимальной долговечности машин. М.: Машиностроение, 1990.
53. Рагрин Н. А., Айнабекова А. А., Дыйканбаева У. М. Научные основы повышения качества поверхности обработанной быстрорежущими спиральными сверлами // Технология машиностроения. – М., 2017. - № 5. - С.

13-16.

54. Рагрин Н.А. Обработка материалов и инструменты: Учебник для вузов / КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек: Текник, 2012. – 156 с.

55. Древаль А.Е., Рагрин Н.А., Самсонов В.А. Формирование отказов спиральных сверл в условиях автоматизированного производства [Электронный ресурс] // Электронное научно-техническое издание МГТУ им. Баумана. – М., 2011. - № 10. – 14 с. Режим доступа: <http://www.technomag.edu.ru/index.html>.

56. ГОСТ 10903-77 Сверла спиральные с коническим хвостовиком. Основные размеры.

57. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. - 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. - С 176-279.

58. Рагрин Н. А. Методология построения физических моделей надежности инструментов // Технология машиностроения. – М., 2017. - № 6. - С. 49-54.

59. Рагрин Н.А. Самсонов В.А. Айнабекова А.А. Определение закономерностей влияния погрешностей заточки спиральных сверл на их стойкость // Технология машиностроения. – М., 2015. - № 7. - С. 27-31.

60. ГОСТ 4010-77 Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком. Короткая серия. Основные размеры.

61. ГОСТ 2034-80 Сверла спиральные. Технические условия.

62. Prof. Dr.-Ing. M. Fehlbier, Vorlesungen “Gussleichtbau: Automobil-und Fahrzeugguss”, Uni Kassel, 2016/17.

63. Гини, Э.Ч. Технология литейного производства. Специальные виды литья: учебник/Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин; М.: Академия, 2007. – 352с.

64. Литье в кокиль: методическое руководство к лабораторным работам по курсам «Технология конструкционных материалов» и «Технологические процессы в машиностроении» для студентов машиностроительных

специальностей / КГТУ им. И. Раззакова; Сост.: к.т.н., доцент Т.С. Мамбеталиев, старший преподаватель У.М. Дыйканбаева – Б.: ИЦ «Текник», 2018. – 16с.

65. Prof. Dr.-Ing. B. Langer, Vorlesungen “Giessen”, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, 2015.

66. Asel Mamytbaeva, Formenbau unter Nutzung der Rapid Prototyping – Technologien. Masterarbeit, Beuth Hochschule für Technik, Berlin, 2011. – 73s.

67. G. Mrówka-Nowotnik*, J. Sieniawski, M. Wierzbińska, статья на тему «Intermetallic phase particles in 6082 aluminium alloy», журнал Archives of Materials Science and Engineering, Poland 2007,69-76 стр.

68. Möller, Felix –Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Laserstrahl beim Fügen von Aluminium, BIAS Verlag, Bremen, 2016

69. Ryan Douglas Matulich, магистр.дисс. «Post-fire Mechanical Properties of Aluminum Alloys and Aluminum Welds»,Blacksburg 2011,92 стр.

70. Schwartz, M. M.: Brazing, 2. Aufl., ASM International,Materials Park (2003).

71. Daniela Schwerdt ,Schwingfestigkeit und Schädigungsmechanismen der EN AW-6056 und EN AW-6082 sowie des Vergütungsstahls 42CrMo4 bei sehr hohen Schwingspielzahlen, Darmstadt 2011

72. Дмитриева А. В. Сварка "холодной" дугой / А. В. Дмитриева ; науч. рук. М. А. Крампит // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении : сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и учащейся молодежи, г. Юрга, 7-9 апреля 2016 г. : в 2 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 1. — [С. 120-122].

73. Magnus Sætersdal, диссертация на тему «The Effect of Alloying Elements on the Ductility of Al-Mg-Si Alloys», Norwegian 2014

74. T. Srikanth, S. Surendran, G. Balaganesan,G. L. Manjunath, Response of CMT Welded Aluminum AA5086-H111 to AA6061-T6 Plate with AA4043 Filler for Ballistic. Procedia Engineering 194 (2017) 522 – 528

75. Faustin Kalenda Mutombo, магистерская диссертация «CORROSION FATIGUE BEHAVIOUR OF 5083-H111 AND 6061-T651 ALUMINIUM ALLOY WELDS», Pretoria 2011