

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

АВИАЦИОННЫЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА «АВИАСТРОЕНИЕ»

На правах рукописи

Зикиров Абдумутал Эркинович

**«Исследование системы контроля и управления процессом
резания на основе измерения ТЭДС на фрезерных станках с
ЧПУ»**

5A520803 «Технология производства летательных аппаратов»

Диссертация на соискание академической степени магистра наук

Научный руководитель:

Проф., к.т.н. Усманов Камал Бекмуратович

Ташкент-2012г.

Оглавления

	ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.	ГЛАВА 1. АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ.....	8
	1.1. Диагностика методом акустической эмиссии (АЭ).....	8
	1.2. Метод вибродиагностики.....	13
	1.3. Термоэлектрические явления и метод термоэлектрической диагностика.....	14
	1.3.1. Термоэлектрический метод диагностики.....	19
	1.3.2. Термо - э.д.с. при точении.....	23
	1.3.3. Термо-э.д.с. при сверлении.....	33
	1.3.4. Термо – э.д.с. при фрезеровании.....	38
2.	ГЛАВА 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	43
3.	ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМО – Э.Д.С. ПРИ РЕЗАНИ МЕТАЛЛОВ.....	48
	3.1. Характер изменения термо – э.д.с. при фрезеровании...	48
	3.2. Термо - э.д.с. при резание – как информационный канал для управления процессов резании.	68
4.	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	78
5.	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРА.....	79

ВВЕДЕНИЕ.

Современное металлообрабатывающее производство характеризуется, использованием прогрессивного оборудования: станков с ЧПУ, многоцелевых станков, роботизированных технологических комплексов и других. Создание на базе этого оборудования автоматизированных производств, заводов-автоматов ставит задачу активного технологического диагностирования процесса обработки с целью его оптимизации, контроля и управления. Поэтому проблема создания надежного аппарата технологического диагностирования процесса резания на прогрессивном и перспективном оборудовании является актуальной.

Современные подходы к металлообрабатывающему производству требуют как можно более полной автоматизации всех процессов, работающей в комплексе. Большую часть в этом играет использование самого современного и прогрессивного оборудования т. е. многоцелевых станков, станков с числовым программным управлением, роботизированных технических комплексов, станков напрямую соединенных с производственными компьютерами и др. Дальнейшие перспективы развития такого производства подразумевают собой целые системы, управляемые искусственным интеллектом и способные к самооптимизации, самоналаживанию, самоконтролю и т. д. Но даже на сегодняшний день существует проблема надежного и точного аппарата технологического диагностирования процесса резания. Активная технологическая диагностика процесса резания является основой адаптивного управления. Разновидность систем, в которых контроль возмущающего воздействия выполняется непосредственно в процессе формообразования, а его результаты, преобразованные в сигнал

управления, которые тут же обрабатываются, называют самоприспосабливающимися (адаптивными) [2].

На уровне технологической операции [1] сущность адаптивного управления заключается в слежении и поддержании постоянства значения какого-либо параметра, влияющего на ход технологического процесса (ТП) и обеспечивающего заданный уровень выходного параметра, определяющего качество, производительность при минимальных затратах на выполнение рассматриваемой части ТП. Адаптивное управление осуществляется либо путём ограничения управляемого параметра (адаптивная система предельного регулирования) - сигнал управления вырабатывается только тогда, когда управляемый параметр достиг предельно допустимого уровня, либо путём поиска оптимального для конкретных текущих условий значения управляемого параметра (адаптивная система оптимизации) - сигнал управления вырабатывается непрерывно и его составляющие соответствуют оптимальным значениям управляемого параметра [1, 3].

Для уровня технологической операции принцип адаптации применим в основном для операций изготовления деталей. В этом случае обрабатывающее оборудование оснащают автоматической системой оптимизации (АСО), обеспечивающей постоянный контроль управляемого параметра и сравнение фактических результатов с заданными. При возникновении отклонения определяется его численное значение и знак и корректируется фактор, регулирующий управляемый параметр. Такая система должна работать в режиме реального времени, обеспечивая мгновенную реакцию на отклонение контролируемого параметра, что предъявляет высокие требования к их чувствительности и быстродействию. Необходимость развития и внедрения адаптивных систем управления обосновывается различными факторами. Во-первых, в условиях рыночной экономики основным видом производства

является мелкосерийное, которое характеризуется большой номенклатурой обрабатываемых деталей и как следствие этого, широкий диапазон изменения обрабатываемых материалов, режимов резания, а также обработка деталей из новых или экспериментальных материалов, по которым нет подтвержденных данных по режимам резания. Во-вторых, существует необходимость повышения точности обработки деталей с учетом влияния на неё случайных факторов таких как неравномерность припуска, различная твердость по длине заготовки и по глубине резания и др. Таким образом, производительность и себестоимость обработки становятся зависимыми от эффективности процесса резания, так как затраты ручного труда и вспомогательного времени резко уменьшаются, а доля машинного времени возрастает из-за увеличивающегося использования труднообрабатываемых материалов, усложнения конструкции деталей и повышения требований к точности их обработки [2].

При обработке деталей на станках с обычными системами автоматического управления, а также с системами ЧПУ, уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания процесса резания и насколько остаются неизменными исходные параметры, принятые при расчете и составлении программы управления (величина припуска, твердость обрабатываемого материала, жесткость технологической системы и др.). В действительности параметры процесса резания не остаются постоянными. Поэтому традиционные методы назначения режимов резания основаны на приближенном представлении о процессе резания и ожидаемых значениях его параметров. Используемые при этом методика и нормативные материалы не учитывают полностью всего многообразия технологических способов получения заготовок, а также состояния технологической системы.

Наличие разброса исходных параметров процесса обработки вынуждает назначать режимы резания, как правило, несколько заниженными для снижения вероятности появления брака обработки, снижения износа режущего инструмента и его повышенного расхода, а также предохранения от аварийных ситуаций. С другой стороны, выполнение процесса обработки с постоянными режимами резания при указанном выше разбросе исходных параметров процесса обработки приводит к значительным колебаниям силы резания. Это наряду с изменением жесткости технологической системы приводит к значительным колебаниям силы резания. Это наряду с изменением жесткости технологической системы приводит к значительным колебаниям упругих перемещений последней и как следствие, к погрешностям обработки деталей.

Случайный характер изменения припуска и твердости материала заготовки изменяет скорость износа режущего инструмента и приводит к отклонению его фактической стойкости от заданной.

Указанные выше факторы [2] приводят к снижению производительности, разбросу показателей качества обработки, недоиспользованию резервов снижения себестоимости обработки деталей. Очевидно, что эффективность диагностики целиком и полностью определяется информативностью используемых параметров. Их зависимостью от условий обработки. Традиционное использование для этой цели силы и температуры резания, сигналов акустической эмиссии в ряде случаев оказываются неприемлемыми или недостаточно информативными и адекватными. Поэтому во все времена большое внимание специалистов постоянно привлекает перспектива термоэлектродвижущей силы как информационно-чувствительного канала диагностики процесса резания. Действительно, термоэлектродвижущая сила всегда сопутствует процессу обработки резанием, а его

чувствительность предопределяет успех в выявлении тесных корреляционных связей с технологическими условиями обработки.

Несмотря на перспективность использования термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) в качестве надежной информации, об изменениях происходящих в зоне резания, в отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют обобщенные рекомендации по его технологическим возможностям. Особенно это относится к такому виду обработки как фрезерование. Поэтому целью настоящей работы является анализ имеющихся исследований и практического опыта в области использования термо – э.д.с. как информационного канала при фрезеровании и использовании его для активного управления процессом резания .

ГЛАВА 1.

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ.

1.1. Диагностика методом акустической эмиссии (АЭ).

Все материалы находятся в состоянии "твердое тело" благодаря межатомным и межмолекулярным силам. Эти силы весьма велики, пока расстояние между атомами не превышает некоторого критического размера. Если участок металла растягивать (деформировать), то, естественно, межатомные расстояния изменяются, увеличиваются. Наконец, наступает момент, когда межатомные силы оказываются не в состоянии удерживать атомы, а, наоборот, стремятся оттолкнуть эти атомы друг от друга. Происходит разрыв связи. Аналогичные связи и силы имеются и у групп атомов. Прочности связей внутри тела очень сильно различаются. Прочность тела, по сути, определяется некоей среднестатистической величиной связей. При разрыве связи атомы не могут свободно разлететься в разные стороны - мешают соседи, которые будут пытаться вернуть "беглецов" на исходное место. В результате атомы в месте разрыва связи начинают колебаться относительно своего исходного положения.

Эти колебания передаются соседним атомам. Рождается упругое колебание, в теле распространяется упругая волна. Процесс разрыва быстро затухает.

Поэтому упругое колебание имеет форму короткого импульса. Вот эти-то импульсы упругих колебаний и называют "акустической эмиссией" (АЭ).[\[5\]](#)

В технологической системе станок – приспособление – инструмент – заготовка при резании генерируются высокочастотные волны упругой деформации (волны напряжений), параметры и характер появления которых обусловлены динамической локальной перестройкой полей

механических напряжений. Основным их источником является зона резания, в которой происходят пластическая деформация и разрушение обрабатываемого материала, разрыв фрикционных связей на контактных поверхностях инструмента. Эти процессы неизбежны с динамической нагрузкой-разгрузкой твердого тела, например резца, имеют различную степень пространственно-временной локализации и порождают волны напряжений, которые распространяются в упругой среде (по элементам технологической системы и несут определенную информацию о тех процессах, в ходе которых они появляются).

Если низкочастотные колебания вызываются нестационарностью процесса обработки и зависят от многих внешних факторов, в первую очередь от жесткостных и инерционных характеристик элементов технологической системы, то волны АЭ порождаются, доминирующими физическими процессами при обработке резанием (разрушение, трение, пластическое деформирование). Это создает определенные преимущества для построения с помощью анализа зависимости их параметров от условий обработки аппарата технологической диагностики. [6]

Приём, преобразование, обработка и регистрация волн напряжений носят название метода акустической эмиссии. Источники АЭ можно условно разделить на внешние и внутренние. К первым относят источники расположенные на поверхности объекта, например волны напряжений, генерируемые при трении, соударении, обтекании турбулентным потоком жидкости или газа. Процессы локального динамического перераспределения полей механических напряжений в объёме материала относятся к внутренним источникам АЭ (например, акты пластической деформации, микро – и макроразрушения, фазовые превращения). Рассматривая с этих позиций зону резания, можно сделать

вывод о наличии в ней целого ряда источников АЭ, которые будут генерировать волны напряжений разной мощности и спектральной плотности.

Схема измерения параметров АЭ показана на рис. 1.1. Волны напряжений 1, генерируемые в зоне резания 2, распространяются в упругой среде, например по резцу 3 или заготовке 4, и достигают свободной поверхности, упругие смещения которой фиксируются датчиком 5. Сигнал с датчика поступает в блок обработки 6 и с него - на регистрирующее устройство 7. [12]

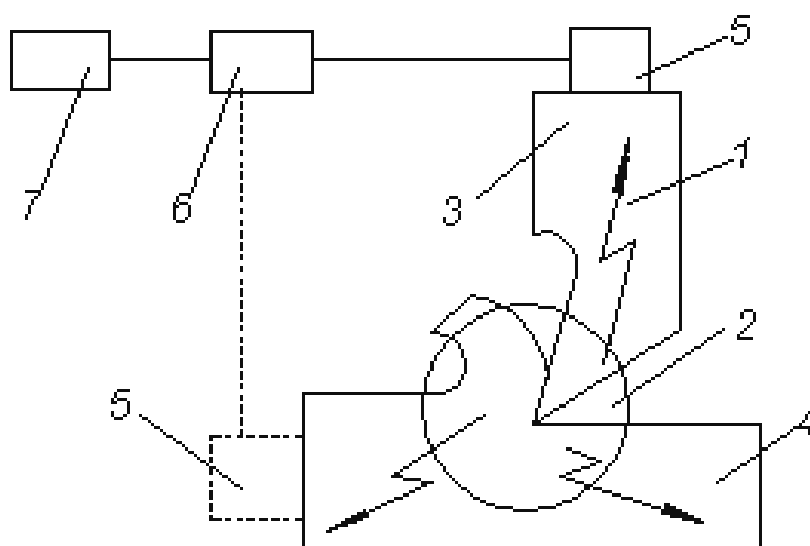


Рис.1.1. Схема измерения параметров АЭ при резании ?

Импульсы АЭ можно зарегистрировать такими же преобразователями, которые применяются в ультразвуковой дефектоскопии. Это - первое достоинство метода - простота процесса для понимания. Чтобы родился импульс акустической эмиссии, нужна некая внешняя сила, деформирующая твердое тело. Эту силу можно привести механическим способом - нагружая материал. Каждому уровню деформирования твердого тела соответствует определенное число связей, которые способны выдержать такую степень "растаскивания" атомов. Если деформировать материал

ступенями нагрузки и регистрировать импульсы акустической эмиссии, то можно обнаружить закономерность, по которой изменяется число импульсов АЭ при деформировании тела.

В зоне дефекта среда уже нагружена из-за концентрации механических напряжений. Поэтому импульсы АЭ появляются в зоне дефекта почти сразу после начала нагружения. Это - второе достоинство метода. Импульс АЭ распространяется в виде сферической волны, как волна от камня, упавшего в воду. Если в разных местах изделия поставить по преобразователю -приемнику импульсов АЭ, то используя известные из радиопеленгации приемы, можно установить координаты точки, из которой вышел импульс АЭ. Тем самым, можно установить положение дефекта. Это - третье достоинство метода.

При наступлении критического напряженно-деформированного состояния контролируемого объекта интенсивность шума АЭ лавинообразно нарастает, что очень наглядно сообщает оператору о грядущей гибели конструкции. Это – тоже достоинство.

Однако, этот метод обладает не только достоинствами, но и недостатками.

Достоверность засечки цели – дефекта – заметно зависит от конструктивных особенностей объекта. Ведь упругая волна не просто распространяется от дефекта к приемнику - по пути она претерпевает множество искажений (отражения от неоднородностей, от стенок конструкции, трансформации волн.). Методы обнаружения акустической эмиссии эффективны тогда, когда в объекте контроля отсутствует высокочастотная вибрация, возбуждаемая другими источниками, например, потоками газа или жидкости и др.

Если конструкция находится в постоянном напряженно-деформированном состоянии, то и щелчков никаких аппаратура не

зарегистрирует. Значит, объект надо нагружать в процессе контроля. Это не всегда удобно или даже возможно. В некоторых методиках требуют такого уровня нагружения, что после испытания АЭ вообще не нужна - ведь испытание "прессовкой" уже дало прямой ответ на поставленный вопрос: либо объект выдержал и будет далее под рабочим давлением работать, либо разрушился.

Сторонники метода АЭ считают, что "основное преимущество метода акустической эмиссии в том, что этот метод обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся, наиболее опасных дефектов. Таким образом, метод позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени опасности.

То есть интенсивность АЭ – это еще не критерий опасности. Это всего лишь один из признаков вероятной опасности. А вот концентрация механических напряжений может являться признаком и критерием.

Акустической эмиссии присущ эффект, известный как эффект Краузе: если металл ранее был нагружен до некоторого напряженно-деформированного состояния, то при повторном нагружении до того же уровня щелчки не будут зарегистрированы, пока это механическое напряжение не будет превзойдено. Поэтому, если трубопровод или сосуд прошел стадию "опрессовки" давлением, более высоким, чем рабочее давление, например, при сдаче объекта в эксплуатацию, то зарегистрированный шум не будет отражать характеристику фактического напряженного состояния.

На показания приборов, основанных на эффекте АЭ, влияет упругий гистерезис, то есть предыстория напряженно-деформированного состояния конструкции и многие другие факторы. На показания приборов АЭ влияет состояние поверхностного слоя металла "зоны наклепа", где напряжения превышают напряжения основного металла в тысячи раз. Эта зона

порождает шум, который надо уметь фильтровать, что делают не все типы приборов АЭ. Карты концентраторов напряжений, а тем более, консультаций, эти приборы не дают – приборы АЭ фактически не измеряют механических напряжений. Стоимость полного комплекта аппаратуры АЭ от \$17.000 до \$120.000. Эти и другие недостатки существенно ограничивают область применения метода АЭ. [5]

Для приёма сигналов АЭ и их регистрации технически более удобно оперировать электрическими сигналами, полученными в результате преобразования части энергии колебаний в электрическую энергию, так как дальнейшая обработка информации может быть выполнена с помощью электронной аппаратуры [13]. Однако это не исключает использование 1 четких и других бесконтактных методов измерения АЭ, к основным достоинствам которых следует отнести: 1) отсутствие необходимости в этическом контакте датчика с исследуемым объектом; 2) возможность исследования АЭ при высоких (выше точки Кюри для пьезопреобразователей) температурах; 3) безинерционность, отсутствие разброса характеристик, малую площадь исследуемого объекта.

Однако на практике наибольшее распространение получили комплекты и приборы для измерения сигналов АЭ, в качестве чувствительного элемента которых используется пьезокерамика, при выборе которой необходимо учитывать температуру Кюри, механическую прочность и другие эксплуатационные характеристики, изложенные в ГОСТ 1392-68 [12].

1.2. Метод вибродиагностики.

Диагностирование состояния машин и оценка степени опасности повреждения на основе данных контроля вибрации – один из наиболее эффективных методов повышения надежности оборудования.

Вибрационное диагностирование объектов проводится в три этапа:

первичное описание вибрационного состояния объекта, выделение признаков и принятие решения. На этапе поиска информативных признаков ограничивают число измеряемых параметров вибрации, шума и ударов. При этом из множества параметров, характеризующих вибрационный процесс, выделяют только те, которые прямо или косвенно характеризуют состояние объекта. По этим параметрам формируют информативную систему признаков, используемых при диагностировании.

Выбор диагностических параметров вибрации зависит от типов исследуемых механизмов, амплитудного и частотного диапазонов измеряемых на них колебаний. В низкочастотном диапазоне чаще измеряют параметры виброперемещения. В нашем случае речь и пойдет о виброперемещении. Виброперемещение представляет интерес в тех случаях, когда необходимо знать относительное смещение объекта или деформацию и математически описывается как моногармоническая вибрация $x(t)=X_0 \sin (\omega t + \varphi)$, где X_0 -амплитуда виброперемещения.

Как отмечалось выше, в описании метода акустической эмиссии, для правильной диагностики необходимо своевременно и точно выявлять источники, в данном случае, вибрации. Здесь мы сталкиваемся с немаловажной проблемой отделения и фильтрации паразитной вибрации различных узлов станка, плохо закреплённой заготовки и т. д. Также очень важно точно определять место опасной вибрации. Для всего этого нужна высокоточная аппаратура, которая в силу своей сложности, слишком дорога для использования в серийном производстве каких-либо деталей.

1.3. Термоэлектрические явления и метод термоэлектрической диагностики.

Термоэлектрические явления- -совокупность физических явлений, обусловленных взаимосвязью между тепловыми и электрическими

процессами в твердых проводниках. К термоэлектрическим явлениям относятся Зеебека эффект, Пельтье эффект и Томсона эффект. Причина термоэлектрических явлений—нарушение теплового равновесия в потоке

Зеебека эффект – возникновение электрической цепи, состоящей из разнородных проводников, контакты которых имеют различную температуру. Открыт в 1821 году немецким физиком Т.И. Зеебеком (Th. I. Seebeck).

Если электрическая цепь состоит из двух различных проводников, она называется термоэлементом или термопарой. Величина термо – э.д.с. зависит только от температур горячего T_1 и холодного T_2 контактов и от материалов проводников, В небольшом интервале температур электродвижущая сила ε равна $\varepsilon = \alpha (T_1 - T_2)$. Коэффициент α называется коэффициентом Зеебека (термоэлектрической способностью пары, термоенлой, коэффициентом термо-э.д.с. или удельной термо-э.д.с.), зависящей от материала проводников и интервала температур (см. табл. 1).

Таблица 1.

Значение α для некоторых металлов и сплавов по отношению к свинцу,

Материал	α , мкВ/К	Материал	α , мкВ/К
Сурьма	+4,3	Ртуть	-4,4
Железо	+15,0	Платина	-4,4
Молибден	+7,6	Натрий	-6,5
Кадмий	+4,6	Палладий	-8,9
Вольфрам	+3,6	Калий	+13,8
Медь	+3,2	Никель	-20,8
Цинк	+3,1	Висмут	-68,0
Золото	+2,9	Хромель	+24,0

Серебро	+2,7	Нихром	+18,0
Свинец	0,0	Платино-родий	+2,0
Олова	-0,2	Алюмель	-17,0
Магний	-0,0	Константан	-38,0
Алюминий	-0,4	Копель	-38,0

Знак плюс указывает, что ток течет от свинца к данному металлу через более нагретый спай, а знак минус - через холодный спай.

Цифры, приведенные в таблице, условны, так как термо-э.д.с. чувствительно к микроскопическим количествам примесей, к ориентации кристаллических зерен. Термо-э.д.с. может возникнуть в цепи, состоящей и из одного материала, если его разные участки подвергались различным технологическим операциям. Она не меняется при последовательном включении в цепи любого количества других материалов, если появляющиеся при этом дополнительные места контактов поддерживают при одной и той же температуре.

Если вдоль проводника существует градиент температур, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости. В полупроводниках, кроме того, концентрация электронов растет с температурой. В результате возникает поток электронов растет от горячен, конца к холодному, на холодном конце накапливается отрицательный заряд, и горячем остается некомпенсированный положительный заряд. Накопление заряда продолжается до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет равный обратный поток электронов. Алгебраическая сумма таких разностей потенциалов в цепи создает одну из составляющих термо-э.д.с., которую называют объемной. Другие составляющие термо-э.д.с. с температурной зависимостью контактной разности потенциалов и с эффектом увеличения электронов фононами.

Так как число фононов, движущихся от горячего конца к холодному, больше, чем движущихся навстречу, то результате увеличения ими электронов на холодном конце накапливается отрицательный заряд. Эта составляющая термо-э.д.х. при низких температурах может быть в десятки и сотни раз больше других. В магнетиках играет роль также увеличение электронов магнонами (квазичастица, соответствующая волне поворотов спинов в магнитоупорядоченных средах. Магноны проявляют себя в тепловых, высокочастотных и других свойствах вещества).

Термо-э.д.с. металлов очень мала. Сравнительно больше термо-э.д.с. в полуметаллах и их сплавах, а также в некоторых переходных металлах и их сплавах.

Эффект Пельтье—выделение или поглощение теплоты при прохождении электрического тока I через контакт двух различных проводников. Выделение теплоты, сменится поглощением при изменении направления тока. Эффект открыт французским физиком Ж. Пельтье в 1834 году. Количество теплоты $Q_n = \Pi I$, где Π - коэффициент Пельтье, равный: $\Pi = T \Delta\alpha$. Здесь T - абсолютная температура. $\Delta\alpha$ - разность термоэлектрических коэффициентов проводников.

Эффект Пельтье объясняется тем, что средняя энергия носителей тока зависит от их энергетического спектра, концентрации и механизмов их рассеяния и поэтому в разных проводниках различна. При переходе из одного проводника в другой электроны либо передают избыточную энергию атомам, либо пополняют недостаток энергии за их счёт. В первом случае вблизи контакта выделяется, а во втором поглощается теплота Пельтье. При переходе электронов из полупроводников в металл энергия электронов проводимости полупроводника значительно выше уровня Ферми металла, и электрон отдаёт свою избыточную энергию. При

противоположном направлении тока из металла в полупроводник могут перейти только те электроны, энергии которых выше диапазоны проводимости полупроводника. Тепловое равновесие в металле при этом нарушается и восстанавливается за счет тепловых колебаний кристаллической решетки. При этом поглощается теплота Пельтье. На контакте двух полупроводников или двух металлов также выделяется (или поглощается) теплота Пельтье вследствие того, что средняя энергия носителей заряда по обе стороны контакта различна.

Эффект Томсона—выделение или поглощение теплоты в проводнике с током, вдоль которого имеется градиент температуры, происходящее помимо выделения джоулевой теплоты. Теплота Томсона Q , пропорциональна силе тока I , времени t и перепаду температуры (T_1-T_2) .

$$Q_s = S(T_1 - T_2) I t$$

Коэффициент Томсона S - характеристика проводника. "Эффект Томсона предсказан в 1856 году английским физиком У. Томсоном (лорд Кельвин) и установлен экспериментально французским физиком Леру и др.

Согласно теории Томсона, удельная термо-э.д.с. пары проводников связана с их коэффициентами S_1 и S_2 соотношением: $dd / d\pi = (S_1 - S_2) / T$,

где α - коэффициент Зеебека.

Если вдоль проводника, по которому протекает ток, существует градиент температуры, причем направление тока соответствует движению электронов от горячего конца к холодному. То при переходе из более нагретого участка в более холодный электроны тормозятся и передают избыточную энергию окружающим атомам (выделяется теплота), при обратном направлении тока электроны, переходя из более холодного участка в более горячий, ускоряются полем термо-э.д.с. и пополняют свою энергию за счет энергии окружающих атомов (теплота поглощается). Этим и объясняется, в первом приближении, эффект Томсона.

1.3.1. Термоэлектрический метод диагностики.

Одним из параметров, характеризующих протекание процесса резания является температура в зоне резания. Количественно оценить температуру в зоне стружкообразования весьма заманчиво и непросто. С давних пор изыскиваются различные методы.

Наибольшее применение для измерения нашли различные варианты решений, основ эффекта Зеебека.

В России для изучения процесса резания металла термоэлектрический метод впервые (.может быть и впервые в мире) использован и опубликован [4] Усачевым Я.Г. в 1915году.

Преимущества этого метода трудно переоценить, ибо в век компьютерной обработки информации необходимо все и электрические параметры и измеряемые величины неизбежно преобразовывать в электрический сигнал.

При нагреве, в зоне контакта двух химически разнородных металлов или сплавов, возникает электрический сигнал без подачи энергии извне. Измерительный преобразователь сам генерирует электрическую энергию, т.е. является генераторным датчиком. Источник энергии который неизбежно требуется вводить в измерительную цепь с параметрическими преобразователями неэлектрических величин, здесь обеспечен самим термоэлектрическим эффектом.

В металлах и полупроводниках процессы переноса заряда (электрический ток) и энергии взаимосвязаны, так как осуществляются посредством перемещения подвижных носителей тока - электронов проводимости и дырок.

Возникновение электродвижущей силы E в замкнутой электрической цепи, составленной из последовательно соединенных разнородных проводников, если места их контакта (спаи) поддерживают при различных

температурах, будет равна

$$E = -\oint_D \alpha dT \quad (1)$$

здесь интегрирование производится по всему замкнутому контуру L электрической цепи.

Эта математическая модель, описывающая эффект Зеебека, отражает идеализацию реального физического объекта. Контур L представляется как нитевидный, описываемый только одним линейным размером проводника – его длиной. Свойство α и температура T , являются функциями длины. Такой моделью утверждается, что термо-э.д.с. может быть определена только при обходе по замкнутому контуру. В разомкнутом контуре термо-э.д.с. не существует. Она тождественно равно нулю при плотности тока в термоэлектродах равной нулю (при отсутствии тока в проводниках термопары).

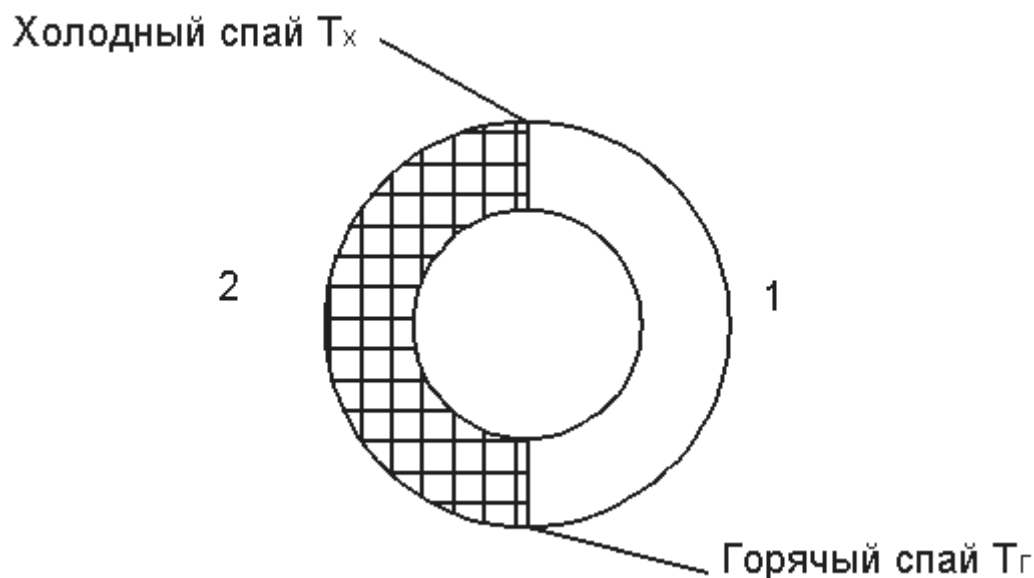


Рис. 1.2. Схема термоэлемента.

Простейшую замкнутую электрическую цепь (рис 1.2.), состоящую из двух разнородных проводников 1 и 2, называют термоэлементом, или термопарой.

Если T_z и T_x - температуры горячего и холодного спаев термоэлемента, то, при выбранном на рис.1.2., направлении обхода цепи по часовой стрелке, термо-э.д.с. термоэлемента равна

$$E = -\int_{T_x}^{T_z} \alpha_1 dT - \int_{T_x}^{T_z} \alpha_2 dT = \int_{T_x}^{T_z} \alpha_{12} dT \quad (2)$$

где α_1 и α_2 , - значения удельной термоэлектродвижущей силы для двух различных материалов 1 и 2 ветвей термоэлемента, $\alpha_{12} = \alpha_2 - \alpha_1$ - удельная дифференциальная термоэлектродвижущая сила для данной пары материалов:

$$\alpha_{12} = dE/dT$$

Здесь следует отметить, что коэффициент α_{12} представляет собой чувствительность - одну из основных метрологических характеристик преобразователя.

Если интервал температур $T_z - T_x$ невелик, то в его пределах можно считать, что α - постоянная величина и

$$E = \alpha_{12} (T_z - T_x) \quad (3)$$

При $\alpha_{12} > 0$ $E > 0$. В противном случае ток идет в обратном направлении.

В горячем спае термоэлемента термоток всегда идет из ветви с меньшим значением α в ветвь с большим значением α .

Если в разрыв одной из ветвей термоэлемента включить последовательно любое число проводников другого состава, все спаи которых термостатированы, т.е. поддерживаются при одной и той же температуре, то термо-э.д.с. в такой цепи будет равно термо - э.д.с. исходного термоэлемента.

Практически их всех металлов, сплавов, а также графита могут быть

образованы термопары.

Они удовлетворяют многим требованиям идеального преобразователя. Термопары просты, надежны в работе - и состоят, по существу, из двух термоэлектродов. Их конструктивные формы позволяют обеспечивать малый показатель тепловой инерции. Выбирая соответствующие материалы термоэлектродов, можно проводить измерения температур в широком диапазоне (от 2 до 3000 K). При этом достигается высокая точность преобразования (инструментальная погрешность до 0,01 K) и высокая чувствительность (до 100 $\mu V/K$).

Если материалы термоэлектродов однородны, изотропны и не претерпевают физических или химических изменений, то зависимость термо-э.д.с. термопары от температуры хорошо воспроизводима. В связи с этим преобразователи, термопары которых изготовлены из одной и той же партии термоэлектродов, могут быть полностью взаимозаменяемы.

Перечисленные выше достоинства термопар могут быть реализованы только при соблюдении общих правил конструирования термоэлектрических измерительных цепей, из которых следует:

- Термо-э.д.с. возникающая в замкнутой цепи, зависит только от температуры спаев и не зависит от распределения температуры по длине проводников только для пары однородных, изотопных проводников.

- Неоднородность проводника допустима только в изотермической области.

- Неоднородность допустима только в однородном проводнике.

- При введении в цепь термопары прибора для измерения термо-э.д.с. необходима обеспечить его изотермичность.

- Каждый идеально чистый проводник имеет собственную термо-э.д.с., а наличие в проводнике даже минимального количества примесей заметно влияет на ее значение.

1.3.2. Термо - э.д.с. при точкнии.

Влияние электрического тока, возникающего при трении металлических тел, на их износ впервые на страницах технической литературы был поднят П.Л. Гордиенко и С.Л. Гордиенко [12]. Почти одновременно с ними выдвинул свою энергетическую теорию процесса трения и износа А. Д. Дубинин [20],

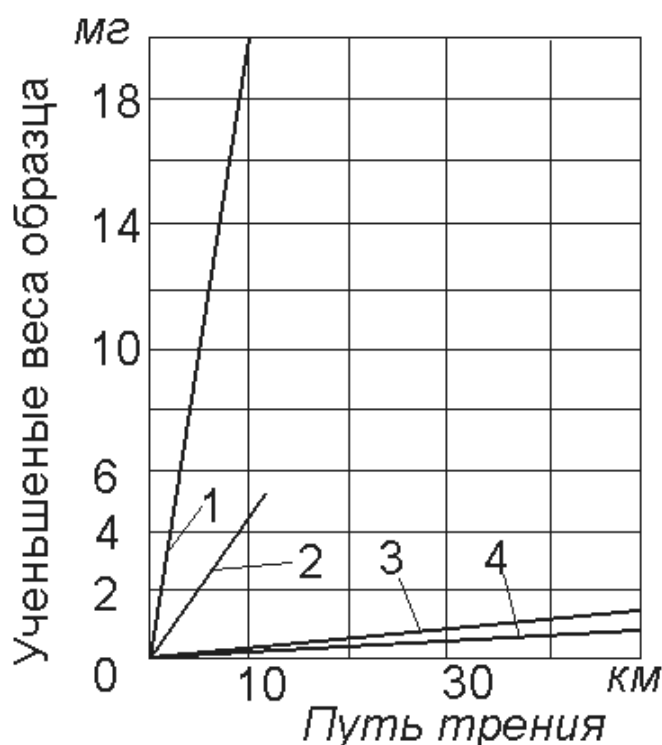


Рис. 1.3. Результаты опытов П.Л. Гордиенко и С.Л. Гордиенко (кривые 1 – 4 соответствуют схемам б – д подвода тока)

П.Л. Гордиенко и С.Л. Гордиенко провели эксперимент, сущность и результаты которого сводятся к следующему. Два бронзовых образца, электрически изолированные друг от друга и от корпуса установки, истирались о торцовую поверхность закаленного стального диска. Взвешиванием определяли износ одного из образцов. Другой образец выполнял функции контактной щетки. Опыты приводились при скорости и трения истираемого образца $v_u - 750$ м/мин и удельном давлении $q = 1.6$ кг/см². Скорость трения образца-щетки составляла $v_u = 660$ м/мин. При этом

было исследовано влияние на износ бронзового образца; постоянного тока ($E=1 \text{ В}$, $I=6 \text{ А}$) от внешнего источника, положительный полюс которого соединялся с истираемым образцом; постоянного тока ($E=1 \text{ В}$, $I=6 \text{ А}$) от внешнего источника, отрицательный полюс которого соединялся с истираемым образцом; термотока, возникающего при трении по стальному образцу двух соединенных проводником бронзовых образцов при разности скоростей их истирания $v_u - v_{ц} = 90 \text{ м/мин}$; термотока, возникающего на площадке контакта исследуемого образца с трущим диском вследствие различия в скорости трения на отдельных участках этой площадки.

Результаты данного исследования представлены на рис. 1.3. Наибольший износ при трении бронзы по закаленной стали наблюдается в случае движения постоянного тока от образца к диску. При изменении полярности износ уменьшается примерно в 4 раза. Без подвода электрического тока от внешнего источника при замкнутой проводником электрической цепи, образованной термо-электроэлементами бронзовый образец - стальной диск, износ резко уменьшился. Наименьший износ получился тогда, когда образец не составлял части электрической цепи, по которой протекал ток. Таким образом, П.Л. Гордиенко и С.Л. Гордиенко экспериментально показали, что электрический ток, независимо от его происхождения, проходя через поверхности контакта трущихся тел, отрицательно влияет на их износостойкость. Их опыты свидетельствуют о том, что устранение тока между трущимися поверхности приводит уменьшению износа. А.Д. Дубинин исследовал явление возникновения электрического тока при различных видах взаимодействия твердых тел, и частности, при обработке резанием. Он пришел к выводу, что не только при трении, но и при любых других видах воздействия на поверхностные слои твердого тела в них возникает разность потенциалов с протеканием электрического тока.

Величина потенциалов и их характер зависят от всех тех факторов, которые влияют на величину износа трущихся поверхностей, т. е. от давления, скорости, вида движения, материала трущихся тел, состояния трущихся поверхностей, сорта и качества смазки и т. д.

Отмечая, что изменение потенциалов в процессе трения связано с воздействием электрических импульсов на поверхность трущихся пар, А. Д. Дубинин высказывает предположение, что нахождение зависимостей изменения потенциалов в поверхностных слоях трущихся пар от различных факторов дал возможность установить связь этих потенциалов с величиной износа трущихся поверхностей, поскольку приращение потенциала характеризует процесс увеличения энергии в поверхностном слое трущейся пары и является эквивалентной величиной количества массы в поверхностном слое, разрушаемой в процессе трения [20].

Х. Аксер изучал влияние термотока, возникающего в контуре станок—инструмент—изделие—станок (СИИС), на износ твердосплавных токарных резцов. [42].

Первые его исследования, о которых он доложил на VI Аахенском коллоквиуме специалистов по станкам и резанию, показали, что термоток в значительной мере влияет на износ инструмента. Термо-э.д.с, возникающую при резании, Х. Аксер справедливо считает первопричиной электрического тока, циркулирующего по контуру СИИС. Но он утверждает, что электрический контур СИИС обладает ничтожно малым сопротивлением прохождению электрического тока и на этом основании делает вывод, что небольшая термо-э.д.с. способна вызвать сравнительно большой ток в контуре СИИС.

Для борьбы с вредным влиянием термотока, возникающего при резании, на стойкость твердосплавного резца Х. Аксер применил метод компенсации. При этом в зону контакта резца с обрабатываемой деталью от

постороннего источника через делитель напряжения и сопротивление вводилась э.д.с. полярность которой была противоположна полярности термо-э.д.с., а величина равнялась, величине термо-э.д.с. Опыты проводились при несвободном чистовом точении ($t = 0,2 \text{ мм}; s = 0,28 \text{ мм/об}$) различных сталей резцами, оснащенными пластинами из твердого сплава марки ТТЗ. В качестве критерия затупления резца принимался его износ по задней поверхности. Результаты сравнительных стойкостных испытаний резцов, работавших в обычных условиях и с компенсацией термо-э.д.с. показали, что при компенсации термотока стойкость твердосплавных резцов увеличивается в 2-3 раза.

Проанализировав эти результаты, Х. Аксер высказал предположение, что влияние термотока на износ инструмента проявляется в интенсификации электрическим током химических процессов, происходящих в зоне резания.

Х. Опитц, анализируя результаты исследований Х. Аксера, обратил внимание, в частности, на то, что компенсационный метод борьбы с износом существенно уменьшает износ задней поверхности резца, но не оказывает заметного влияния на износ его передней поверхности [44].

Эффективность перечисленных в предыдущем разделе методов борьбы с вредным влиянием термотока, возникающего при резании, на износостойкость инструмента исследовалась преимущественно в лабораторных условиях при точении образцов из различных сталей резцами из твердых сплавов вольфрамо - кобальтовой, титано - вольфрамо – кобальтовой и тантало – титано – вольфрамо – кобальтовой групп. Кроме названных выше исследователей, таким исследованиями занимались А. А. Аваков с учениками [6, 7] Ю. М. Коробов [24, 26] и др. Производственных испытаний, кроме Х. Аксер [42], практически никто не проводил. Все названные исследователи, за исключением Г. Энгстранда, наблюдали

повышение стойкости твердосплавных резцов. При этом подавляющее большинство названных авторов не приводят сведений об истинных величинах термо-э.д.с. возникающих при точении, или термотоков, протекающих по контуру СИИС.

Необходимость же получения объективных сведений о величине термо- э.д.с. или термотока, возникающих при точении, вызывается также тем, что эти сведения часто используются для определения, так называемой, температуры резания, т. е. температуры нагрева, поверхностей контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой деталью. Значения этой температуры представляют наибольший интерес для определения износостойкости инструмента.

Как показали исследования, проведенные В.А. Бобровским под руководством А.М. Даниеляна [16], на величину термо – э.д.с., возникающей при точении твердосплавными инструментами, значительное влияние оказывает даже конструкция резца.

Исследуя эффективность различных методов борьбы с вредным влиянием термотоков на износ инструмента, В.А. Бобровский измерял, в частности, величины термо-э.д.с., возникающих при точении образцов из различных сталей резцами с механическим креплением неперетачиваемых пластин из твердых сплавов ВК6 и Т15К6. Опыты проводились на станке мод.1620. Обработывались образцы из сталей 45, 40Х, 12ХНЗА, I8Х2Н4ВА, У7 и 34ХН1М (по ТУ МТ и ТМ 31–7–54). Державки резцов были изготовлены из тех же сталей, которые подвергались обработке.

В результате было установлено, что в случае, когда сталь данной марки обрабатывается резцом с державкой из той же стали, значения регистрируемых величин результирующей термо-э.д.с. получаются, как правило, меньшими, чем при обработке резцом с державкой из другой стали. Своеобразное исключение наблюдалось лишь при обработке образцов

сталей 12ХН3А и 18Х2Н4ВА резцом с державкой из стали У7. В этом случае значения регистрируемых термо – э.д.с. получались наименьшими. Эти явления можно объяснить только тем, что при прогреве режущей пластины в зоне контакта ее с державкой возникает термо– э.д.с., знак которой в замкнутом контуре СИИС противоположен знаку термо – э.д.с., возникающей в зоне резания. Справедливость такого объяснения подтверждается тем, что в данном случае величина регистрируемой термо – э.д.с. с возрастанием времени резания не увеличивается, как этого можно было ожидать, а, наоборот, уменьшается вследствие более сильного прогрева зоны контакта режущей пластины с державкой. Следовательно, в этом случае имеет места своеобразная частичная компенсация термо – э.д.с., возникающей в зоне резане. А так как пара твердый сплав — сталь У7 характеризуется наибольшим коэффициентом термо – э.д.с., то при прогреве зоны контакта твердосплавной пластины с державкой из стали У7 имеет место наибольшая компенсация.

Из изложенного выше следует; для уменьшения величины термоотоков, циркулирующих по контуру СИИС при резании, а тем самым и уменьшения вредного влияния термоотоков на износ инструмента, державки составных инструментов следует изготавливать (там, где это возможно) из того же материала, который подвергается обработке. В то же время рассмотренные опыты, как и вышеупомянутое исследование [16], убеждают в том, что при измерении температуры резания термопарой инструмент – деталь применение в качестве одного из термоэлектродов составного резца может привести к получению значений температуры резания, весьма далеких от фактических.

На величину регистрируемом при резании результирующей термо – э.д.с., а тем самым на точность определения термопарой инструмент – деталь температуры резания могут влиять (как правило, незначительно)

термо - э.д.с., возникающие в трущихся парах станка. Если при определении температуры резания термопарой инструмент—деталь в качестве регистрирующего прибора используют милливольтметр или электронный осциллограф с большим внутренним сопротивлением, то сопротивление контура СИИС практически не влияет на точность определения величины результирующей термо-э.д.с. Если же в качестве регистрирующего прибора используется миллиамперметр или гальванометр магнитоэлектрического осциллографа со сравнительно малым внутренним сопротивлением, то сопротивление контура СИИС может существенно повлиять на величину регистрируемого термотока, а тем самым и на величину определяемой таким способом температуры резания. В этом исследовании проверялось влияние способа включения регистрирующего прибора в контур термопары инструмент— деталь на регистрируемую величину термотока (температуры резания). Опыты проводились при точении образцов из стали 45 на станках мод. 1К62 и ЛТ-10 цельным резцом из твердого сплава марки Т30К4. Резец имел размеры 20 x 20 x 120 мм и геометрию режущей части: $\gamma = 10^\circ$; $\alpha = \alpha_1 = 8^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi = 18^\circ$; $\lambda = + 5^\circ$; $R = 0,5 \text{ мм}$. Глубина резания принималась равной $t = 1 \text{ мм}$ и $t = 1,5 \text{ мм}$; подача $s = 0,21 \text{ мм/об}$; скорость резания изменяли в пределах 4 – 473 м/мин. Термоток регистрировали с помощью гальванометра VIII группы (собственное сопротивление $R_{г} = 11,7 \text{ Ом}$) магнитоэлектрического обрабатываемая деталь и резец изолированы от станка, то изменение варианта подключения гальванометра к детали почти не влияет на регистрируемую величину термотока, причем эта величина с увеличением скорости резания все время только возрастает. Интенсивность роста регистрируемой величины термотока (иначе говоря, роста температуры резания) с увеличением скорости резания уменьшается.

Снижение роста температуры резания при увеличении скорости

резания отмечалось многими исследователями, начиная с Я. Г. Усачева [4], и получило те или иные объяснения. Правда, в большинстве случаев такие объяснения даются односторонне, без учета всей сложности явления [38], а иногда и неправильно.

Температура резания, несомненно, зависит от прочностных характеристик металлов стружки и инструмента, находящихся в контакте. При прочих равных условиях температура будет тем выше, чем прочнее обрабатываемый материал, так как и работа трения и работа деформации в этом случае будут больше. Увеличение скорости резания сопровождается повышением как температуры основной массы стружки вследствие деформации, так и, главным образом, повышением температуры прирезового слоя стружки в результате увеличивающейся работы трения. При этом термодатчик – деталь градуировали в соответствии с рекомендациями, содержащимися в работе [16].

Было проведено три серии опытов. В первой серии резец и деталь электрически изолировались от станка; во второй серии изолировался от станка только резец; в третьей серии ни резец, ни деталь от станка не изолировались. Резец к гальванометру во всех случаях подключался непосредственно с помощью медного провода, припаянного к резцу. Обрабатываемая деталь подключалась к гальванометру различными способами.

Результаты измерения термотока при проведении всех этих опытов на станке мод. 1К62 представлены на рис. 1.4. Если повышение температуры приводит к изменению прочностных характеристик обрабатываемого металла, особенно в прирезовом слое: прочность этого слоя, по-видимому, начнет снижаться. Этим в первую очередь и можно объяснить уменьшение интенсивности роста температуры резания с повышением скорости.

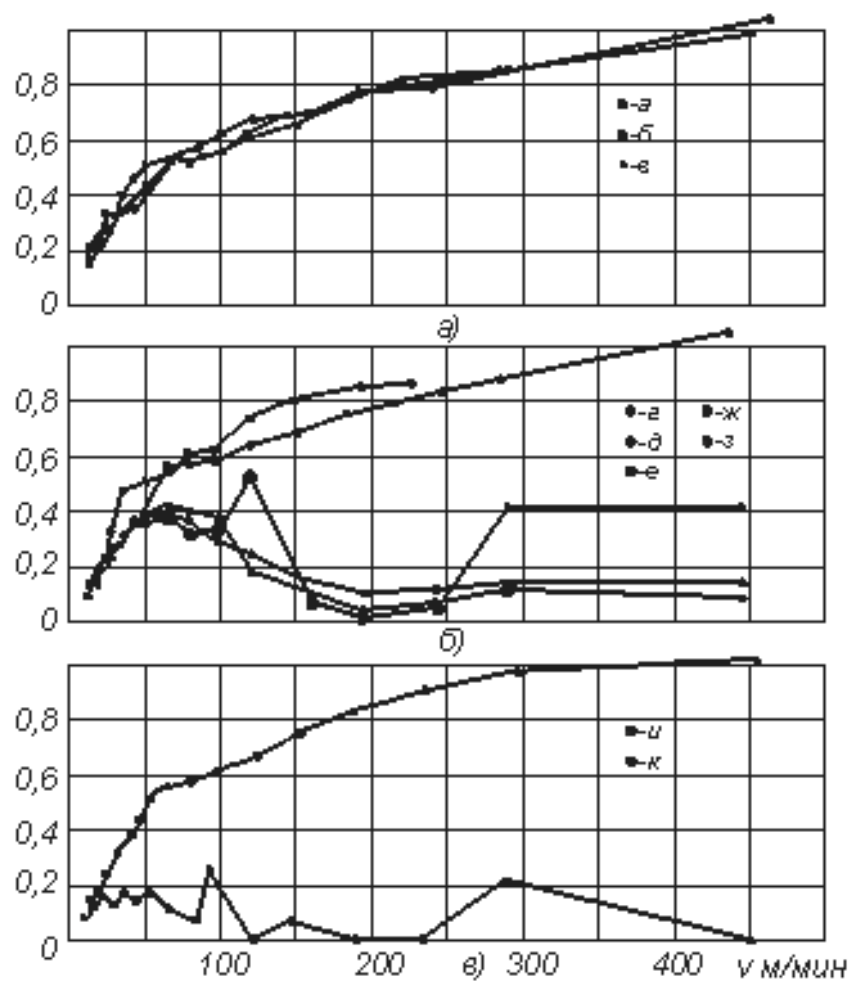


Рис.1.4. Зависимость величины термотока от скорости резания при различных вариантах включения регистрирующего прибора в цепь термопары инструмент – деталь

Опытные данные Н. Н. Зорева, Т. Н. Лоладзе и ряда других исследователей, по исследованию влияния ширины отрицательной фаски на резце с двойкой передней поверхностью на различные факторы резания [1], свидетельствуют о том, что увеличение скорости резания приводит к уменьшению длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Этот фактор, приводя к уменьшению пути трения стружки о переднюю поверхность резца, должен приводить к снижению интенсивности роста температуры резания с повышением скорости. Аналогичным, очевидно, должно быть действие изменения

условий теплоотвода с повышением скорости резания: количество тепла, остающегося в стружке, увеличивается, а количество тепла, отводимого в обрабатываемую деталь и в резец, уменьшается. Теоретические изыскания М. П. Левицкого [30, 31] и других авторов [15, 28 др.] по этому вопросу нашли экспериментальное подтверждение в работе С. С. Можаява [34]. Его экспериментальные данные приведены на рис. 1.5.

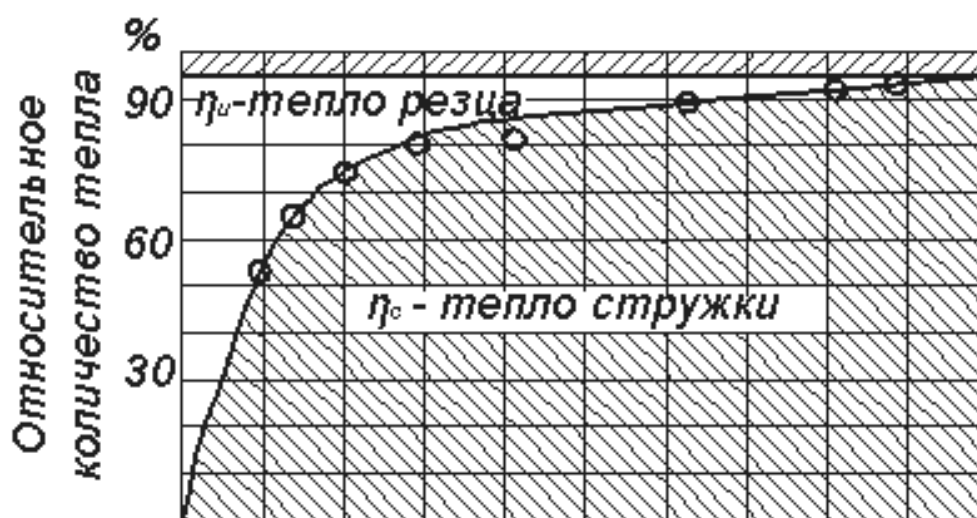


Рис.1.5. Распределения тепла между стружкой и инструментом в зависимости от скорости резания при точения образцов из стали ($t - 2$ мм, $s - 0,218$ мм/об) резцом из твердого сплава Т15К6 ($\gamma = -10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\phi = 35^\circ$, $\lambda = 0^\circ$) [34].

Кроме сказанного, нужно еще отметить следующее. При увеличении скорости резания уменьшается время контакта стружки с инструментом, время деформации на поверхности сдвигов и в пределах углов и влияние снижения прочностных характеристик металла на уменьшение температуры резания. При повышении температуры деформации уменьшается интенсивность снижения прочностных характеристик всех металлов, включая и стали (при температуре, большей, чем температура зоны дисперсионного твердения). Следовательно, ожидать непрерывного уменьшения роста температуры резания с повышением скорости резания

(в пределах скоростей резания, применяемых на практике в промышленности и в исследовательских работах) не приходится.

Таким образом, зафиксированные при использовании вариантов о, б, в, е, ж и к зависимости величины термотока от скорости резания (см. рис. 1.4.) вполне объяснимы и хорошо согласуются с данными температурных исследований многих авторов. Во всех этих вариантах в контуре термопары резец деталь содержатся только такие элементы, сопротивление которых условно можно назвать, «сопротивлением станка», и внутреннее сопротивление термоэлемента инструмент—деталь.

1.3.3. Термо-э.д.с. при сверлении.

Выше отмечалось, что эффективность различных методов борьбы с влиянием термотоков на износ инструмента исследовалась преимущественно при точении стальных деталей твердосплавными резцами. Лишь М.Т. Галей исследовал эффективность метода противотока при сверлении стали 45 сверлами из быстрорежущих сталей марки P18 и марки M 1 производства США [6]. В результате проведения этих опытов М.Т. Галей установил, что при вводе в зону резания противотока оптимальной величины стойкость сверл повышается в 2—4 раза. Этим впервые было доказано, что возникающие при резании термотоки отрицательно влияют на стойкость режущих инструментов не только из твердых сплавов, но и из быстрорежущих сталей.

Исследование интенсивности и характера изменения величины результирующего термотока в зависимости от глубины сверления глухих и сквозных отверстий осуществил В.А. Бобровский [2].

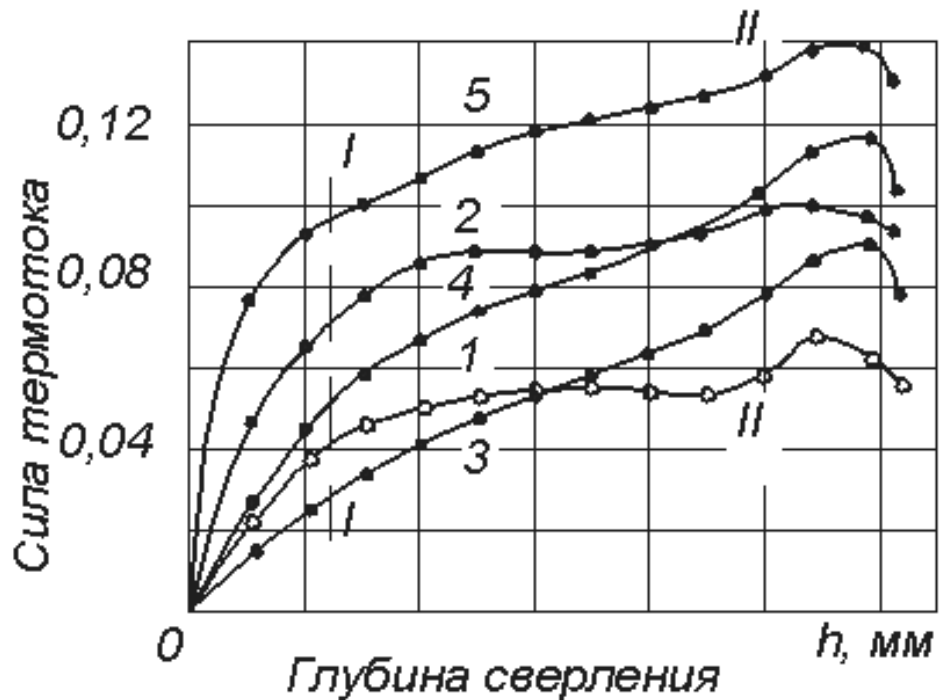


Рис.1.6. Зависимость регистрируемой величины термотока от глубины сверления сплошного образца из стали У8 сверлом из стали Р18 ($D=24\text{мм}$) с различными скоростями резания при $s = 0,2\text{мм/об}$;

1 – $v = 14,7\text{м/мин}$, с охлаждением; 2 – $v = 30,2\text{м/мин}$, с охлаждением;

3 – $v = 7,55\text{м/мин}$, без охлаждением; 4 – $v = 14,7\text{м/мин}$, без охлаждением;

5 – $v = 30,2\text{м/мин}$, без охлаждением;

Некоторые результаты представлены на рис. 1.6. и на рис.1.7.

Анализ полученных данных показали, что величина термотока по мере углубления сверла в образец интенсивно нарастает от момента первоначального касания поперечной кромки сверла о заготовку до момента врезания сверла в образец на всю длину заборного конуса (линия 1—1). При дальнейшем углублении сверла в образец величина термотока продолжает увеличиваться не только до начала выхода сверли из образца (линия II-II) но и вплоть до того момента, когда примерно половина заборного конуса сверла выйдет из образца. После этого регистрируемая величина термотока начинает резко уменьшаться.

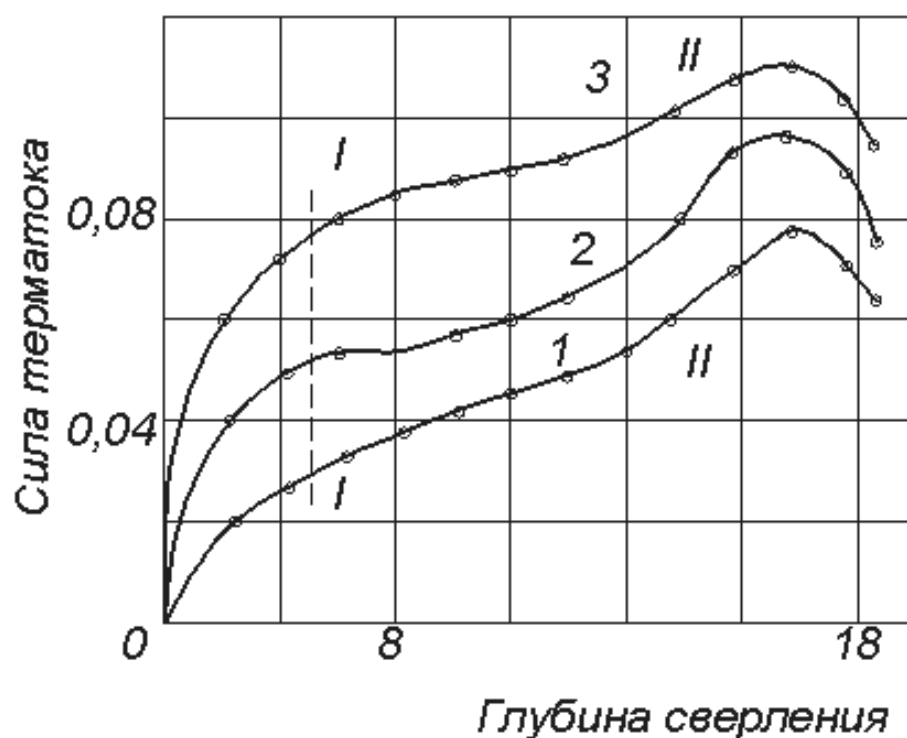


Рис.1.7. Зависимость регистрируемой величины термотока от глубины сверления сплошного образца из стали 45 сверлом из стали P18 ($D=24\text{мм}$) с различными скоростями резания при $s = 0,2\text{мм/об}$;

$1 - v = 7,55\text{м/мин}$, $2 - v = 14,7\text{м/мин}$, $3 - v = 30,2\text{м/мин}$,

Графики, характеризующие изменение величины термотока при врезании сверла по всю длину заборного конуса и при выходе сверла из образца при сквозном сверлении приведены на рис. 1.8.

Процесс врезания сверла характерен тем, что по мере его углубления в обрабатываемый образец, наряду с уже работающими участками режущих кромок сверла, в работу вступают все более удаленные от оси инструмента участки. Процесс врезания сверла сопровождается непрерывным возрастанием регистрируемой величины термотока (рис.1.8., а). В отличие от картины, наблюдаемой при врезании сверла, наибольшие значения величины термотока регистрируются тогда, когда у сверла работает примерно половина длины режущих кромок. Такой характер изменения регистрируемой величины термотока по мере выхода заборного конуса

сверла из образца в известной мере связан с изменением величины осевой силы и удельного давления в зоне резания. Если при врезании заборного конуса в образец наблюдается только возрастание осевой силы, то при выходе режущих кромок в образец тоже наблюдается сначала некоторое увеличение осевой силы, а затем резкое ее уменьшение (рис. 1.8., б).

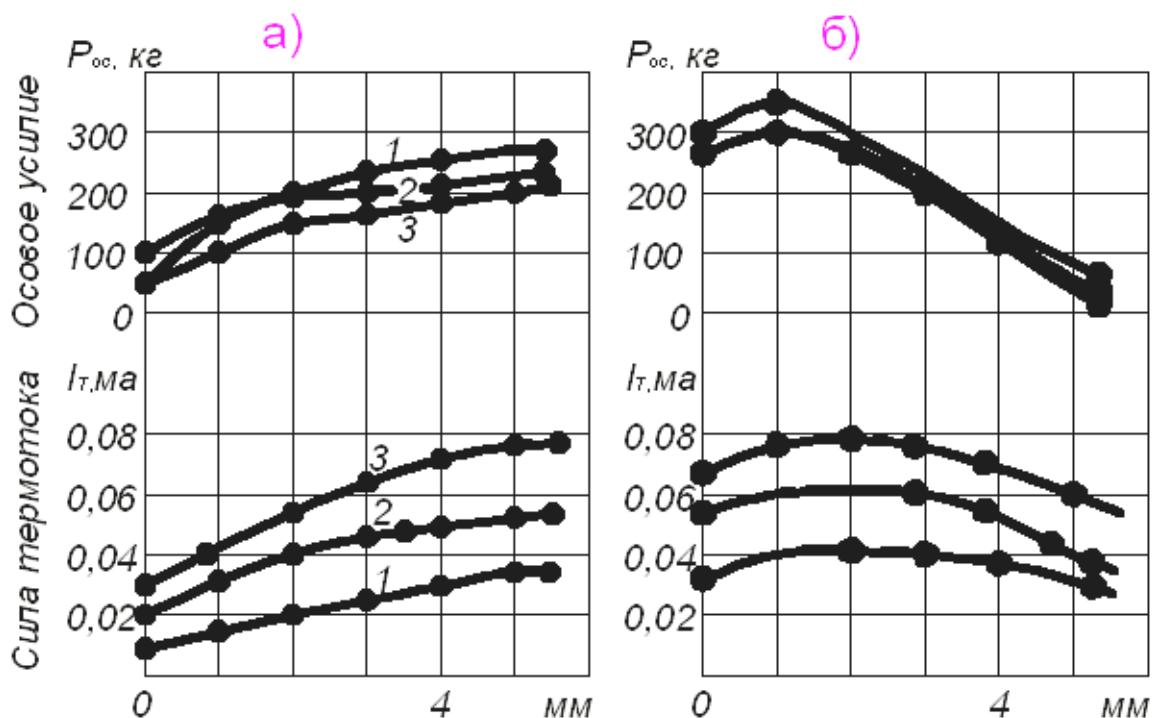


Рис.1.8. Влияние глубины врезания сверла и величины его выхода из сплошного образца на осевую силу и регистрируемый термоток при сверлении без охлаждения стали 45 сверлом из стали P18 диаметром 24 мм ($s=0,2\text{мм/об}$)

1 – $v = 7,55\text{м/мин}$, 2 – $v = 14,7\text{м/мин}$, 3 – $v = 30,2\text{м/мин}$

Для измерения термотока, вызываемого действием термо – э.д.с., возникающих на разных участках режущей кромки сверла, и проходящего по внешней цепи контура СИИС, был использован метод сверления тонкостенных трубок. Сущность метода состоит в измерении термотока, прогоняющего по контуру СИИС при раздельном сверлении комплекта трубок – образцов различного диаметра, выполненных из одного прутка

исследуемого материала.

Трубка – образец в разреза и схема измерения термотока, возникающего при ее сверлении, изображены на рис. 1.9., а.

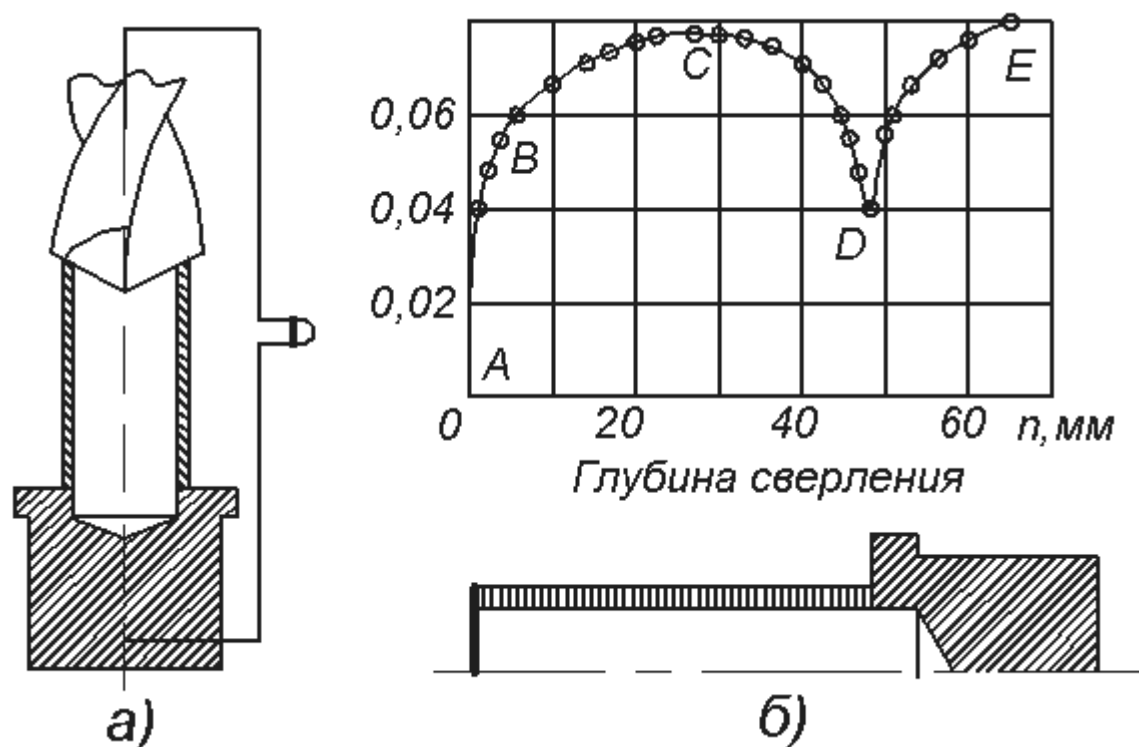


Рис. 1.9. Схема измерения термотока, возникающего при сверлении (а) и зависимость величины I_T от глубины сверления h трубки – образца из стали У8 (б)

В результате обработки осциллограмм, полученных при проведении этих опытов, строились графики зависимости величины термотока от глубины сверления каждой трубки-образца. На рис. 1.9., б представлен один из таких графиков. При сверлении трубок-образцов различного диаметра характер изменения регистрируемой величины термотока качественно практически одинаков. От момента соприкосновения сверла с трубкой и до глубины сверления около 5 мм регистрируемая величина термотока интенсивно увеличивается (участок А—В). По мере дальнейшего углубления сверла термоток продолжает расти, но с уменьшающейся

интенсивностью (участок $B - C$) до тех пор, пока не наступит тепловое равновесие, т. е. пока количество тепла, отводимого от зоны резания в окружающую среду через стружку, инструмент и образец, не становится равным количеству тепла, выделяющегося при резании. Тепловое равновесие наступало, как правило, при углублении сверли в трубку – образец на 25 – 30 мм. Дальнейшее сверление сопровождалось падением регистрируемой величины термотока (участок $C - D$). Такое падение автор объясняет улучшением условий теплоотвода через образец; оно происходит со все возрастающей интенсивностью до тех пор, пока сверло, заканчивая сверление собственно трубки, не начинает сверлить основание трубки – образец. С этого момента регистрируемая величина термотока начинает расти (участок $D - E$).

1.3.4. Термо – э.д.с. при фрезеровании.

В технической литературе имеется мало работ, связанных с явлениями термо - э. д.с. в процессе фрезерования. Здесь необходимо отметить работу В. А. Бобровского [19], в которой исследуются термоэлектрическое охлаждение, являющееся следствием явления Пельтье. С этой целью автор указанной работы провел стойкостные испытания инструмента при работе: в обычных условиях, т.е. с целью термотока, замкнутой через станок; с разомкнутой цепью результирующего термотока; с компенсацией термотока; по методу противотока. Достоверность выводов по результатам таких сравнительных стойкостных опытов может быть существенно повышена, если при их проведении создать условия работы инструмента, при которых эффект Пельтье мог бы проявиться в наиболее заметной степени. Для этого нужно, чтобы рабочие поверхности инструмента обязательно покрывались пленками окислов и чтобы была уверенность в том, что эти пленки при резании разрушаются. Автором было высказано предложение, что все эти

условия лучше всего соблюдаются при прерывистом резании, например, при фрезеровании.

Измерение величины электрического сопротивления зоны контакта инструмента с деталью представляет собой весьма сложную задачу. Особенно большие трудности возникают перед экспериментатором, решающим такую задачу при фрезеровании. Это следует из того что при фрезеровании приходится иметь дело не только со скользящим, но и с прерывистым контактом, величину сопротивления которого не представляется возможным измерить непосредственно ни с помощью омметра любого типа, ни потенциометрическим мостом.

С учетом сказанного, для измерения сопротивления зоны контакта инструмента с обрабатываемой деталью при фрезеровании автором была разработана и применена следующая методика. В каждом опыте последовательно (не одновременно) измерялись величина термо-э.д.с, возникающей при фрезеровании, и сила тока, проходящего через зону резания при включении в цепь контакта СИИС гальванометра магнитоэлектрического осциллографа типа Н-102.

Сопротивление зоны контакта фреза—деталь при прохождении термотока измеряли на станке модели 6М83. при этом не только фреза, но и обрабатываемая пластина-заготовка электрически изолировались от станка.

Результаты эксперимента, автор [2] объясняет следующим причинам:

1. Зуб фрезы выходит из контакта с обрабатываемой деталью нагретым в процессе отделения стружки и двигаясь сравнительно долго в среде окружающего воздуха, покрывается пленками окислов. По мере внедрения зуба фрезы вновь в обрабатываемый материал пленки окислов стираются, причем тем интенсивнее, чем большее давление создается на

поверхности контакта при продвижении зуба фрезы по детали. С увеличением скорости резания, сопровождающимся повышением температуры нагрева зуба фрезы, растет интенсивность процесса окисления. Этим можно объяснить увеличение сопротивления зоны контакта с повышением скорости резания. Справедливость сказанного подтверждается также тем, что при одинаковой скорости резания фрезой, оснащенной пластиной твердого сплава ВК6, сопротивление зоны контакта выше, чем при работе с пластиной из сплава Т15К6. Как известно, твердые сплавы вольфрамо – кобальтовой группы окисляются в воздушной среде легче и быстрее, чем твердые сплавы титано - вольфрамо – кобальтовой группы.

2. Известно, что проводимость, скользящего контакта зависит от приложенного к нему напряжения. С увеличением напряжения она увеличивается [42].

3. В силу особенностей кинематики процесса стружкообразования при фрезеровании толщина среза по мере продвижения зуба фрезы по детали увеличивается. При этом площадь фактического контакта между стружкой и передней поверхностью зуба фрезы и суммарное давление между ними возрастают. Оба эти фактора должны оказывать влияние на изменение электрического сопротивления зоны контакта, приводя, по-видимому, к уменьшению этого сопротивления по мере продвижения зуба фрезы по детали.

Приведенные данные о характере изменения величины сопротивления зоны контакта фрезы—деталь прохождению термотока служат убедительным косвенным доказательством того, что пленки окислов на зубьях фрезы образуются и разрушаются.

И в заключение В.А. Бобровский приходит к следующим выводам:

1) путем разрыва цепи термотока, осуществляемого посредством

электрической изоляции инструмента от станка, удается повысить стойкость не только фрез из быстрорежущей стали P18 при обработке образцов из стали 18X2H4BA, в чем автор убедили описанные выше исследования, но и фрез из стали P9K5 при обработке образцов из нержавеющей стали X18H9T;

2) ввод от постороннего источника в зону резания тока, полярность которого противоположна полярности термотока, а величина на 20-40 % меньше, или равна, или на 20 – 40 % больше максимальной величины термотока, возникающего в зоне резания на данном режиме работы. Способствует повышению стойкости фрез практически в такой же мере, как и разрыв цепи результирующего термотока;

3) ввод в зону резания тока, полярность которого противоположна полярности термотока, а величина превышает в 2 раза или в большее число раз максимальную величину результирующего термотока, как и ввод в зону резания любого по величине тока той же полярности, что и полярность термотока, по сравнению с износом, наблюдаемым при работе с замкнутой цепью результирующего термотока в обычных условиях.

Таким образом, отвечая на вышепоставленный вопрос о том, сколь существенна роль эффекта Пельтье в деле повышения стойкости режущего инструмента, нужно исходить из экспериментально зафиксированного факта, свидетельствующего о том, что эффективность всех трех исследованных методов борьбы с влиянием возникающего при резании термотока на износ инструмента практически одинакова. Следовательно, если термоэлектрическое охлаждение, в основе которого лежит явление Пельте, и уменьшает нагрев инструмента, а тем самым способствует повышению его стойкости, то эффект термоэлектрического охлаждения, инструмента была большим то путем разрыва цепи термотока без подвода к зоне резания э.д.с. от постороннего источника не удалось бы повысить

стойкость инструмента в такой же мере, как и при использовании методов компенсации и противотока

Таким образом, рассмотренные исследования по термо – э.д.с. при точении сверлении и фрезеровании связаны с износом и стойкостью режущего инструмента, с вопросами влияния термо – э.д.с. на сам процесс резания и др. Исследованиям же характера изменения термо – э.д.с. от тех или иных факторов (во времени, режима резания, геометрические параметры режущего инструмента, СОЖ), а также использования термо – э.д.с. как информационный канал, посвящено ограниченное число работ.

Поэтому целью данной работы является обобщение исследований и практического опыта в области диагностики и управления процессом резания используя естественно возникающую термо – э.д.с. при фрезеровании. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать характерные особенности изменению термо – э.д.с. от технологических условий при фрезер овации;
- обосновать естественно возникающую термо – э.д.с. как надежный информационный канал для диагностики и управления процессом резанья;
- выбрать и разработать принципиальную схему диагностики и управления процессом резания при фрезеровании.

ГЛАВА 2
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

В связи с поставленной задачей объектом исследований является определение характера возникающих термо – э.д.с. при фрезеровании. Был выбран горизонтально – фрезерный станок модели 6Р81Г – 95 как один из наиболее широко применяемых горизонтально – фрезерный станков во всех отраслях машиностроения.

Технические характеристики станка:

Рабочая поверхность стола, ширина χ длина в мм	250 χ 1000
Набольший ход стола в мм: продольный,	600
поперечный	200
вертикальный	400
Число скоростей шпинделя	16
Пределы чисел оборотов шпинделя в мм	65 – 1800
Число подач стола	16
Пределы подач стола в мм / мин: продольных,	35 – 980
поперечных	25 – 765
вертикальных	12 – 380
Скорость быстрых перемещений стола в мм / мин:	
продольных,	2,5
поперечных	2,3
вертикальных	1,15
Мощность электродвигателя в кВт:	
привода главного движения	4,5
привода подач	1,7

Для проведения исследований на горизонтально – фрезерном станке

модели 6P81Г – была выбрана схема а для электрической изоляции инструмента и детали согласно схеме рис.2.10.

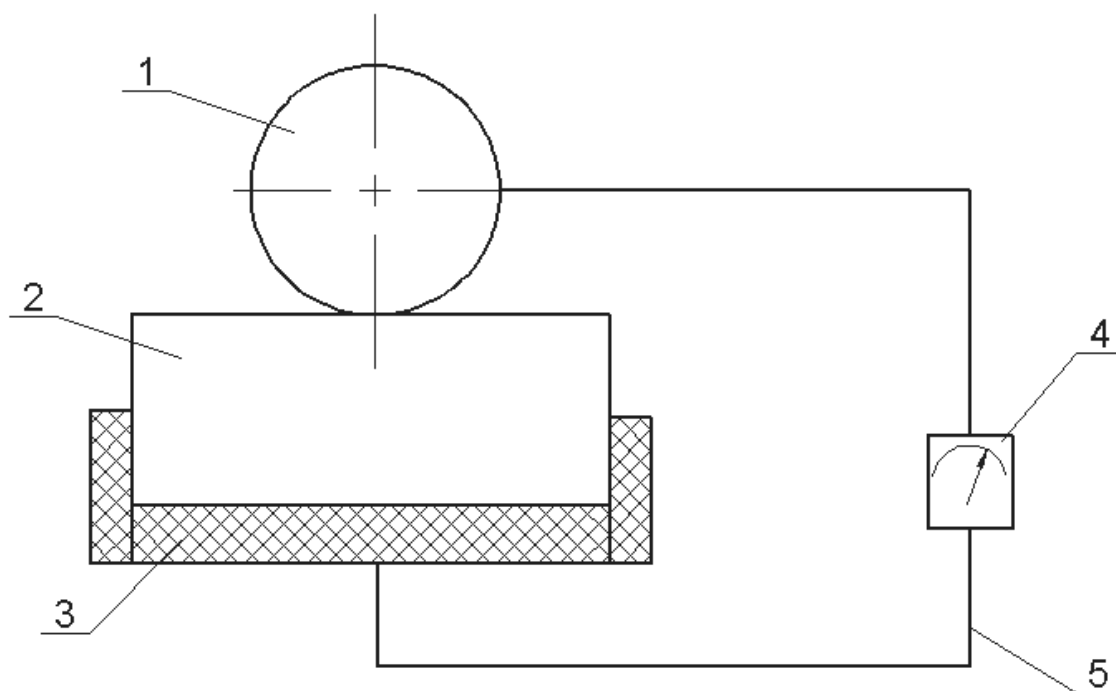


Рис.2.10. Схема съема термо – э.д.с. при фрезеровании
1 – фреза; 2 – деталь; 3 – изоляция; 4 – милливольтметр; 5 – провод.

Для электрической изоляции инструмента и обрабатываемой детали на фрезерном станке разработаны устройства, показанные на рис.2.11. и 2.12.

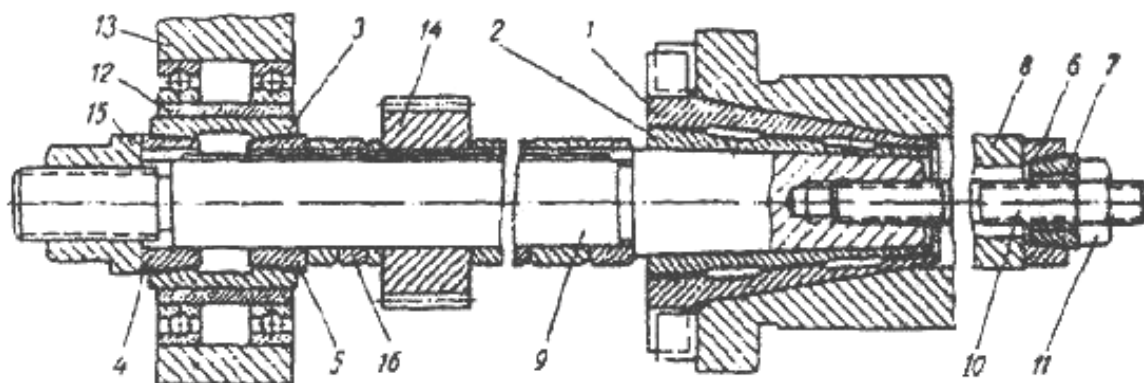


Рис.2.11.

Устройство [45], с помощью которого изолируют оправку на горизонтально – фрезерном станке, изображено на рис. 2.11. Это устройство имеет переходную втулку, склеенную из корпуса 1 и вставки 2, опорную втулку, склеенную из обоймы 3 и ступиц 4 и 5, и шайбу, склеенную из колец 6 и 7. Внешняя поверхность корпуса 1 имеет стандартную форму и размеры, соответствующие форме и размерам посадочного гнезда в шпинделе 8 фрезерного станка. Внутренняя поверхность вставки 2 имеет стандартную форму и размеры, соответствующие форме и размерам конца фрезерной оправки 9, закрепляемой во вставке 2 с помощью шомпола 10 и гайки 11. Склеиваемые поверхности 1 и вставки 2 выполнены в виде трех поясков конической формы с одинаковой конусностью (6°). Между склеиваемыми поверхностями вставки 2 предусмотрены отверстия для облегчения выхода паров растворителя из утврждаемого клеевого шва.

Размеры внешней поверхности обоймы 8 опорной втулки соответствуют размерам вкладыша 12 поддерживающей серьги 13.

Внутри обоймы 8 с обеих сторон выполнены конические отверстия. В эти отверстия вклеены ступицы 4 и 5, наружные поверхности которых выполнены с углами конусности, равными углам конусности отверстий в обойме 8 (10°). Размеры отверстий в ступицах соответствуют размерам фрезерной оправки 9. Склеиваемые поверхности колец 6 и 7 такие выполнены коническими с одинаковым углом конусности (12°).

Таким образом, фреза 14, закрепленная с помощью гайки 15 и колец 16 на оправке 9, надежно изолируется от станка [46].

При этом не только фреза, но и обрабатываемая пластина-заготовка может электрически изолироваться от станка, что достигается закреплением пластины в держателе, изолированном от станка.

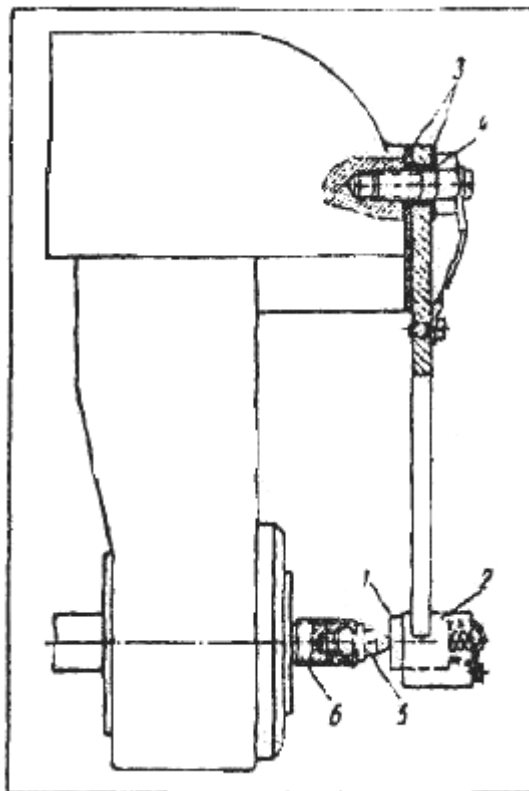


Рис.2.12.

Термо-э.д.с. и термоток измеряют через штыревой токосъемник, состоящий из медной щетки 1 (рис.2.12.), размещенной в пружинном щеткодержателе 2, изолированном от станка текстолитовыми прокладками 3 и втулкой 4, и стального закаленного остроконечного штыря 5, жестко связанного со свободным концом фрезерной оправки 6. Заготовку к измерительным приборам присоединяют с помощью припаянного к ней многожильного провода [46].

Измерение термо – э.д.с. производилось милливольтметрами типа М1109 и М254 согласно схема, представленной на рис. 2.10.

В качестве режущего инструмента была выбрана цилиндрическая фреза из быстрорежущей стали марки Р18. Быстрорежущая сталь как инструментальный материал еще достаточно широко применяется при механической обработке, кроме того применение этого материала давало возможность сопоставить экспериментальные данные настоящей работы с

многочисленными данными других работ.

Цилиндрическая фреза имела следующие геометрические параметры:

число зубьев $z = 14$;

угол наклонности червячности – $\omega = 30^\circ$;

задний угол – $a = 5^\circ$;

передний угол – $\gamma = 18^\circ$;

шаг между зубьев – $t_\tau = 14 \text{ мм}$;

шаг между зубьев при червячности – $t_o = 30 \text{ мм}$;

диаметр фрезы $D = 63 \text{ мм}$;

ширина $S = 80 \text{ мм}$.

В качестве обработки обрабатываемого материала была выбрана широко применяемая конструкционная сталь 40Х.

ГЛАВА 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМО – Э.Д.С. ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ.

3.1. Характер изменения термо – э.д.с. при фрезеровании.

Анализ работ, связанных с термо – э.д.с. резания, показал, что зависимость термо – э.д.с. от скорости резания, как главного фактора режима резания, состоит из двух участков. На первом участке термо – э.д.с. с увеличением скорости резания монотонно возрастает. На второй участке темп роста термо – э.д.с. с увеличением скорости резания резко замедлен, т.е. имеет место излом при какой – то определенной скорости резания.

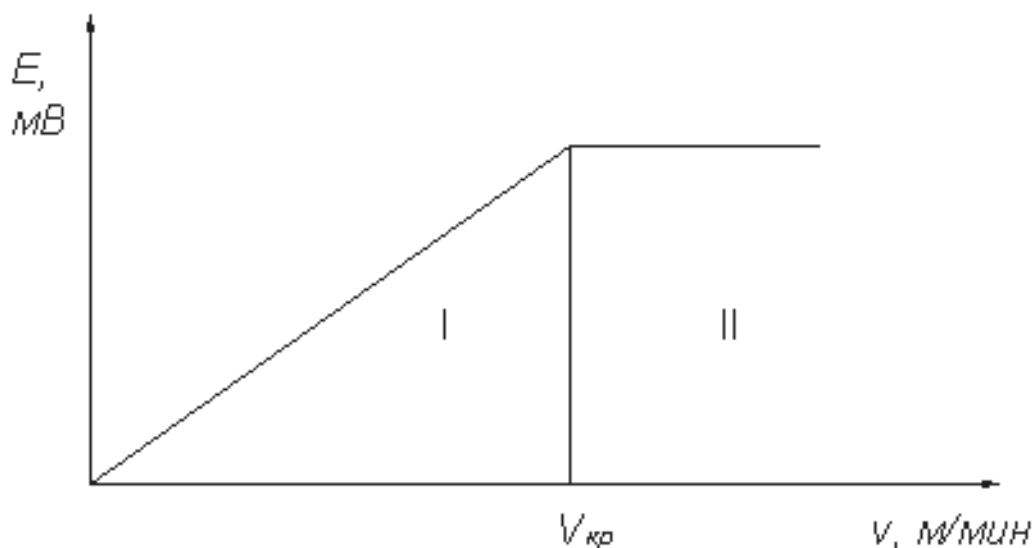


Рис.3.13.

Исследуем этот второй участок, так как он является базовым показателем термо – э.д.с., в информационном канале при диагностике процесса резания.

Теплота, образующаяся в результате работы, затрачиваемой на резание, является одним из главнейших факторов, определяющих процесс резания. В результате концентрация теплоты в тонких поверхностных слоях режущего инструмента и обрабатываемого материала в этих слоях возникают высокие температуры, значения которых зависят от количества выделяющегося при

резании тепла и условий теплоотвода. При увеличении скорости резания, при прочих равных условиях, увеличивается количество выделяющегося в единицу времени тепла, что приводит к увеличению температуры резания. Вместе с тем установлено, что начиная с некоторых скоростей резания темп роста температуры и термо-э.д.е довольно резко замедляется. В первой главе отмечалось, что согласно имеющимся в литературе данным от темпа нарастания температуры с увеличением скорости резания зависит эффективность действия внешних сред на износ и стойкость режущего инструмента. В связи с этим представляют интерес выяснение и анализ причин замедления темпа нарастания температуры в области повышенных скоростей резания.

Причинами такого замедления темпа роста температуры в литературе по резанию металлов [8, 11, 28] считается следующее.

С увеличением скорости резания уменьшается деформация стружки, так как последняя не успевает произойти так полно, как при малых скоростях резания. Увеличение скорости резания также сопровождается повышением температуры в зоне стружкообразования; это приводит к снижению прочностных характеристик обрабатываемого материала. Предполагают также, что при высоких скоростях резания контактные слои стружки сильно разогреваются, размягчаются и возможно, приобретают смазывающие свойства, способствующие уменьшению деформаций усадки стружки [11, 36].

Изменения всех этих факторов, имеющие места при увеличении скорости резания, приводят к менее интенсивному росту работы, затрачиваемой при резании, по сравнению с ростом скоростями; поэтому с увеличением скорости резания темп роста температуры должен снижаться.

В дополнения к вышеизложенному, В. А. Бобровский в работе [10], ссылаясь на свои опытные данные, а также на опытные данные, Н. Н. Зорева,

Т.Н. Лоладзе и др., отмечает, что увеличение скорости резания приводит к уменьшению длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Автор считает, что этот фактор, приводя к уменьшению пути трения стружки о переднюю поверхность резца, должен приводить к снижению интенсивности роста температуры с увеличением скорости резания [46].

Можно согласиться, что изменения всех вышеперечисленных факторов могут в известной степени обусловить снижение темпа роста температуры с увеличением скорости резания при работе твердосплавного инструмента. Однако при работе быстрорежущего инструмента такое влияние не может быть значительным. Так, при работе быстрорежущего инструмента, вследствие сравнительно невысокой его красностойкости, нельзя предполагать, что контактные слои стружки могут приобрести смазывающие свойства благодаря размягчению или оплавлению этих слоев. Далее, при работе быстрорежущим инструментом по тем же причинам (невысокая красностойкость) снижение прочностных характеристик обрабатываемого металла не может быть столь значительным, как в случае работы твердосплавного инструмента. Следовательно, влияние этих факторов на темп роста температуры также должно быть ниже для быстрорежущего инструмента.

Вместе с тем имеющиеся литературные данные [36, 40, 43] показывают возможность резкого замедления темпа роста температуры с увеличением скорости резания и при работе быстрорежущим инструментом. При этом скорости, при которых начинается резкое уменьшение темпа роста температуры, могут быть сравнительно низкими (рис.3.15).

В работе [37] Н.И. Резников одной из основных причин замедления темпа роста температуры с увеличением скорости резания считает уменьшение коэффициента трения между стружкой и передней

поверхностью инструмента. В этой работе коэффициент трения не

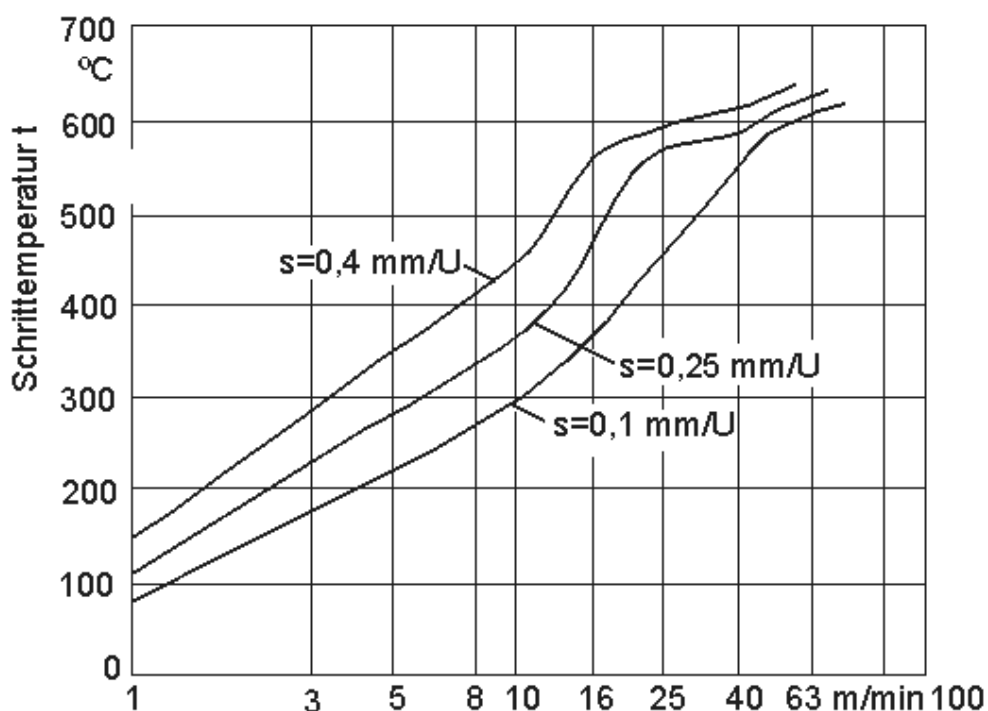


Рис. 3.14. Влияние скорости резания на температуру резания по данным Г. Опитца [35].

измерялся, измерялись только усилие резания P_z и температура. Как показывают опытные данные этой работы, при изменении скорости резания имеют место значительные колебания усилия резания. Например, при резании с глубиной $t=2$ мм усилие резания имеет минимум при скорости резания 150 м/мин, далее до 180 м/мин усилие резания значительно повышается и затем до $v=220$ м/мин понижается. Свыше 220 м/мин наблюдается очень незначительное понижение усилия резания. Примерно так же изменяется усилие резания и при $t = 2$ мм, только в этом случае минимумы и максимумы усилия резания несколько сдвинуты в область пониженных скоростей. Однако эти колебания усилия резания, достигающие 15%, не сказываются на температурной кривой. По мнению автора, при высоких скоростях и температурах резаниях, вследствие появления контактного микрослоя пониженной прочности, уменьшается

коэффициент трения; это сказывается и на усилиях резания, но влияние этого фактора на температуру сильнее так как при высоких скоростях температура резания в значительной степени определяется трением.

Здесь для сопоставления представляет интерес привести имеющиеся в литературе опытные данные по обычному трению, согласно которым, как и при резании, имеет место уменьшение темпа роста температуры с увеличением скорости скольжения [13, 14]. В таких опытах по трению скольжения, кроме изменений коэффициента трения, исключаются все вышеперечисленные факторы, характерные для процесса резания* и могущие обусловить снижение темпа роста температуры.

В работе [13] опыты по трению проводились с максимальным приближением к условиям резания. Автор работы проф. Г.И. Грановский, анализируя сводный график изменения износостойкости B , коэффициента трения μ и температуры трущихся образцов θ от скорости V , отмечает отсутствие однозначной функциональной связи между коэффициентом трения μ и температурой трущихся образцов (рис. 3.16.).

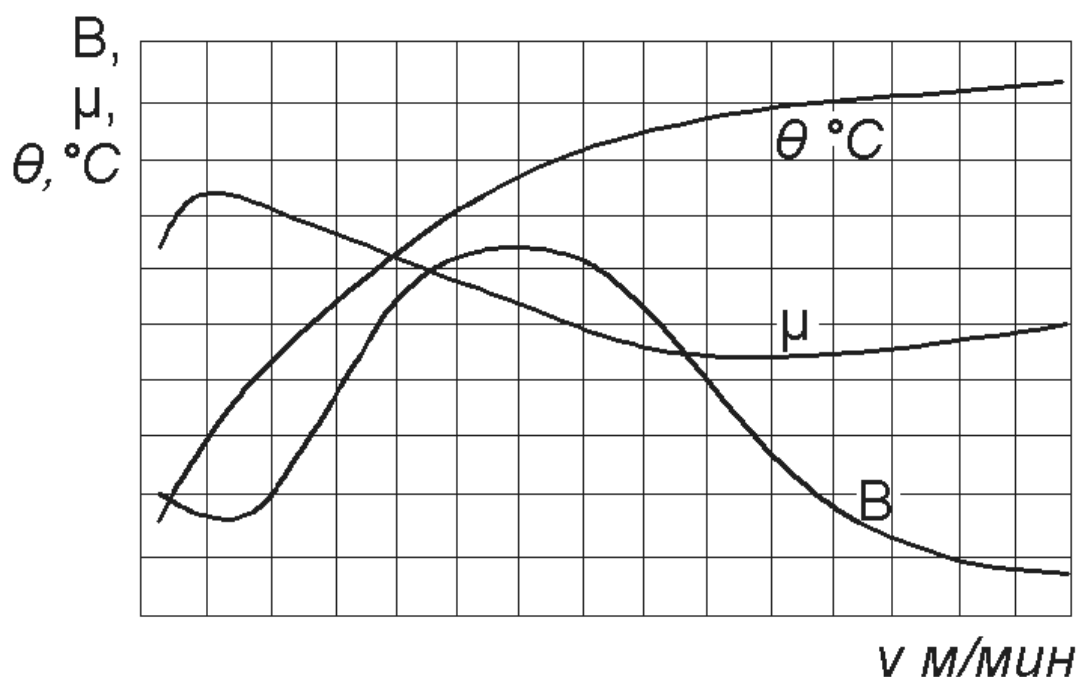


Рис. 3.15. Свободный график изменения B , μ и θ .
 B – износостойкость, μ – коэффициент трения, θ – температура.

Данные работы [27] также указывают на отсутствие однозначной функциональной связи между указанными параметрами (рис.3.16.).

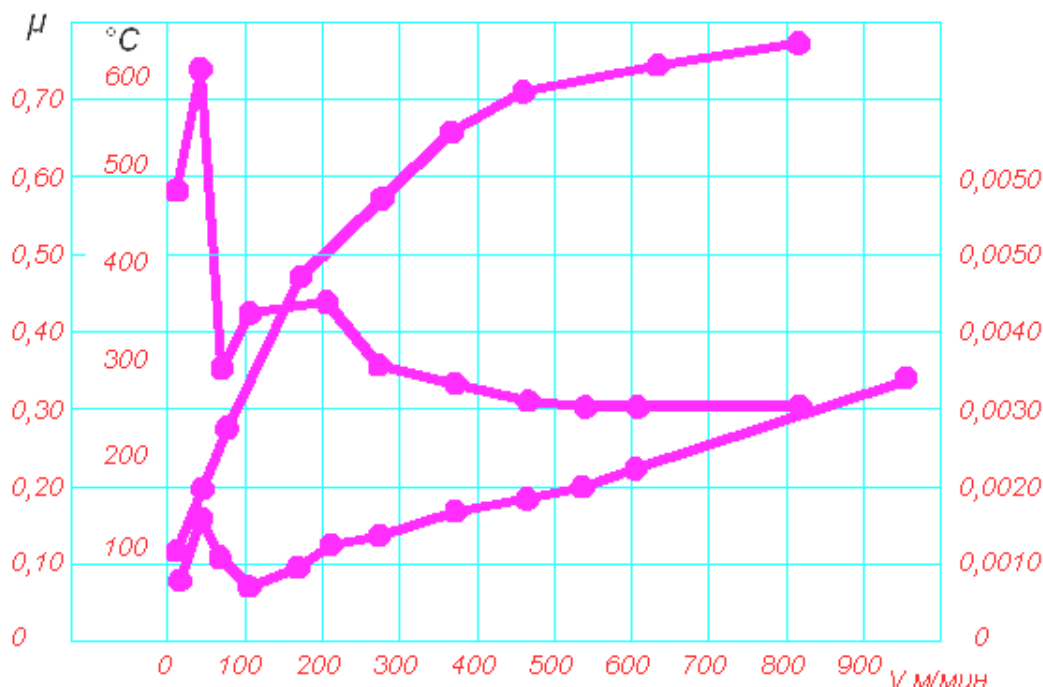


Рис. 3.16. Зависимость величины износа, коэффициента трения и температуры от скорости скольжения при трении сплава Ti5K6 по стали 20
1 - температура, 2 - коэффициент трения, 3 - темп износа, г/1000 м.

Таким образом, из приведенных литературных, данных видно, что несмотря на отсутствие некоторых факторов, могущих иметь место при резании твердосплавным инструментом, снижение темпа роста температуры с увеличением скорости резания имеет место и при резании быстрорежущим инструментом, а также и в условиях обычного трения скольжения. Кроме того, как видно из сопоставленных работ [37] и [13, 14], остается неясным влияние изменений усилия резания и коэффициента трения на ход температурной кривой.

Вследствие уменьшения удельной работы деформаций и удельной работы трения, которое связано с уменьшением усадки стружки, усилия резания, коэффициента трения, с повышением скорости резания теми

роста температуры дождей снижаться. Однако количественное влияние этих фактора, а также вопрос, могут ли эти факторы заметным образом влиять на характер зависимости “температура-скорость резания” при работе быстрорежущем инструментом, остаются недостаточно выясненными.

Для выяснения этого вопроса Г. Камалиддиновым [20] были проведены опыты по кратковременному точению различных сталей. Согласно литературным данным [21, 23, 37, 39] и др. характер изменения усилия резания в зависимости от скорости, при прочих равных условиях, количественно соответствует характеру изменения усадки стружки. Поэтому в данных опытах исследовались влияние скорости резания на усадку стружки и температуру.

На рис. 3.18 - 3.22 представлены результаты данных опытов при резании сталей 20Х, 40Х и 50Г с подачей $s=0,25$ мм/об. 30ХГСНА с подачей $s=0,16$ мм/об. У8 с подачей $s=0,13$ мм/об. 9ХС с подачей $s=0,11$ мм/об. Во всех опытах глубина резания $t=1$ мм.

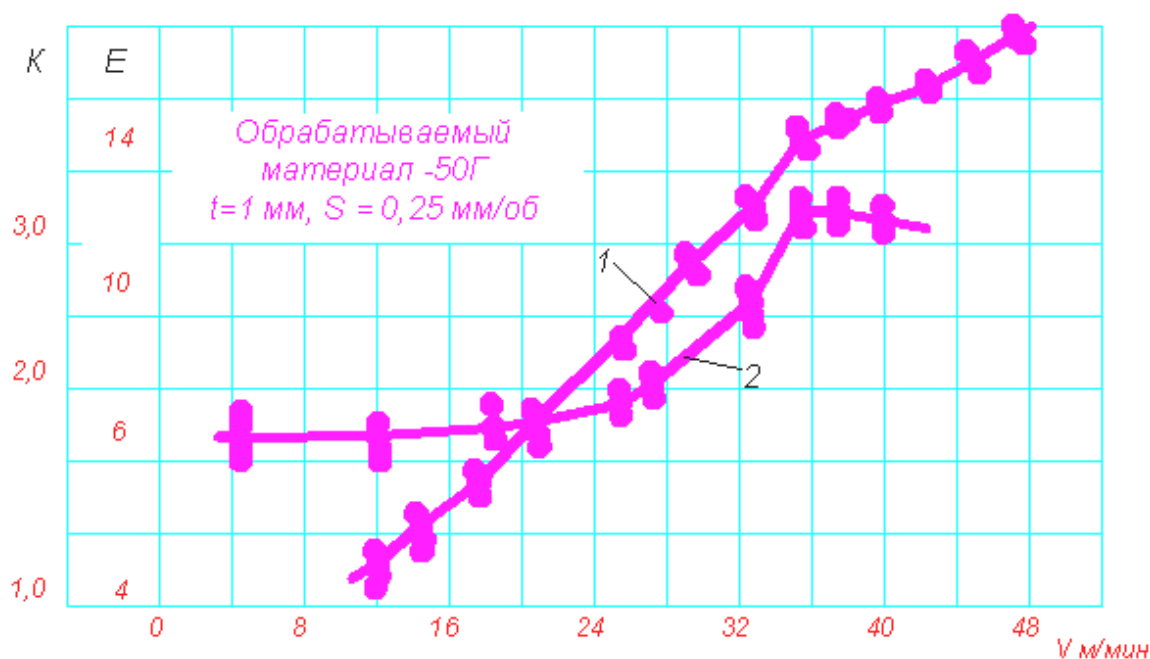


Рис. 3.17. Влияние скорости резания на термо – э.д.с. резания и усадку стружки

1 - зависимость $t^{\circ} = f(V)$
 2 - зависимость $K = f(V)$

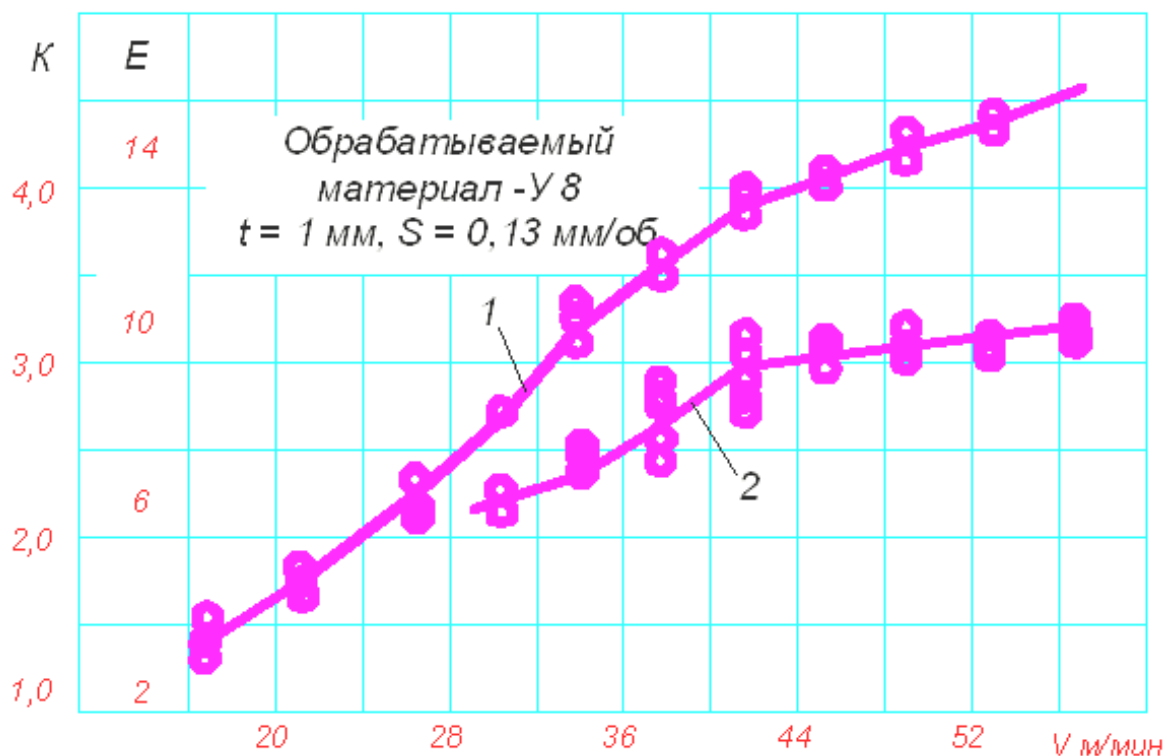


Рис. 3.18. Влияние скорости резания на термо – э.д.с. резания и усадку стружки

1 - зависимость $t^{\circ} = f(V)$
 2 - зависимость $K = f(V)$

Как видно из приведенных данных, зависимости температуры и усадки стружки от скорости резания имеют изломы при скоростях, соответствующих температуре около 600°C . До скоростей резания соответствующих излому температурных кривых, в узком диапазоне скоростей (около 4 м/мин) усадка стружки резко возрастает (возрастание усадки стружки для разных обрабатываемых сталей различно). Как известно из литературы [37, 23, 39], это объясняется исчезновением нароста при температуре около 600°C . По сравнению с темпом роста температуры в диапазоне более низких скоростей резания, в указанном узком диапазоне скоростей, вследствие увеличения усадки, темп роста температуры несколько увеличивается. При скоростях резания выше скорости,

соответствующей излому на температурной кривой, во всех случаях, за исключением резания стали У8, с увеличением скорости резания усадка стружки уменьшается. Темп роста температуры с увеличением скорости в этом диапазоне скоростей резания резко уменьшается.

Если рассматривать только вышеописанный участок зависимостей температуры и усадки стружки от скорости резания, где сопоставляется участки с резким возрастанием (упомянутый узкий диапазон скоростей) и уменьшением усадки в области повышенных скоростей резания с соответствующими участками температурной кривой, можно прийти к выводу что замедление роста температуры в области повышенных скоростей резания связано с уменьшением усадки стружки. Но при резании, например: сталь 40Х, как и диапазонов скоростей 54 *мм/мин* и выше, уменьшение усадки стружки имеет место и в диапазоне скоростей резания от 18 до 44 *м/мин*. Однако уменьшение усадки стружки в этом диапазоне скоростей приводит к незначительному снижению темпа роста температуры (рис 3.19.). Таким образом, если сопоставлять характер изменения усадки стружки с ходом температурной кривой в различных диапазонах скоростей резания видно, что влияние изменений усадки стружки на темп роста температуры незначительно и резкое снижение темпа роста температуры в области повышенных скоростей резания не может быть объяснено только измерениями усадки стружки.

Таким образом, взаимосвязанные факторы процесса резания (сила трения, усадка стружки, длина контакта), изменяющиеся с изменением скорости резания, двояко действуют на рост температуры с увеличением скорости резания. С одной стороны за счет уменьшения степени деформации, обрабатываемого материала и общей силы трения уменьшают рост количества выделяемого тепла, что должно было бы замедлять рост

температуры с увеличением скорости резания. Но с другой стороны (за счет изменения геометрических параметров контактной зоны) за счет увеличения скорости скольжения стружки по переднюю поверхность препятствуют замедлению роста температуры с увеличением скорости резания. Наличием такого двойного влияния указанных факторов и может быть объяснен установленное выше незначительное влияние изменений усилия резания и усадки стружки на ход зависимости “скорость резания - температура”.

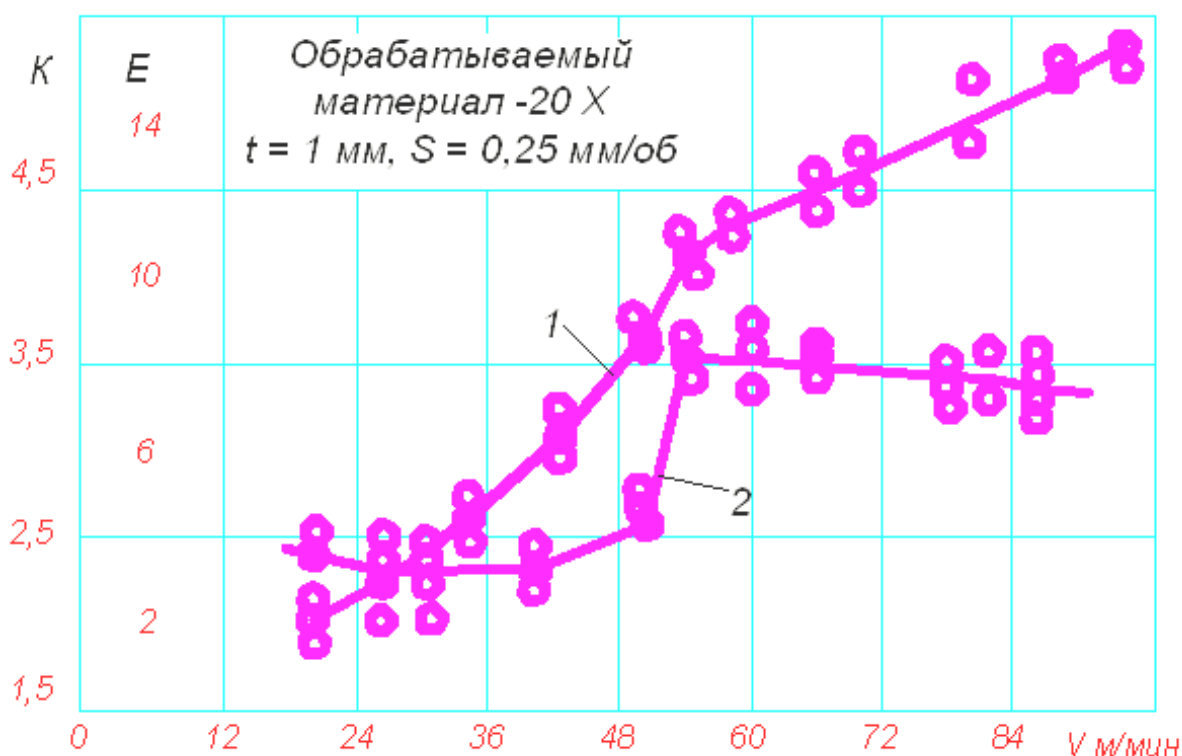


Рис. 3.19. Влияние скорости резания на термо – э.д.с. резания и усадку стружки

1 - зависимость $t^{\circ} = f(V)$

2 - зависимость $K = f(V)$

Одной из причин замедления темпа роста температуры с

увеличением скорости резания могут быть условия теплоотвода контактной зоны, обусловленные изменениями теплофизических параметров контактной зоны. Как будет показано ниже, в снижении темпа роста температуры с увеличением скорости резания немаловажную роль могут играть фазовые превращения второго рода, имеющие место при резании ферромагнитных сталей.

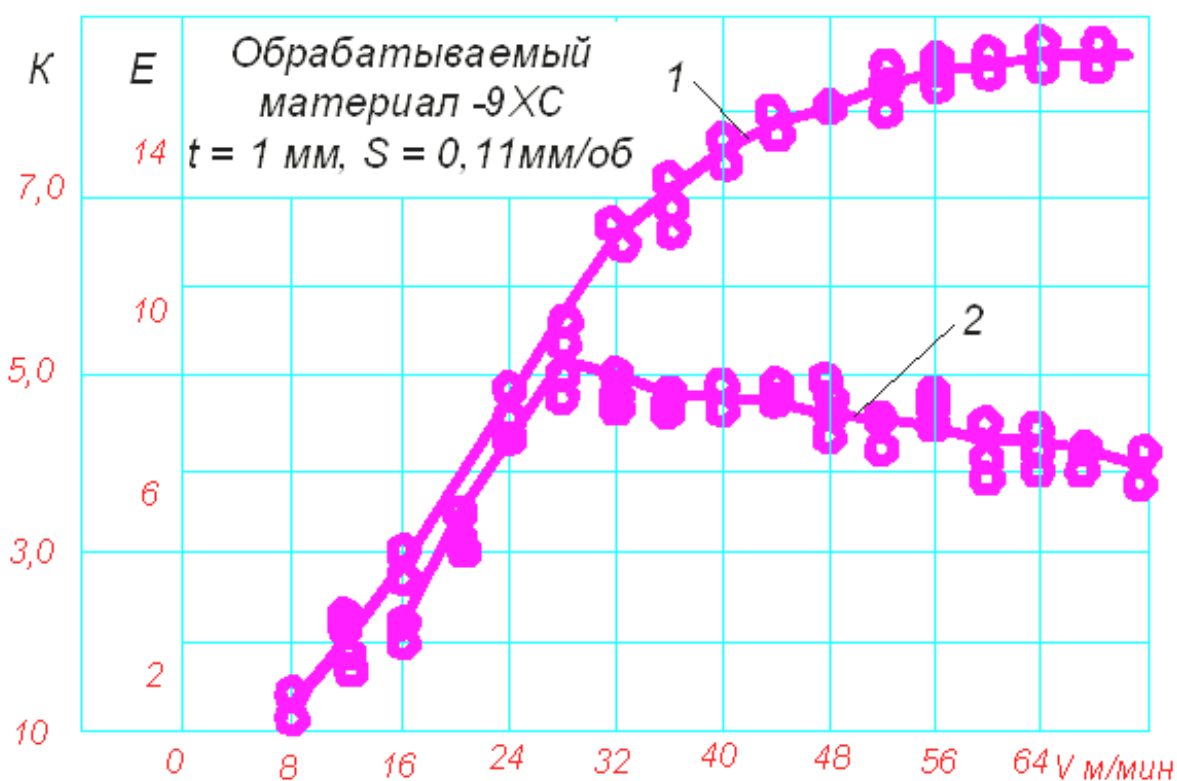


Рис. 3.20. Влияние скорости резания на термо – э.д.с. резания и усадку стружки
 1 - зависимость $t^{\circ} = f(V)$
 2 - зависимость $K = f(V)$

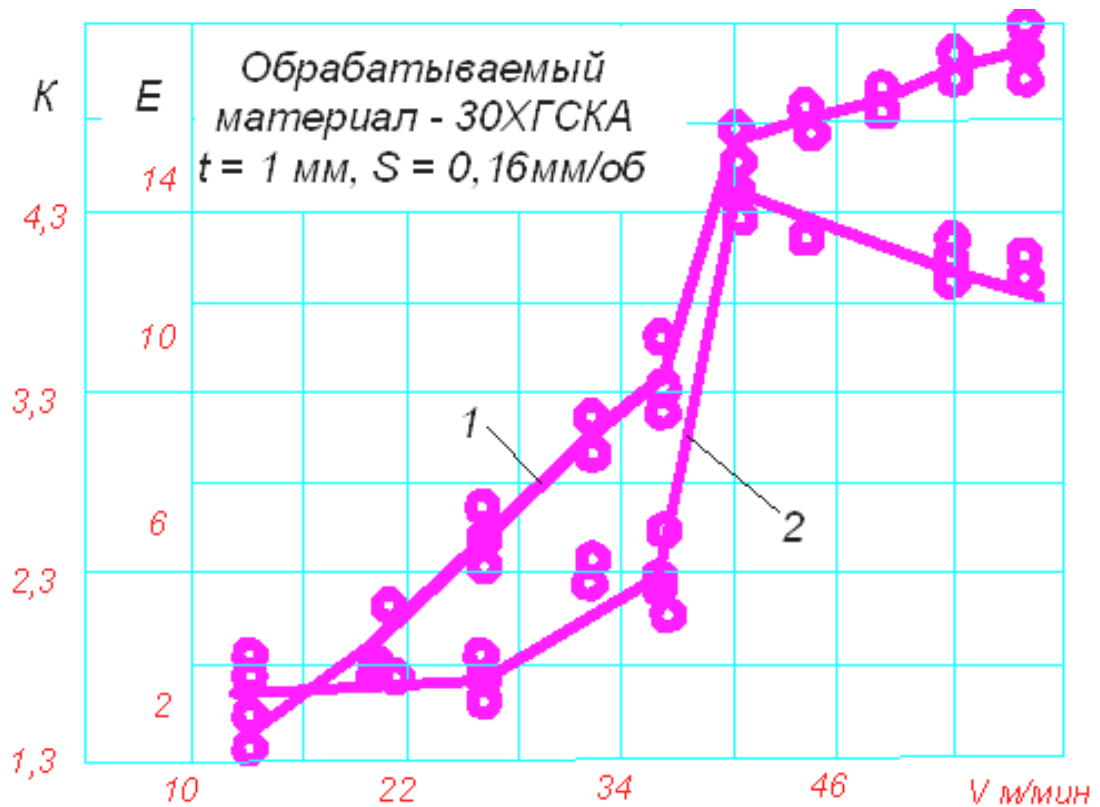


Рис. 3.21. Влияние скорости резания на термо – э.д.с. резания и усадку стружки
 1 - зависимость $t^{\circ} = f(V)$
 2 - зависимость $K = f(V)$

Анализ данных работ А.М. Даниеляна [17, 18, 19], Т.Н. Лоладзе [32], Н.И. Резникова [14], С.С. Можаяева и Т.Г. Саромотиной [4], Н.Н. Зорева [23], В.А. Бобровского [13]. Д.Н. Троицкой [41] и др., а также экспериментальные данные Г. Камалиддинова [24] и К.Б. Усманова [43] показывают, что при резании ферромагнитных сталей как быстрорежущим, так и твердосплавным режущим инструментом замедление темпа роста температуры с увеличением скорости резания начинается с температуры примерно 600 °С. это указывает на то, что уменьшение темпа роста температуры может быть связано с определенной температурой.

По данным различных авторов температура начала снижения

темпа роста температуры резания колеблется в пределах 600 ± 80 °С. Такое колебание может быть обусловлено тем, что эти данные получены при различных сочетаниях обрабатываемого и инструментального материалов при различной геометрии режущего инструмента (причины такого влияния обрабатываемого и инструментального материала будут указаны ниже). Кроме этого, такие колебания могут быть связаны с погрешностями тарирования и самого метода измерения температуры. Например, в выше приведенных на рис. 3.18 – 3.22 данных, полученных при резании резцами, обладающими различными термоэлектрическими свойствами, заготовок стали одной и той же марки, но также с разными термоэлектрическими свойствами, несмотря на 8 – 10 кратное повторение каждого опыта, зависимости "скорость резания – температура" колебалось в пределах 30-40 °С (в каждом случае использовались тарировочные графики, полученные той парой инструмента и обрабатываемого металла, при использовании которых были получены зависимости термо-э.д.с. от скорости резания). Это обстоятельство, связанное с неточностями метода естественной термопары, позволяет определить начало замедления роста температуры только с точностью примерно в пределах, указанных выше. Однако, при использовании одной и той же заготовки и одного резца часть этих погрешностей исключается.

На рис. 3.22 представлены результаты опытов, полученные при резании стали 40Х с пятью различными подачами: $s=0,08; 0,16; 0,25; 0,35$ и $0,45$ мм/об.

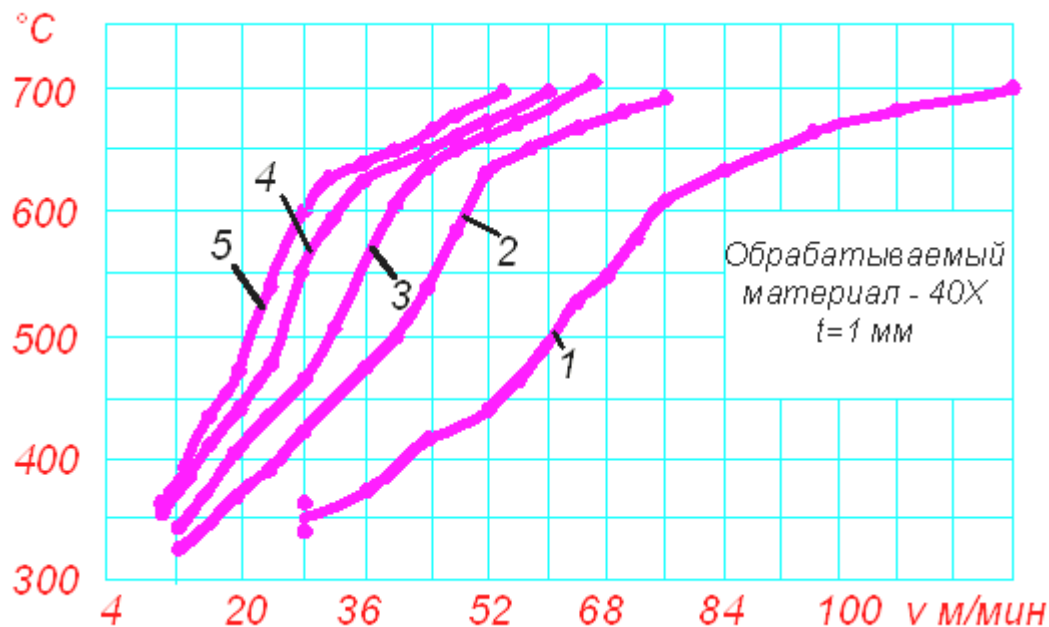


Рис. 3.22. Влияние скорости резания на температуру резания при различных подачах.

1 – $s=0,08$ мм/об; 2 – $s=0,16$ мм/об; 3 – $s=0,25$ мм/об; 4 – $s=0,35$ мм/об; 5 – $s=0,45$ мм/об.

Как видно из приведенных данных, снижение темпа роста температуры, независимо от скорости резания и величины подачи, начинается примерно при одной той же температуре. Такие же результаты были получены К.Б.Усмановым [43] при резании стали ст.3сп с разными подачами и Г.Опитцем [35] При резании нормализованной углеродистой стали с содержанием углерода 0,53 %.

Как и в зависимостях "скорость резания температура", несмотря на непрерывное возрастание усилия резания с увеличением глубины резания и подачи, снижение темпа роста температуры имеет место и в зависимостях "глубина резания - температура" и "подача температура" (как отмечают некоторые авторы, происходит даже стабилизация температуры). В работе [38] Н.И. Резников (при теоретическом обосновании течения с большими подачами по методу В.А. Колесова) снижение темпа роста температуры и ее стабилизацию в вышеуказанных зависимостях объясняет

улучшающимися условиями охлаждения стружки вследствие увеличения ее поверхности при глубине резания свыше 1,5 мм и подачах 1,5 – 2 мм/об. Между тем, анализ данных вышеназванных авторов показывает, что и в зависимостях "подача – температура" снижение темпа роста температуры начинается также при температуре, равной примерно 600 °С. Это дает основание полагать, что снижение темпа роста температуры может быть связано не только с улучшением условий охлаждения стружки, но и дополнительным фактором, связанным с температурой резания.

Проверить это предположение можно путем сопоставления зависимостей "подача – температура", полученных при разных скоростях при резании одной и той же заготовки. Если имеется связь с фактором, связанным с температурой, то в этих зависимостях для всех скоростей резания снижение темпа роста температуры должно начинаться примерно при одной и той же температуре.

Полученные при резании стали 40Х с тремя различными скоростями на характер зависимости "скорость резания – температура" показывают, из приведенных данных, все три кривые, независимо от скорости резания и подачи, имеют излом примерно при одной и той же температуре, что подтверждает высказанное предположение.

Таким образом, анализ литературных данных и наши экспериментальные данные (рис. 3.23) показывают, что при резании ферромагнитных сталей снижение темпа возрастания температуры с увеличением скорости резания и подачи начинается примерно при 600 °С.

Известно, что при нагревании структурно-упорядочивающихся металлов и сплавов имеют место превращения второго рода "порядок – беспорядок". У ферромагнитных металлов и сплавов такими являются превращений из ферромагнитного состояния в парамагнитное, которые происходят не при постоянной температуре, как это имеет место для

превращений первого рода, а в интервале температур в области точки Кюри. Приведенные Б.Г. Лившицем в работе [32] и Г.М. Бартевым в работе [11] данные, а также приведенные в этих работах данные Умино, Клиנגардта, Дюрера, Обергоффера и др.. показывают, что ферромагнитная часть теплоемкости для сталей обнаруживается, начиная примерно с 500 - 600 С, и имеет значительные максимумы (6-8 -кратное увеличение теплоемкости у некоторых сталей в области окончания превращение второго рода). При этом стали, содержащие до 0,5 % углерода, имеют два максимума теплоемкости первый при температуре перлитного превращения (ферромагнитный перлит превращается в неферромагнитный аустенит) и второй при температуре Кюри для железа. Стали, содержащие свыше 0,7 % углерода, имеют только один максимум теплоемкости при температуре перлитного превращения.

На основании всего вышеизложенного можно сделать вывод, что одной из основных причин снижения темпа роста температуры с увеличением скорости резания являются аномалии в температурных зависимостях теплоемкости обрабатываемых сталей, а эта также отразится на характере изменения термо – э.д.с. резания.

Контроль термо – э.д.с. при фрезерной обработке детали имеет свои особенности, заключенные в самом процессе резания. Каждое режущее лезвие инструмента имеет прерывистый контакт с обрабатываемой деталью, а толщина срезаемого слоя изменяется от нуля до максимума, соответствующего моменту разрыва контакта инструмент - деталь.

Как показал эксперимент [9], термо – э.д.с., как и температура в зоне резания, плавно возрастают до максимума.

В момент разрыва контакта э.д.с. мгновенно падает до нуля. Температура режущей кромки будет падать медленно, поскольку изменение температуры, безусловно процесс инерционный.

На рис. 3.23. показана последовательность импульсов напряжения при прерывистом фрезеровании (в работе находится всегда только один зуб инструмента).

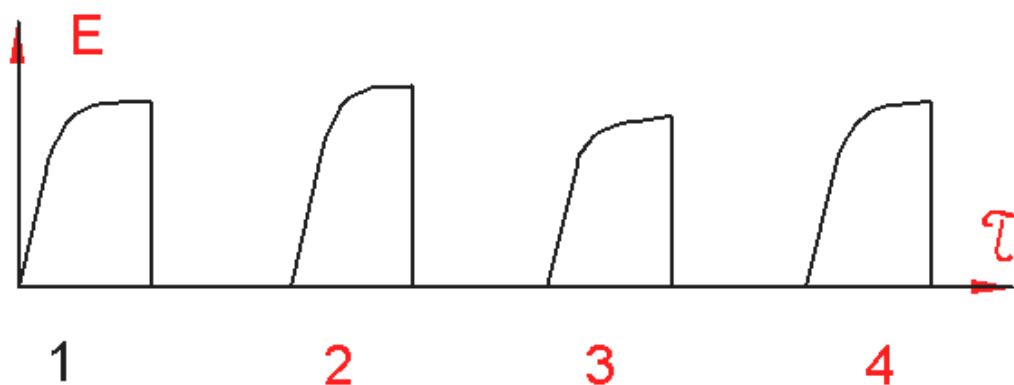


Рис. 3.23. Схема последовательности импульсов напряжения при прерывистом фрезеровании.

В целях равномерности фрезерования используются фрезы с винтовым зубом, торцовые и др.. При фрезеровании таким инструментом в контакте с обрабатываемой деталью одновременно находится несколько режущих зубьев фрезы.

В пределах поверхности резания некоторые зубья только вступают в работу, в то время как другие ее заканчивают.

Временная диаграмма термо – э.д.с. конечно усложниться для восприятия. Амплитуда переменной составляющей уменьшится за счет того, что в этом случае, как и температура зоны резания, термо – э.д.с. не будет спадать до нуля, поскольку разрыв контакта в электрической цепи не наступит.

Однако, пульсации напряжения, соответствующие входу/выходу зубьев, будут иметь место и информация эта может быть полезной для диагностики системы. Необходима разработка алгоритмов обработки этих сигналов.

Импульсы напряжения и тока в цепи ТЭДС идентичны по форме, поскольку цепь резистивная.

Наши исследования о характере изменения термо-э.д.с. от скорости резания при фрезеровании цилиндрической фрезой показаны на рис. 3.18 – 3.22. В экспериментах одновременно отбиралась стружка для измерения усадки стружки.

Как видно характеры кривых в зависимостях “термо – э.д.с.—скорость резания” и “усадка стружки—скорость резания” оказалась похожими на аналогичные экспериментальные данные при точении, приведенные выше (см. рис. 3.24 – 3.27).

Но имеется и отличие. При фрезеровании после излома кривой термо – э.д.с. с увеличением скорости резания уменьшается, также как и усадка стружки.

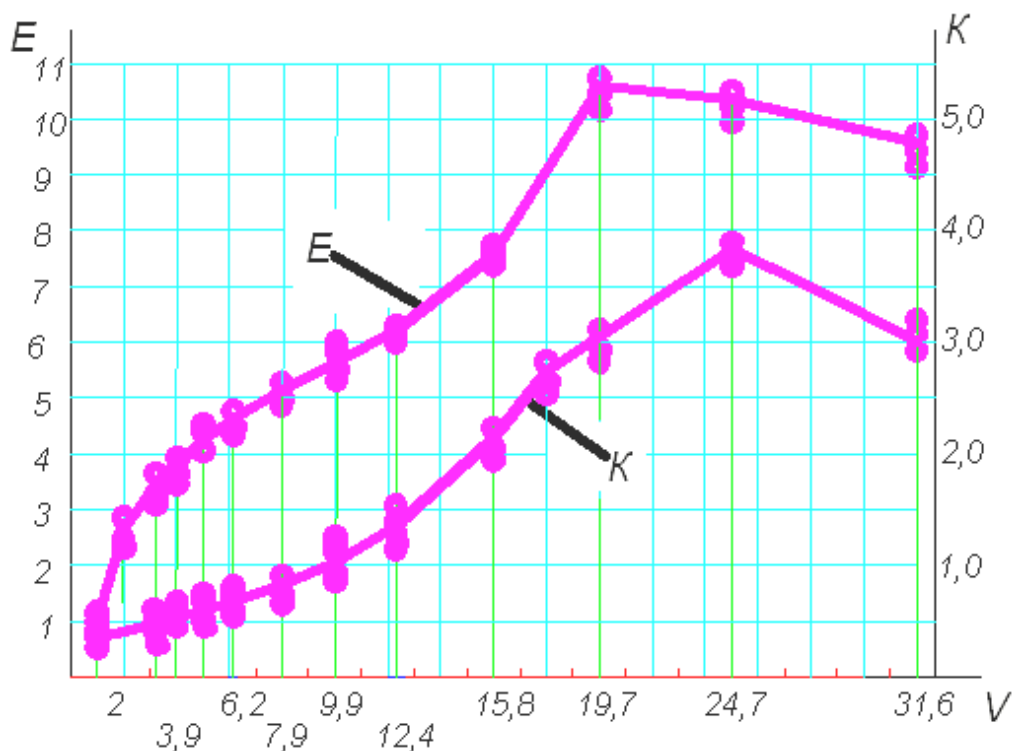


Рис. 3.24. Зависимости термо – э.д.с. (E) и коэффициент усадки (K) от скорости резания при $s=45$ мм/мин.

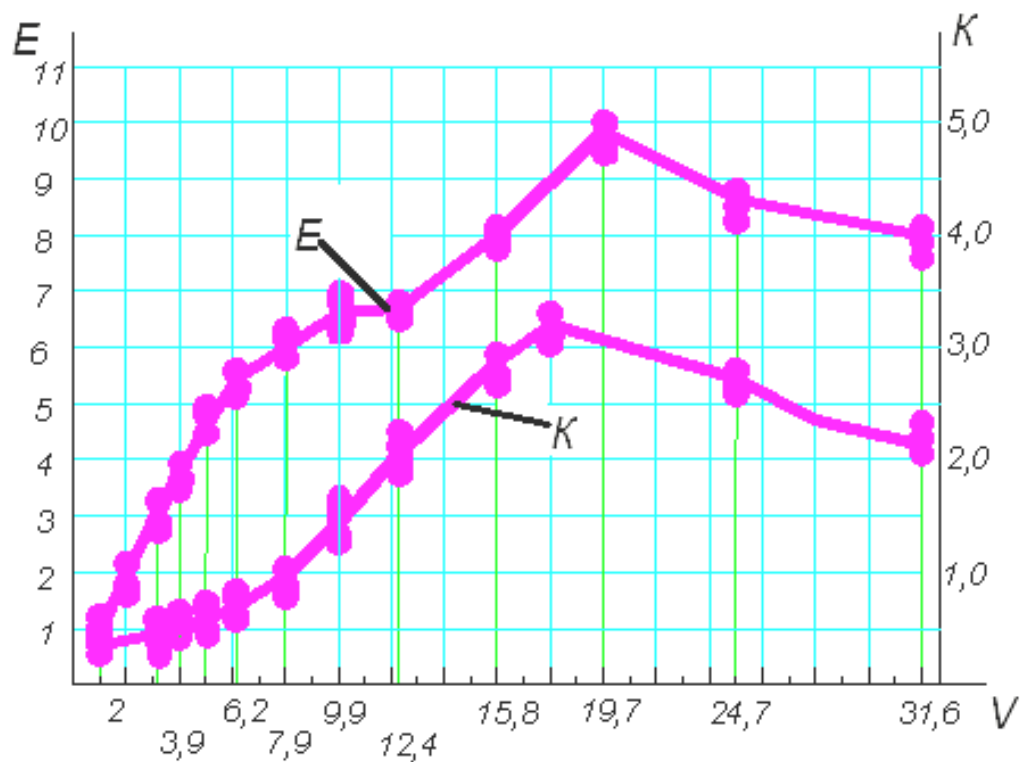


Рис. 3.25. Зависимости термо – э.д.с. (E) и коэффициент усадки (K) от скорости резания при $s=65$ мм/мин.

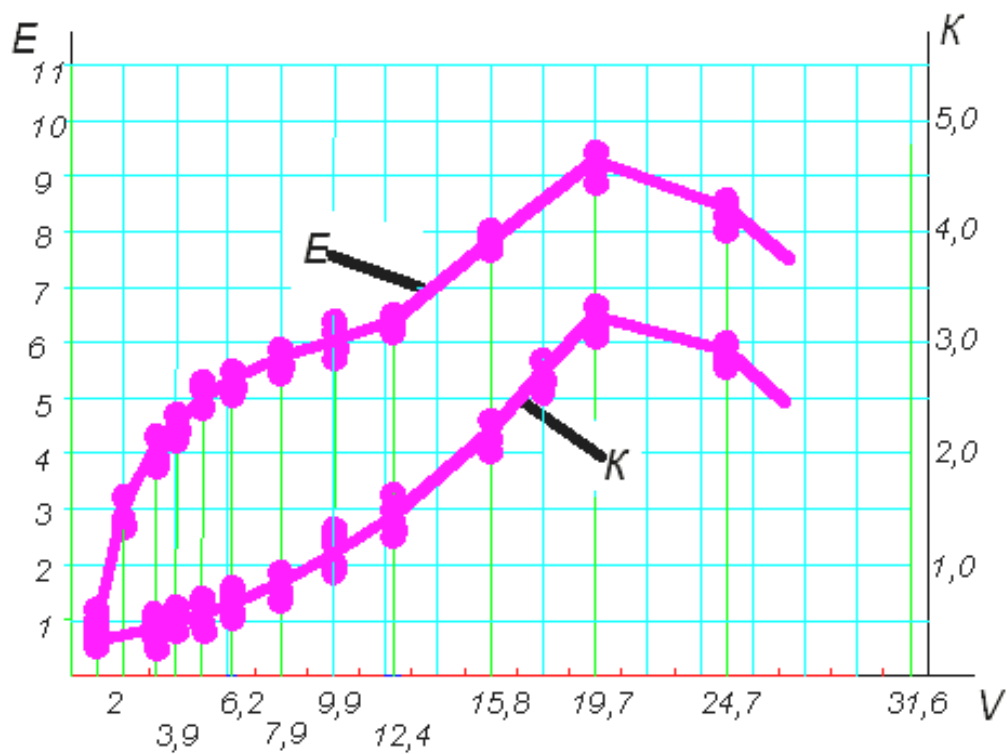


Рис. 3.26. Зависимости термо – э.д.с. (E) и коэффициент усадки (K) от скорости резания при $s=85$ мм/мин.

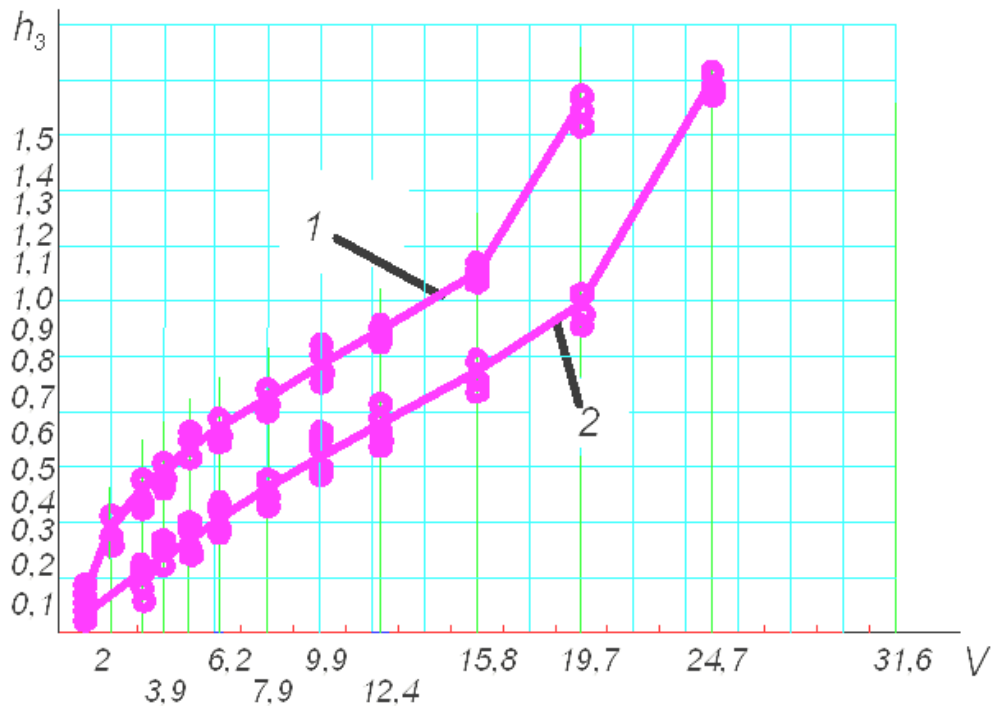


Рис. 3.27. Зависимости h_3 от скорости резания 1 – $s=65$ мм/мин; 2 – $s=45$ мм/мин.

В наших экспериментах имеется недостаток, который не дает возможности для более корректного сравнения с аналогичными опытами данными других работ, а именно невозможность бесступенчатого регулирования скоростей резания. Поэтому приходилось работать с числами оборотов шпинделя, имеющими большой диапазон между собой, в которых мы не могли узнать характер изменения кривой в зависимости “термо – э.д.с.—скорость резания”.

В этих экспериментах одновременно производился замер износа зубьев фрезы h_3 . Характер износа по задней поверхности в зависимости от скорости резания и подачи показан на рис. 3.27. Износ замерялся лупой Бринелля. Как видно из рисунков износ монотонно растет с увеличением скорости резания до точки излома, а после этой точки износ резко возрастает. Такой характер износа аналогичен полученным дачным и работам Г. Камалиддинова и К.Б. Усманова [43]. В этих работах на участках

после излома в зависимостях “температура—скорость резания” и “термо – э.д.с.—скорость резания” при применении смазочно-охлаждающих технологических сред был получен значительный эффект. Следовательно такой эффект можно ожидать от СОТС и при фрезеровании на этом участке кривой в зависимости “термо – э.д.с.—скорость резания”, а значит можно использовать термо – э.д.с как диагностический признак при фрезеровании.

На основании изложенного в данной главе можно сделать следующие выводы.

1. Скорость резания при фрезеровании значительно влияет на ход зависимости “термо – э.д.с.—скорость резания”.
2. Подача влияет на эту зависимость тем, что сдвигает кривую “термо – э.д.с.—скорость резания” по оси абсцисс.
3. Усадка стружки растет с увеличением скорости резания при данной подаче, а за изломом она также уменьшается как и термо-э.д.с
4. Износ фрезы по задней поверхности h_3 резко возрастает за изломом в зависимости “скорость резания – температура (э.д.с.)”

3.2. Термо-э.д.с. при резание – как информационный канал для управления процессов р езании.

Температура в зоне резания представляет двойкий интерес. С развитием металлообработки сведения о температуре режущей кромки инструмента носили самостоятельную ценность, поскольку позволяли описать и прогнозировать свойства инструментального материала и процесс резания как таковой. Для этой цели были необходимы средства измерений температуры и решения находились на основе использования термопар па стадии выполнения исследовательских работ.

Потом наступила пора автоматизации систем управления и возникла

потребность в получении информации о параметрах элементов технологической системы непосредственно в производственных, а не в лабораторных условиях и при отсутствии человека на рабочем месте.

Установка термопар как датчиков температуры для производственных условий оказалась по конструктивным решениям нереализуемой задачей и причин тому много.

Вместе с тем, датчики термо – э.д.с., являясь как бы само встроенными в систему инструмент - обрабатываемая деталь - станок, безусловно представляют интерес, но как ими правильно и эффективно воспользоваться

Для этого необходимо решить ряд задач, а именно:

- Рационально построить электрическую измерительную цепь.
- Обеспечить отстройку от влияющих воздействий.
- Обеспечить надежность при эксплуатации измерительного канала.
- Разработать алгоритмы обработки полученных электрических сигналов в соответствии с протеканием контролируемого технологического процесса.

Здесь возникает ряд трудностей, которые не позволили пока найти правильные и приемлемые технические решения.

Сначала, как в любой классической постановке задачи измерений, необходимо ответить на ряд постановочных вопросов:

- Какой параметр целесообразно выбрать в качестве измеряемой величины;
- Каков диапазон измерения;
- Каким требованиям по точности должен удовлетворить информационный канал;
- Какие параметры следует учитывать в качестве сильных влияющих воздействий (ВВ) и какими можно пренебречь;
- Как правильно построить физически реализуемую

электромеханическую систему канала;

- Как правильно построить расчетную модель измерительной электрической цепи;

Многопараметровость функции $T_{эр}$ указывает на широкие перспективы ее использования и одновременно на большие проблемы в осуществлении любой частной реализации, ибо, выбирая один параметр в качестве измеряемой величины, например, износ h , мы все остальные должны рассматривать как влияющие факторы. В противном случае необходимо гарантировать их пренебрежимо малые вариации в процессе эксплуатации от тех значений, которые имели место при градуировке. Под малыми вариациями значений параметров понимаем те, что не обусловят возникновение составляющей погрешности, соизмеримой с принятым ранее допустимым значением для данного канала.

В настоящее время наибольший интерес для АСУ представляет контроль износа инструмента по величине термо – э.д.с. зоны резания.

По изменению износа, силы резания и $T_{эр}$ можно судить о состоянии режущей части инструмента. Эта взаимосвязь подтверждена экспериментально, установлены эмпирические зависимости и описаны в первой части настоящей работы.

При обеспечении требуемой точности измерений информационный канал мог бы быть использован для выдачи сигнала АСУ на автоматическую смену инструмента или на аварийное отключение системы и для принятия других решений системами высоких уровней управления. Перспектива заманчива, но задача обеспечения требуемой точности пока не решена и в этом суть проблемы.

Поскольку известно, что всякий выход погрешности измеряемой величины за пределы допуска – это отказ информационного канала АСУ, то главное направление в решении задачи измерений - метрологическое.

Выразим измеряемую величину (износ – h) как функцию температуры $T_{эр}$ и других аргументов,

$$h = \varphi_1 (V, S, t, \Gamma, M_{ин}, M_{дет}, M_{сож}, \dots T_{эр}, \dots),$$

Чтобы выразить зависимость h как функцию термо – э.д.с. придется прибегнуть к выявлению эмпирической зависимости и к последующему измерению напряжения или тока в физически реализуемом контуре электрической измерительной цепи. Таким образом, в итоге модель будет отягощаться наличием параметров элементов измерительной цепи Π , т. е.

$$h = \varphi_1 (V, S, t, \Gamma, M_{ин}, M_{дет}, M_{сож}, \dots E, \Pi, \dots),$$

В реальных производственных условиях каждый из параметров может обратиться в переменную величину и тогда он становится источником погрешности. Влияющее воздействие такого параметра необходимо либо представлять как составляющую результирующей погрешности, либо исключать путем введения поправки. Для этого потребуются дополнительные каналы, измеряющие эти параметры. Такой вариант может оказаться нереализуемым и тогда остается последнее: определение значимости влияющих воздействий по каждому параметру для реальных условий эксплуатации и оценка возможности обеспечения точности. Это понимание проблемы и накопленный опыт являются основой для решения задачи.

Построение измерительной цепи с естественной термопарой следует начать с физико – механической модели.

Общая схема образования естественной термопары показана на рис. 3.28. Режущая пластина (условно – Co) токарного резца, зуба фрезы или другого инструмента закреплена на стальной державке (корпус – Fe). Обработываемая деталь стальная (условно – Fe) . Горячий спай образуется

на контактной площадке (а) передней грани и на контактной площадке (h) задней грани режущей пластины. Холодный спай – это поверхность контакта державки (Fe) с режущей пластиной (Co).

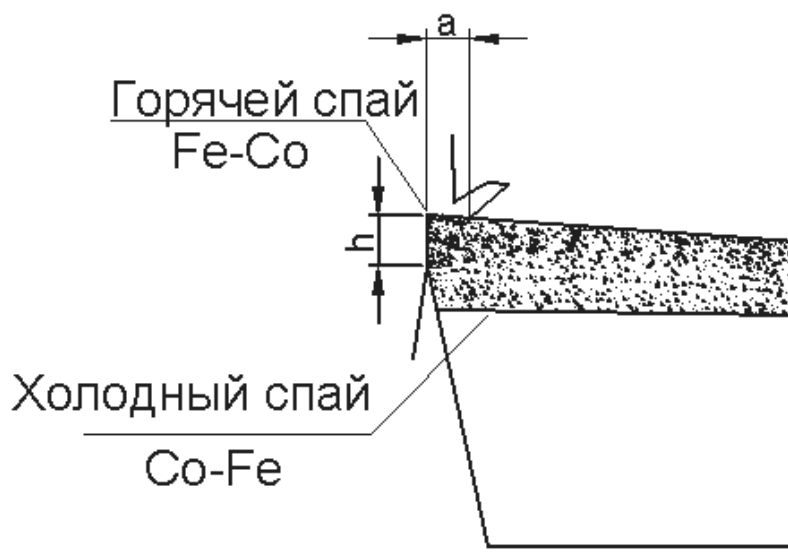


Рис. 3.28.

В разомкнутой электрической цепи термо –э.д.с. возникнуть не может. Там, где отсутствует плотность тока в твердом теле, отсутствует и термо – э.д.с. На рис. 3.29. а) приведено условное изображение контура, в котором генерируется термо – э.д.с. Заливкой обозначен материал режущей пластины инструмента. Остальная половина включает в себя материал обрабатываемой детали (Fe) и державку (Fe). Таким образом создана модель замкнутого контура, в котором возникает термо – э.д.с., поскольку спаи двух материалов находятся при различной температуре. Реально холодные поверхности детали и державки инструмента могут соединяться цепью проводников из любых материалов, как это показано на рис. 3.29. б). Если их изотермичность обеспечивается, то других термопар в контуре не возникает, поскольку для генерации термо – э.д.с. необходимо исполнение трех условий:

- наличие разнородных контактирующих проводников,
- градиента температур и

- замкнутого контура электрической цепи.

На рис.3.29. б) стрелкой обозначен вектор термо – э.д.с. Важно отметить, что

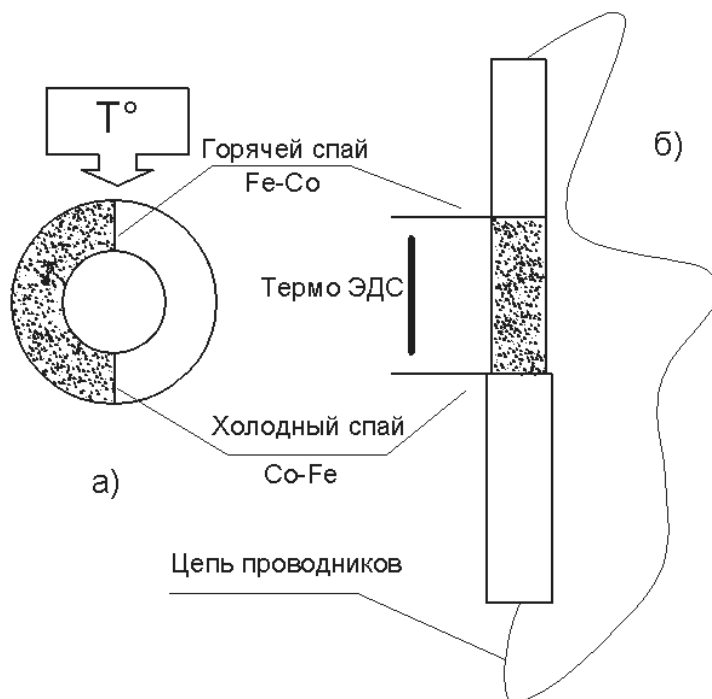


Рис. 3.29 . Схема а) и модель б) замкнутого контура, в котором возникает термо – э.д.с.

Что неверно встречающееся в литературе утверждение о том, что термо – э.д.с резания возникает к зоне близкой к режущей кромке инструмента, ибо ТЭДС генерируется между горячим и холодным спаями.

Информационный канал с естественной термопарой может использоваться на различном оборудовании. Схемы конструктивных элементов и измерительных цепей будут иметь характерные отличия.

Теперь следует перейти от физико – механической модели к электрофизической модели измерительной цепи. Она представлена на рис. 3.30.

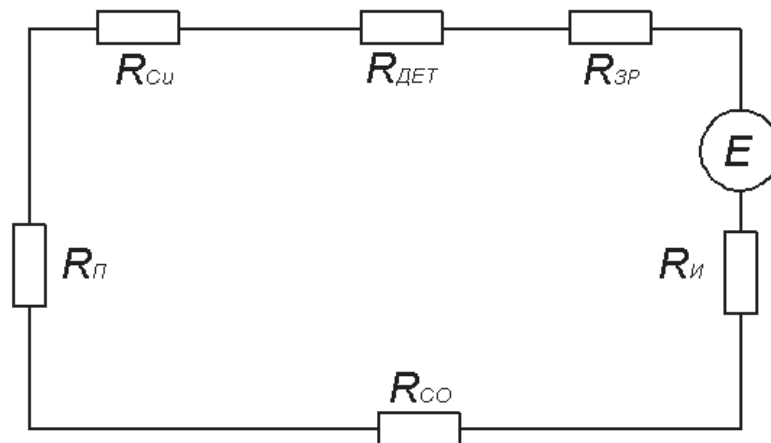


Рис.3.30. Схема конструктивных элементов и измерительных цепей.

Электрическая измерительная цепь состоит из последовательно соединенных элементов, каждый из которых представлен в виде сосредоточенного сопротивления, хотя в сущности они таковыми не являются. С этим допущением можно согласиться прежде всего потому, что термо – э.д.с. не будет содержать высокочастотных составляющих.

Генератор термо – э.д.с. может быть помещен в любой точке последовательной цепи. В данной схеме логично изобразить его между сопротивлением зоны резания $R_{ЗР}$ и сопротивлением режущей пластины инструмента $R_{И}$. Поскольку величины этих сопротивлений предельно малы, необходимо учесть в измерительной цепи сопротивления обрабатываемой детали $R_{дет}$ и сопротивления медного провода $R_{Со}$ соединяющего деталь с прибором $R_{пр}$ а также сопротивление $R_{Со}$ провода отвода от режущей пластины.

Перед нами стоит задача измерения электродвижущего силы, поэтому необходима максимальная отстройка от влияния на измеряемый сигнал всех сопротивлений, включенных в измерительную цепь. Это достигается удовлетворением условию неравенства

$$R_{п} \gg R_{Со} + R_{См} + R_{дет} + R_{пр} + R_{и}$$

чрезмерное увеличение сопротивления $R_{п}$ будет ограничено

возрастанием уровня помех от электромагнитных наводок, поскольку величина сигнала от термо – э.д.е. всегда не превышает нескольких милливольт.

Уровень наводок будет представлять собой аддитивную составляющую погрешности измерения термо – э.д.с. Эти наводки, скорее всего, будут обусловлены наличием больших электромагнитных полей от силового привода станка и с ними можно бороться фильтрацией выходного сигнала в сравнительно узкой полосе частот относительно 50 Гц

Сложнее обстоят дела с мультипликативной составляющей погрешности измерения.

Точность измерения будет зависеть прежде всего от такого влияющего воздействия, как вариация величины удельной дифференциальной термоэлектродвижущей силы. Величина α весьма нестабильна вследствие неоднородности материала заготовок, обусловленной как металлургическими технологиями, так и предшествующими операциями формирования заготовки и ее термообработки. Замена режущего инструмента по мере износа, также будет сопровождаться вариацией величины α . На вопрос о том, как избавиться от этого источника погрешности, приведенная схема ответа дать не может. Необходимо изыскания методов отстройки от такого влияющего воздействия и на этом лишь пока заостряем внимание. Можно полагать, что разработка алгоритмов компьютерной обработки сигналов на основе «пробных» проходов и самообучение информационной системы непосредственно в процессы выполнения операции, будет перспективной в решении задачи обеспечения необходимой точности измерения.

Влияющие воздействия и виде нестабильности сопротивлений, входящих в последовательную цепь могут не представлять существенных трудностей, если входное сопротивление прибора $K_{\text{в}}$, (или вторичного

преобразователя информационного канала системы) будет выбрано правильно.

Особо следует отметить влияющее воздействие, обусловленное возможным появлением "короткого" замыкания цепи элементом сливной стружки. Такое шунтирование в измерительной цепи изображено на рис.3.31. пунктирной линией.

Шунтирующая цепь содержит не только активное сопротивление элемента стружки, но и термо-э.д.с. E_c , возникающую вследствие контактов трех разнородных материалов (стружки, режущая пластина и державка) при величии градиента температуры по длине всего замкнутого контура.

Задачи анализа реальной цепи с термо – э.д.с. усложнилось тем, что измерение термо – э.д.с. как таковой стала невозможным, поскольку измерительный прибор, при наличии замыкания цепи стружкой, будет реагировать только на напряжение между точками 1 и 2, по не на термо – э.д.с. (E) как было прежде. Изменились не только параметры модели, но и токи в контурах измерительной цепи.

Отстройка от такого влияющего воздействия может осложниться также тем, что это воздействие носит случайный характер.

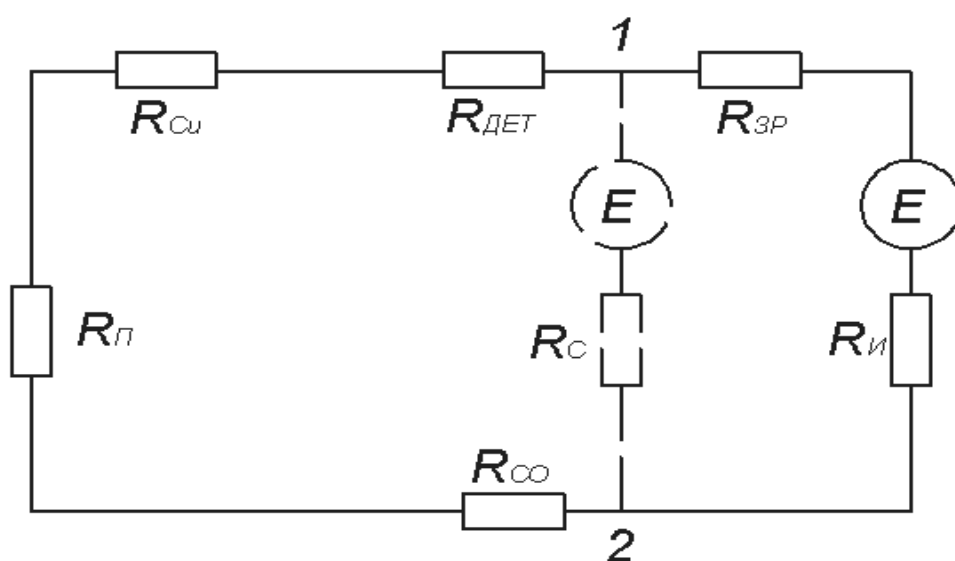
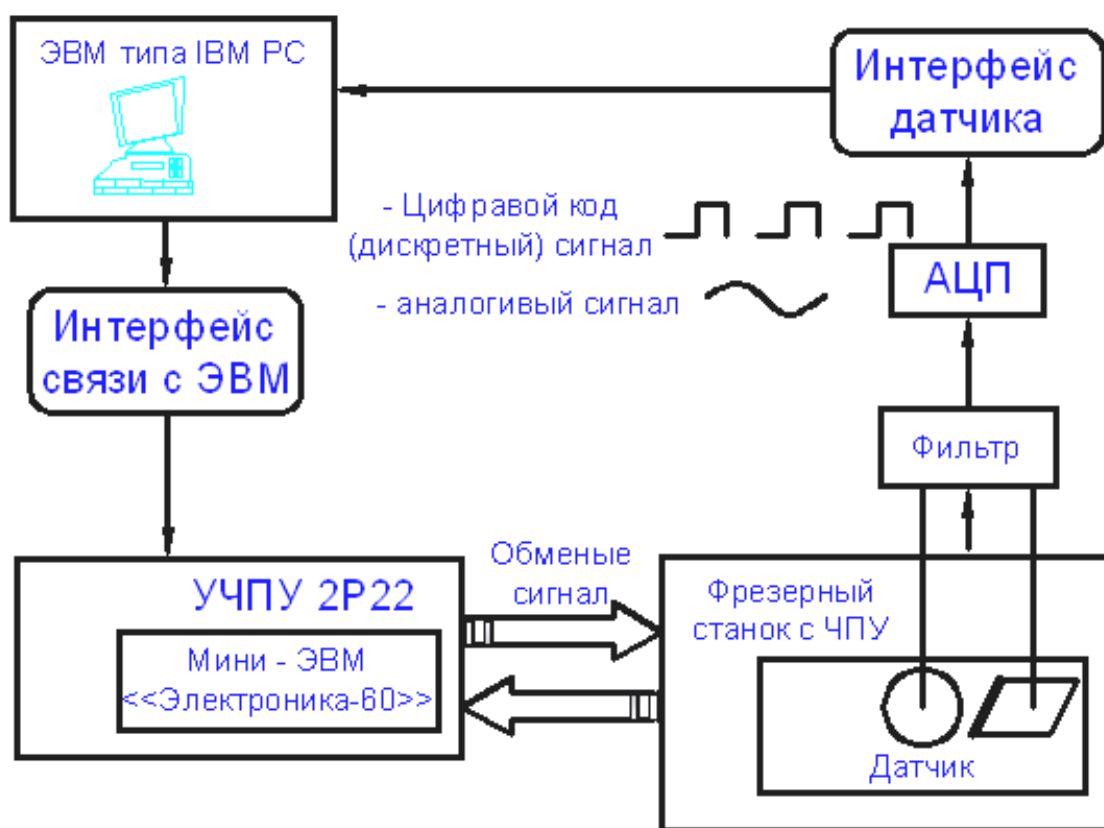


Рис.3.31.

Конечно, самый верный путь для избавления от всех неприятностей, связанных с шунтированием измерительной цепи фрагментом стружки – это создание специальной конструкции инструмента, предотвращающего такое замыкание.

В результате при основе анализа различных схем, предлагается следующая схема диагностики и активного контроля процессом резания на фрезерном станке с ЧПУ. (рис. 3.32)



На рис. 3.32. Схема диагностики и активного управления процессом фрезерования на станке с числовым программным управлением.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие общие выводы:

1. Характер зависимости кривой “ термо – э.д.с. – скорость резания ” независимо от вида обработки (точение, сверление), а также фрезерование принципиально имеет один и тот же характер.
2. Скорость резания, которая определяет излом в кривой зависимости “термо – э.д.с. – скорость резания”, показывает точку на кривой, после которой изменяется процесс резания. Он характеризуется отсутствием нароста, наличием пленок окислов, изменением стружкообразования и другие.
3. Это характерной точкой можно пользоваться как диагностическим признаком для эффективного изменения режимов резания, как предлагается патентом. № IAP 04420
4. Дана рекомендации по применению в первом приближении измерительной цепи с термо-э.д.с при фрезеровании.

Рис. 3.32.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРА.

1. Технология машиностроения: в 2 т. Том 2. Производство машин: учебник для вузов. / Бурцев В. М., Васильев А. С., Деев О. М. и др.; Под редакцией Мельникова Г. Н. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998.-640 с.
2. Усмонов К. Б., Абдувалиев А. М., Мухаммадиев Г. С., Сафаров О. Отчет о научно-исследовательской работе "Технологический метод диагностики и активного контроля процесса резания" (промежуточный)// . ТГАИ 2001-32 с.
3. Рубашкин И. Б., Алёшин А.А. Микропроцессорное управление режимом металлообработки. Л.: Машиностроение, 1989.-160 с.
4. Усманов К.Б. Влияние рабочих сред на стойкость режущего инструмента в зависимости от сочетания температуры и скорости резания, Канд. диссертация. ТашПИ, Ташкент 1969.
5. "Технические средства диагностирования:" Справочник. Клюев В. В. и др. М. Машиностроение, 1989-671 с.
6. Усманов К.Б. Основы резания металлов.: Ташкент: «Академия» 2005.
7. Аваков А.А., Дубров Ю.С., Николаева Г.С. Исследование эффекта повышения стойкости неперетачиваемых многолезвийных «дырочных» пластин марок. Т15К6, Т5К10, ВК8, ВК6 методом ввода в зону резания слабых электрических токов и методов «термоэлектрической компенсации». Материалы XXXI научно – технической конференции кафедр РИИЖТ, Ростов – на – Дону, 1963.
8. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Резание металлов, Машгиз 1956
9. Бобровский В.А. Деформации, силы и температуры резания при скоростном точении сталей. Авто реферат диссертации на соискание ученой степени кант.техн.наук. М; 1953

10. Бобровский В.А. Электродиффузионный износ инструмента , «Машиностроение» М.1970
11. Вульф А.М. резание металлов Машгиз 1973
12. Гордиенко П.Л., Гордиенко С.Л. О влияние электрического тока на износ при трения металлических тел. «Вестник машиностроения», 1952, №7
13. Грановский Г.И. Износостойкость твердых сплавов и инструментальный сталей. Сб. «Трение и износ при резании металлов». Машгиз, 1955
14. Грановский Г.И. О методике исследования и назначения режимов резания на автоматических линиях. «Вестник машиностроения» №10, 1963.
15. Грудов П.П. Основы скоростного резания металлов Сб. «Скоростная обработка металлов резанием». М., Оборонгиз 1951
16. Даниелян А.М. и Бобровский В.А. Температура при резания металлов и способы ее измерения . Труды военной Академии БТ и МВ СА, 1952, № 11-12
17. Даниелян А.М. Теплота и износ инструментов в процессе резания металлов , Машгиз 1954.
18. Даниелян А.М. Тепловой баланс при резании стали. Сб. «Тепловые явления при обработке металлов резанием» М., НТО Машпром, 1959
19. Даниелян А.М. и др. Обработка резанием жаропрочных сталей, сплавов и тугоплавких металлов. Изд. «Машиностроение» М., 1965.
20. Дубинин А.Д. Трение и износ в деталях машин. М., Машгиз 1952.
21. Еремин А.Н. Физическая сущность, явлений при резании стали, Машгиз, 1951.
22. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов, Машгиз. 1956.

23. Камалиддинов Г. Исследование влияния смазочное – охлаждающих сред на износ и скорость режущего инструмента , Канд.диссертация, Ташкент 1975.
24. Капров В.М. ТЭДС резания – диагностическая признак состояния инструмента. Москва, МВТУ 2000
25. Коробов Ю.М. Влияние термоэлектрических явлений, возникающих при резании, на износ инструмента. «Станки и инструмент». 1968 №3
26. Костецкий Б.И., Носовский И.Г. Износостойкость и антифрикционность деталей машин, К., 1965
27. Кривоухов В.А., Бурштейн Б.Е. и др. Обработка металлов резанием, Оборонгиз, М., 1958.
28. Кузнецов В.Д. Физика твдого тела. Т.Ш, Томск, Изд-во «Красное знамя», 1944.
29. Левицкий М.П. Температура стружки при резании пластичных металлов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кант.техн.наук. Теблесси 1946
30. Левицкий М.П. Температура при резании металлов ЖТФ.Т XIX. Вып. 9, 1949; Т. XXII. Вып 4,1952.
31. Лившиц М.П. Температура при резании металлов и сплавов. Машгиз, 1959.
32. Можаяев С.С., Саромотина Т.Г. Скоростное и силовое точение сталей повышенной прочности. М., Оборонгиз, 1957.
33. Можаяев С.С. Тепловые явление, сопровождающие процесс резания сталей на высокой скорости. ЖТФ. Т. XXII. Вып. 10. 1951.
34. Опитц Г., Шилинг В. Исследование реакций износа быстрорежущего инструмента при обработке стали, Экспресс – информация, «Режущий инструмент» № 31, 1968.
35. Развитие науки о резании металлов, «Машиностроение», М., 1967.

36. Резников Н.И. Теоретическое обоснование точения с большими подачами по методу В.А. Колесова. Сб «Высоко производительная обработка металлов инструментами из новых материалов » ЛОНИТОМАШ, кн.32, М., Машгиз, 1953.
37. Резников Н.И. Новые исследования по скоростному резанию металлов. Сб. «Прогрессивная технология машиностроения». ЛОНИТОМАШ, кн. 27, М., Машгиз, 1952
38. Розенберг А.М., Еремин А.Н. Элементы теории процесса резания металлов, Машгиз, 1956.
39. Ромадин К.П. Электролитический перенос в металлических жидких и твердых растворах. Труды Военно – воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского. Вып. 167, 1947.
40. Троицкая Д.Н. Влияние распыленной жидкости на стойкость резцов с пластинами твердого сплава, «Вестник машиностроения» № 10, 1963
41. Усачев Я.Г. Явления, происходящие при резании металлов. Известия Петроградского политехнического института. Т. 23. Вып. 1, 1915
42. Axer H. Zur Physik des Werkzeugverschleißes. Fesnigungs Technik und moderne Werkzeugmaschinen . 7. Aachener Werkzeugmaschinen – Kollquium 1954. Essen, 1954.
43. Физическая энциклопедия сварщика . М., 1985/
44. Opitz H. Das Temperaturfeld am Drehmeißel und die Reaktionen in der Kontaktzone. “Microtecnic”, №46 Band VIII, 1954.
45. Усманов К.Б., Абдувалиев А.М., Сафаров О.М., Ниязбаев А.М., Якубов А.А. // Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. // Патент на изобретение. “Способ определения обрабатываемости конструкционных сталей”. Зарегистрирован в государственном реестре изобретений Республики Узбекистан. в г.

Ташкент 09.08.2011 г. № IAP 04420.

- 46 Усманов К.Б., Зикиров А.Э. Контрольно измерительная диагностика фрезерованная методом естественной термопары. Международной научно – практической конференции «Влияние индустриально-инновационной политики на качество образования» Казакстан, Тараз – 2012 .