

М 411828

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ
РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ И.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ Сергей Владимирович

УДК.621.9.01+531.43

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ
ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Специальность 05.03.01. - Процессы и машины обработки
материалов резанием, автоматические линии
01.04.07 - Физика твердого тела

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва, 1983г.

Работа выполнена в Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
А.Я.МАЛКИН
доктор технических наук, профессор
С.С.СИЛИН
доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник
Э.П.ФЕЛЬДМАН

Ведущая организация: Всесоюзный научно-исследовательский
инструментальный институт
(ВНИИинструмент)

14.03.84
Защита состоится "10" ~~01~~ 1984 г. на заседании
специализированного Совета Д 53.15.04 при Московском высшем
техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва,
2-я Бауманская ул., 5, МВТУ им. Н.Э.Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке училища.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный
печатью, просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан "

Ученый секретарь
специализированного Со
кандидат технических нау

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Перед станкостроением поставлена задача: значительно повысить технический уровень и конкурентоспособность оборудования, что в первую очередь связано с ростом степени автоматизации металлорежущих станков. Рост производительности и точности станков связан с тремя главными направлениями: экономией вспомогательного времени (за счет внедрения систем и комплексов, управляемых от ЭВМ), сокращением основного времени (за счет совершенствования рабочего процесса путем внедрения прогрессивного режущего инструмента, сталей улучшенной обрабатываемости и т.д.), применением систем программного и адаптивного управления, приводящих к экономии как основного, так и вспомогательного времени и повышающих точность обработки.

Развитие вычислительной техники, электроники позволило создать высоконадежные, компактные и все более приемлемые с экономической точки зрения средства управления. Вычислительная мощность этих средств позволяет решать одновременно и задачу оптимизации рабочего процесса. Вместе с тем, применительно к резанию, сложность которого как предмета изучения общеизвестна, получение информации о его протекании с помощью простых средств остается не полностью решенной задачей. Получившие ограниченное распространение динамометрические датчики и датчики мощности главного привода дают интегральную оценку рабочего процесса, опосредованно связанную с физическими явлениями, свойственными резанию, и непригодны для финишных операций.

Наибольшую эффективность совершенствования или регулирования рабочего процесса следует ожидать тогда, когда для этой цели используется информация, непосредственно связанная с этими физическими явлениями. Очевидно, выгодно получать информацию о рабочем процессе, используя присущие ему эффекты без применения каких-либо измерительных преобразователей, встройка которых может вызвать конструктивные трудности или снизить универсальность станка. Среди этих эффектов в первую очередь представляют интерес те, которые связаны с сигналами, не требующими преобразования энергии, то есть электрическими.

Из вышеизложенного следует, что исследование электрических явлений при резании как электрического отображения рабочего процесса является актуальным и представляет собой новое



направление в науке о резании и металлорежущих станках, отдельными сторонами которого занимались А.А.Аваков, А.М.Даниелян, Т.Н.Лоладзе, А.Д.Макаров, С.С.Силин, С.Н.Постников, В.А.Бобринский, Ю.М.Золоменцев, В.Н.Подураев, В.В.Цоцхадзе, Н.В.Талантов, О.В.Кретиный и другие.

Цель работы. Совершенствование способов контроля и коррекции режимов резания, входного контроля режущего инструмента и обрабатываемости материала на основе электрического отображения рабочего процесса, разработка единой методологии, пригодной для систем адаптивного управления и диагностики станков.

Методы исследования. Так как теоретико-аналитическое описание кинетики электронов даже в идеализированных моделях дает лишь качественную картину и порядок возникающего сигнала, то основным методом исследования явлений при резании и трении в парах станка был экспериментальный. Применили высокоточную аппаратуру, включавшую комплект для исследования малых токов и напряжений, прецизионный токосъемник, цветовой оптический пирометр, систему термовидения с принадлежностями и другую современную регистрирующе-измерительную аппаратуру. Обнаруженные эффекты легли в основу качественной модели ЭДС резания, на основе которой объяснены многочисленные экспериментальные данные.

Научная новизна. Создана методология построения электрического отображения рабочего процесса; построена качественная модель ЭДС резания, включающая параметры характеризующие энергичность взаимодействия, фактическую площадь контакта и относительное время контактирования. Вскрыта нелинейность вольт-амперной характеристики (ВАХ) внутреннего сопротивления источника ЭДС резания, что позволило резко повысить точность измерения ЭДС, сформулировать требования к измерительным приборам и получить достоверные данные о сопротивлении контакта резец-деталь. Показана применимость модели внешнего трения для изучения процесса резания, объяснено сходство во влиянии на ЭДС свойств обрабатываемого материала и материала инструмента, изучен характер нагружения поверхности раздела. Дополнена и уточнена монотермодинамическая модель ЭДС резания, что требует внесения в метод естественной термодинамики существенных ограничений.

Сформулированные закономерности позволяют трактовать данное исследование как основывающее научное направление, связан-

ное с построением электрического отображения рабочего процесса и узлов трения металлорежущего станка как комплексной системы.

Практическая ценность. Главным результатом работы следует считать разработанную методологию построения электрического отображения рабочего процесса, использование которой в работах научно-исследовательского характера определяет практическую ценность данного исследования. Сформулированы рекомендации, предназначенные для использования в практике металлообработки резанием, разработаны способы и устройства по совершенствованию контроля процесса резания, диагностики пар трения станков и других машин.

Реализация результатов работы

1. Результаты работы использованы во ВНИИТС, опытном заводе "Станкоконструкция", где апробирован входной контроль режущих пластин, на Пермском моторостроительном заводе им. Я.М. Свердлова (при совершенствовании систем адаптивного управления).

2. Изданы рекомендации по использованию электрических явлений при резании для контроля процесса обработки, которые применены рядом предприятий и организаций как справочно-методологический материал. Среди этих предприятий НИИТ, Петрозаводский ПКТИ тракторного производства, СКБ Ярославского завода "Машприбор", Запорожский конструкторско-технологический институт сельскохозяйственного машиностроения, Новочеркасский НИИИМ, СКБ ВПО "Совзнафтемашремонт" и др.

Апробация работы и публикация. Основные положения работыложены и обсуждены на:

1) VI Советании по автоматизации процессов машиностроения, Москва, 3-10.12.1976г.

2) Всесоюзном научно-техническом симпозиуме "Перспективы развития резания конструкционных материалов". Ворошиловград, 9-11.09.1980г.

3) У Всесоюзной научно-технической конференции "Теплофизика технологических процессов". Волгоград, 29.09-1.01.1980г.

4) Научно-техническом Совете Минстанкопрома, 23.11.1977г.

5) Республиканской научно-технической конференции "Пути совершенствования малогабаритных металлорежущих станков и контрольного оборудования". Вильнюс, 25-26.03.1980г.

6) Научно-технических конференциях молодых специалистов: ИПО ЭНИМС (1978, 1980, 1982 г.г.); ЭНИМС-ИМАШ (1976 г.); ИМАШ-ИИТТ-Физтех (1981 г.).

7) Семинарах "Физические проблемы резания конструкционных материалов" при МАИ 17.10.80 г. и 25.03.83 г.; "Физика поверхности" ИИТТ АН СССР 13.05.83 г.; ФТИИТ АН УССР 28.04.83 г.; георетического отдела ИКАН СССР, лаборатории трения и износа ИГиМ АН СССР 25.10.82 г.; коллоквиуме лаборатории общей теории трения ИМАШ АН СССР.

8) Кафедрах АМ-2, АМ-4 МВТУ им.Баумана, технологических кафедрах УДН им.Думумсы, ГПИ им. Ленина, Уфинского авиационного им.Орджоникидзе, Киевского политехнического, Рыбинского авиационно-технологического институтов. Кафедре "Металлорежущие инструменты" Тульского политехнического института.

9) Секции совета НТО Машпром ВНИИинструмент, ВНИИТС.

По теме диссертации опубликовано 40 работ, в том числе получено 14 авторских свидетельств.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Она содержит 369 страниц машинописного текста, 147 рисунков и 9 таблиц; в список литературы включено 332 наименования.

Содержание диссертации. Во введении обосновывается актуальность исследования процесса резания и металлорежущего станка как системы, функционирование которой сопровождается генерированием электрических сигналов.

В первой главе приведен обзор основных закономерностей, описывающих термоэлектрические явления, которые по литературным данным составляют основу генерируемых ЭДС при резании и трении. Фундаментальные исследования показали, что участие свободных электронов одновременно в тепловых и электрических процессах требует для определения термоэлектрических коэффициентов квантово-статистического расчета, чрезвычайно усложняющегося в реальных твердых телах. Это делает невозможным количественный расчет термоэлектрических сигналов и анализ характера взаимовлияния температуры контакта и отмечаемой при этом разности потенциалов без привлечения данных эксперимента.

Термоэлектрические характеристики пары металлов в условиях трения и резания могут отличаться от термоэлектрических характеристик материалов, найденных при отсутствии их взаим-

ного движения. В этой связи в работе приведен обзор исследований явлений генерирования ЭДС при трении и резании.

В работах А.Д.Дубинина, А.С.Ахматова, И.В.Крагельского, С.Н.Постникова, Ф.П.Бюденя и Д.Тейбора подчеркивается спорный характер природы ЭДС, возникающей при трении. Описана лишь феноменология генерирования ЭДС при трении.

Касаясь вопросов генерирования ЭДС при резании, приходится отметить, что несмотря на имевшую место в конце 40-х начале 50-х годов текущего столетия дискуссия о природе ЭДС резания и критику метода естественной термопары (работы Л.И.Леонова, О.Ф.Фокина, Э.С.Фельдштейна), в настоящее время считается (работы А.М.Даниелина, С.С.Можаева, Т.Г.Саромотиной), что модель термоэлектрическая модель ЭДС резания справедлива. Методу естественной термопары, вопросам ее тарирования посвящены работы Т.Н.Лоладзе, А.А.Авакова, В.В.Цоцхадзе, М.Т.Галей, Д.Т.Васильева, Б.Я.Борисова и других.

Другое направление исследований электрических явлений при резании (и трении) возникло после выдвинутого тезиса об отрицательной влиянии, возникающих в зоне резания электрических токов на стойкость инструмента. В.А.Бобровским, Ю.С.Дубровым, А.А.Рыжким и другими сформулированы различные гипотезы "электрического" износа инструмента, однако многочисленные экспериментальные данные по проверке эффекта противоречивы.

Оптимизация рабочего процесса с использованием ЭДС резания наибольшее развитие получила в работах А.Д.Макарова, С.С.Силина и их последователей. По подходу к использованию ЭДС эти работы наиболее близки к теме диссертации.

Далее в работе констатируется, что использование электрических сигналов, генерируемых при резании и трении, практически в настоящее время сводится к методу естественной термопары, обоснование которого заключается в сопоставлении с показаниями оптического нирометра (М.Т.Галей) и в динамическом тарировании по методике А.А.Авакова (Т.Г.Саромотина). В целом по обзору и анализу состояния вопроса сделаны следующие выводы:

1. Изученность электрических явлений при трении и резании не отличается полнотой картины.

2. Предшествующие работы по изучению электрических сигналов при резании затрагивали главным образом три аспекта: приемлемость метода естественной термопары; оптимизация рабо-

чего процесса по ЭДС (полагая ее связь с температурой резания установленной); борьба с гипотетическим "электрическим" износом режущего инструмента.

3. Применение ЭДС резания в системах автоматического регулирования станков для целей оптимизации вызвало ряд трудностей как метрологического порядка, так и по физической сути критерия оптимизации.

Во второй главе рассмотрены вопросы техники измерения и разработки обоснованной методики получения информации из зоны резания и пар трения станка в виде естественно возникающих электрических сигналов, то есть принципы построения электрического отображения рабочего процесса. Исследование является дальнейшим развитием кандидатской диссертации, в связи с чем основная часть работы выполнена на том же станке, который укомплектовали дополнительной контрольно-измерительной аппаратурой. При разработке принципиальной электрической схемы измерения, помимо выделения цепи ЭДС, резания и исключения части источников помех, предусмотрели контроль уровня искажений сигнала от оставшихся путем подключения соответствующей измерительной аппаратуры. Например, параллельно с измерением ЭДС резания фиксировали ЭДС токосъемника и подшипниковых узлов станка. Использовали комплект контрольно-измерительной аппаратуры модели И37/1 и другие приборы, обеспечивающие для повышения точности непрерывную регистрацию измеряемого сигнала. В целях снижения искажений силу тока определяли путем измерения падения напряжения на шунте, номиналом 0,001 Ом.

Для электрического соединения с вращающейся обрабатываемой деталью применили вновь аттестованный применительно к рабочим токам и частотам вращения токосъемник модели СК-6 фирмы "НВМ" (ФРГ). В ряде экспериментов применили монолитные твердосплавные резцы, обрабатывали материалы, содержащие минимум примесей и дефектов. Контроль температуры, наблюдение за изменением температурных полей осуществили с помощью цветового оптического пирометра модели "Веселка 3-1" и системы термовидения модели 680 фирмы "АБА" (Швеция) с соответствующей вспомогательной аппаратурой.

Оценка искажений, возникающих в канале измерения ЭДС резания показала, что основным их источником является токосъемник, прежде всего влияющий на наклон ВАХ пассивного участка цепи. В случае применения инструмента с механическим креплением ре-

жущих пластин в ВАХ пассивного участка цепи источника ЭДС резания, получаемой экспериментально, также возникают искажения, обусловленные термо-ЭДС в стыке пластина-державка и дополнительным сопротивлением, вносимым этим стыком в контур. Однако, эти искажения малы: сопротивление стыка пластина-державка при максимальном токе не превышает 20% от сопротивления даже очень хорошего токосъемника; термо-ЭДС $E_{ст}$, направленная при обработке твердым сплавом стали встречно ЭДС резания, — менее 4% от установленного значения ЭДС резания при тчении гладкого цилиндра. Электрические свойства подшипников качения характеризуются большим переходным сопротивлением при вращении и генерацией собственной ЭДС. Первое обуславливает малую величину тока, вносимого подшипниками шпинделя станка в канал измерения ЭДС резания, в силу чего специальных мер по изоляции обрабатываемой детали от массы станка не требуется.

Подшипники качения, контакт резец-деталь, токосъемник и стык пластина-державка резца с механическим креплением являются нелинейными элементами электрической цепи: их переходное сопротивление зависит от силы тока. Это требует оценки переходных сопротивлений (особенно токосъемника) при рабочей силе тока в цепи. Поэтому в работе испытанию токосъемников уделено большое внимание, в результате чего разработаны конструкции токосъемников (А.с. 509925, 598163, 649071), характеризующиеся собственной ЭДС, не превышающей ЭДС режущего токосъемника СК-6. Если имеется возможность снятия припуска несколькими режущими лезвиями одновременно, то съем электрического сигнала, например, с целью контроля состояния инструмента (А.с. 56378, 634854) возможен без токосъемника.

На первом этапе исследования полагали, что ВАХ сопротивления скользящего контакта резец-деталь R_k линейна, то есть $R_k = R_k(I)$ и $U_k = R_k I$, где U_k — падение напряжения на контакте резец-деталь, I — ток в цепи. Принимая во внимание электрические свойства подшипников, полную электрическую схему замещения, например при токарной обработке, можно свести к простой схеме (рис. 1), где $E = U_{дстак}$ — ЭДС резания; R_d — сопротивление токосъемника; mV_1 и mV_2 — милливольтметры постоянного тока с входным сопротивлением не менее 20 КОМ.

Заменяя источник ЭДС резания E и его внутреннее сопротивление R_k активным двухполюсником АС, можно построить обобщенную ВАХ пассивного участка цепи (рис. 2). На рис. 2: 1 —

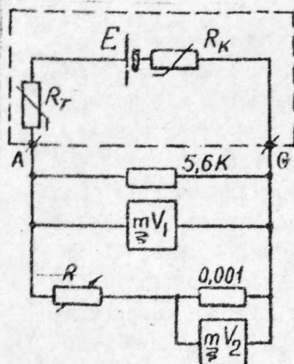


Рис. 1. Схема замещения после анализа помех

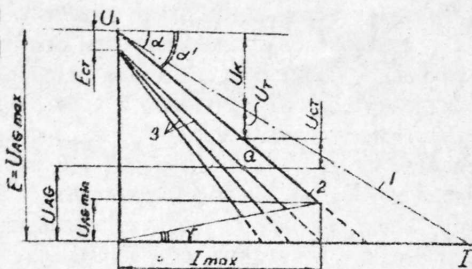


Рис. 2. Обобщенная ВАХ пассивного участка цепи источника ЭДС резания

линейная ВАХ с сопротивлением контакта R_K , численно равным $\tan \alpha$ 2-ВАХ, получаемая при точении монолитным твердосплавным резцом при использовании токосъемника с сопротивлением R_T , численно равным $\tan \alpha' - \tan \alpha$; 3 - семейство (теоретически) получаемое при точении различными резцами с механическим креплением твердосплавных пластин. При этом: $R_{min} = U_{AG\ min} / I_{max}$, численно равно $\tan \gamma$; I_{max} - максимальный ток через шунт 0,001 Ом; $U_{AG\ min}$ - показания прибора mV_1 при максимальном токе. Для любой точки Q ВАХ справедливо равенство:

$$E = U_{AG} + U_{CT} + U_T + U_K,$$

где U_{AG} - показания прибора mV_1 , U_{CT} - падение напряжения на стыке пластина-державка ($U_{CT} \approx 0$), U_T - падение напряжения на токосъемнике. В этом случае сила тока короткого замыкания во внешней цепи (без токосъемника) может быть определена по формуле:

$$I_{K3} = \frac{E I_{max}}{E - (U_{AG\ min} + I_{max} R_T)} \quad (1)$$

Практически внешняя цепь ЭДС резания разорвана из-за значительного электрического сопротивления вращающихся подшипников. Однако, существуют предпосылки для возникновения локального тока, циркулирующего вокруг режущего лезвия. С помощью составного резца получили, что отношение силы локального тока к силе тока во внешней цепи при ее замыкании через подшипники

имеет порядок 1000:1.

Из-за уменьшения сопротивления контакта резец-деталь R_K с ростом тока полные ВАХ пассивного участка цепи источника ЭДС резания (рис.3) являются существенно нелинейными. Для них требуется записать:

$$U_K = R_K(I) \cdot I \quad (2)$$

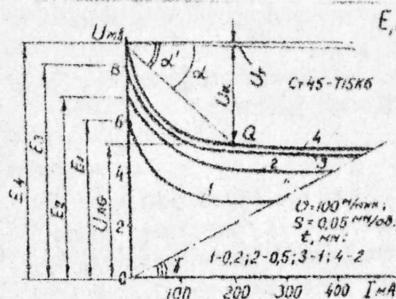


Рис.3. Полные ВАХ пассивного участка цепи источника ЭДС резания

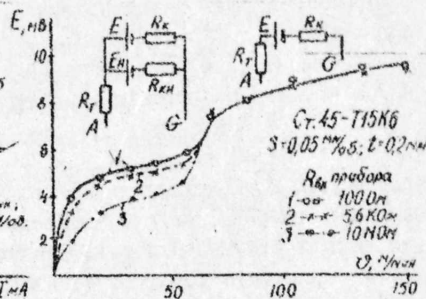


Рис.4. Влияние входного сопротивления прибора на сигнал

Поскольку ВАХ зависит от глубины резания (см.рис.3), основная нелинейность связана с сопротивлением R_K , а не с токоосъемником ($R_T=5 \text{ мом} - \text{const.}$). Проводимость скользящего контакта резец-деталь ухудшается с увеличением глубины резания и улучшается с ростом плотности тока. Можно показать, что источник отдает максимальную электрическую мощность на нагрузку R , равную R_T . В области больших токов кривые $U(I)$ (см.рис.3) вырождаются в прямые, наклон которых характеризует сопротивление токоосъемника (см.рис.2). Нелинейность ВАХ и величина R_K становятся незначительными, в силу чего максимальная мощность развивается на нагрузке, равной сопротивлению токоосъемника.

Наоборот, измерение ЭДС резания в силу нелинейности ВАХ E при применении милливольтметров с малым входным сопротивлением (рис.4) может привести к грубым ошибкам. В зоне малых скоростей (нараста) возникает два контакта: один с прежней ЭДС E и сопротивлением R_K , а второй - на участках поверхности раздела, где возникает нарост, с собственной ЭДС E_H и переходным сопротивлением R_{KH} . При этом $R_{KH} < R_K$, а E_H возникающая

при контактировании фактически одноименных материалов (см. ниже) существенно меньше E . В этом случае активный двухполюсник AG следует дополнить цепочкой, состоящей из E_n и R_{KH} , а для U_{AG} , считая $U_T = 0$, получаем:

$$U_{AG} = \frac{E + E_n \frac{R_k}{R_{KH}}}{1 + \frac{R_k}{R_{KH}}} - U_k \quad (3)$$

Поскольку с уменьшением тока R_K растет, то переход к прибору с большим входным сопротивлением в зоне наростообразования уменьшит U_{AG} : $\lim_{I \rightarrow 0; R_K \rightarrow \infty} U_{AG} = E_n$.

Таким образом, получение электрического отображения процесса резания сводится к анализу двух функций:

$$E = E(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

$$R_K = R_K(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где $x_1, \dots, x_n$ — технологические параметры обработки: скорость резания, глубина, подача, обрабатываемость материала, износ режущего инструмента и т.д. Первую функцию можно получить в режиме холостого хода, то есть при увеличении нагрузки R (см. рис. 1), а вторую — в режиме короткого замыкания, то есть при $R=0$. Как метод исследования процесса резания электрическое отображение обеспечивает: безинерционное получение информации непосредственно из зоны резания и во время реализации рабочего процесса, отсутствие искажающего влияния на объект исследования, возможность анализа сигналов, возникающих на субатомном уровне, вне ограничений механики сплошных сред.

Третья глава посвящена физике генерирования электрических сигналов.

Строго говоря, до настоящего времени природа возникновения ЭДС при резании металлов остается неизвестной. Косвенными признаками отсутствия по крайней мере однозначной связи между ЭДС резания и температурой можно считать: малое увеличение ЭДС с ростом температуры контакта (износом резца); малое отличие ЭДС резания до и после полного восстановления обрабатываемой детали и резца; крайне незначительное уменьшение ЭДС при интенсивном поливе смазочно-охлаждающей жидкостью; чувствительность ЭДС к силе F_z ; практически постоянство ЭДС резания в опытах с подогревом обрабатываемой детали, описанных в литературе.

Автором показано, что ЭДС резания зависит от давления на поверхности раздела. В случае резания с небольшими глубинами ($< 1 \text{ мм}$) зависимость ЭДС резания практически аналогична зависи-

мости ЭДС трения на задней поверхности реза от скорости скольжения, что заставляет считать трение по задней поверхности основным источником ЭДС резания. Баланс электрических проводимостей подтвердил его предположение (см. ниже). Зависимость R_K от глубины резания при постоянной силе тока через контакт реза-деталь (см. рис. 5) свидетельствует об уменьшении фактической площади этого контакта с ростом глубины, так как фактическая площадь контакта обратно пропорциональна R_K . На рис. 5 приведены функции $R_K(t)$ для стали, свинца и графита. При резании графита (слабом взаимодействии по передней поверхности) R_K постоянно, а в двух других случаях — растет с увеличением t . Следовательно, в диапазоне глубин до 1-2 мм контакт на поверхности раздела (вне зоны наростообразования) дискретен, о чем свидетельствует вид ВАХ R_K и функции $R_K(t)$, а для его изучения применима модель внешнего трения скольжения.

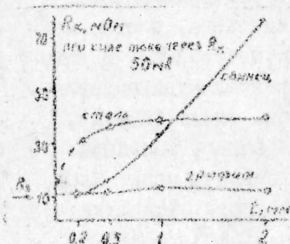


Рис. 5. Изменение сопротивления контакта реза-деталь при увеличении глубины резания

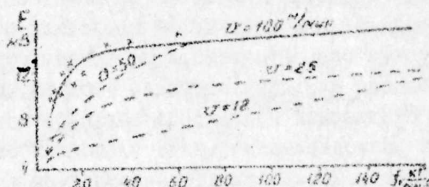


Рис. 6. Влияние давления на ЭДС трения.

На рис. 6 приведена экспериментальная зависимость ЭДС трения реза по задней поверхности от давления, полученная при различных скоростях скольжения. Характер кривых аналогичен скоростной зависимости ЭДС резания. Насыщение ЭДС при меньшей скорости наблюдается при большем давлении, и наоборот, большая скорость приводит к насыщению при меньшем давлении. Следовательно, давление на поверхности раздела существенно сказывается на ЭДС резания и может лежать в основе ряда ее зависимостей от параметров обработки резанием.

Изучение потенциального влияния магнитных полей, наводимых электрическими локальными токами (см. выше), возникающими

при резании на их первопричину — ЭДС провели путем искусственного создания в обрабатываемой детали мощного (1,5 Тл), по сравнению с полыми, которые могли бы наводить локальные токи, магнитного поля и сравнения ЭДС при отсутствии и возникновении поля. Заметного вклада магнитных полей, которые могли бы возникнуть при резании, в регистрируемый сигнал не отмечено.

Оценка влияния на ЭДС смазочно-охлаждающей жидкости показала, что преобладающим является ее смазочное действие. Значительно более интенсивное охлаждение скользящего контакта жидким азотом (-196°C) не позволило выявить сколько-нибудь существенного влияния охлаждения на ЭДС резания. Также не оказало на ЭДС заполнение полого цилиндра (при его обточке) жидким азотом, несмотря на малую толщину металла (1,6 мм), разделявшего азот и резец. Эти факты ставят под сомнение монотермо-электрическую природу ЭДС резания.

Попыткой выделения в ЭДС резания составляющей, не связанной с термоэлектричеством, было выделение в условиях резания трения между одинаковыми материалами. Как известно, в одноименной паре термоэлектричество не может быть существенным. В непроводящей пластине ЦМ332 прорезали отверстие, куда вставляли кусочек обрабатываемого материала (свинец, стали 45, 40Х). При резании сходящая стружка, скользя по керамике, замыкала через скользящий контакт со вставкой измерительную цепь. Наблюдали знакопеременный мало зависящий от скорости скольжения сигнал (рис. 7), достигающий амплитуды $\pm 1\text{ мВ}$. Такой характер сигнала свидетельствует о том, что в области сравнительно малых скоростей явление генерирования инвариантно к тому, движется ли данный контакт (стружка) или он неподвижен (вставка). То есть существенным является только относительное перемещение, несмотря на известный факт значительно большей температуры стружки по сравнению с телом реза. Следовательно, знакопеременность сигнала свидетельствует об его инвариантности к градиенту температуры.

Принимая во внимание величину абсолютной термо-ЭДС для свинца ($-1,3\text{ мВ}/^{\circ}\text{град}$) и сильно зависящую температуру резания, считая ее равной температуре плавления свинца (328°C), тем не менее с термоэлектрических позиций невозможно объяснить отмеченную в свинцовой паре амплитуду сигнала в 1 мВ . Максимальное значение термо-ЭДС не может превысить $0,4\text{ мВ}$. При достижении скорости порядка $30\text{--}100\text{ м/мин}$ для пары сталь-сталь наблю-

дается изменение сигнала, который из знакопеременного становится подобием обычно отмечаемой ЭДС резания. Для сопоставления на рис. 7 приведена зависимость ЭДС резания от скорости, полученная при горцевом точении той же заготовки твердым сплавом Т15К6.

Логично предположить, что при трении одноименных металлов между их микронеровностями происходит обмен электронами, так как каждая из этих микронеровностей в силу различной концентрации электронов имеет несколько отличающийся заряд. В условиях трения — в то время как новые микронеровности вступают в контакт, уже контактировавшие, уравнив заряды, расходятся — существуют условия непрерывного обмена зарядами. Поскольку металлы пары одинаковы, то и вероятность перехода и перераспределения зарядов одинакова, что выражается в знакопеременном,

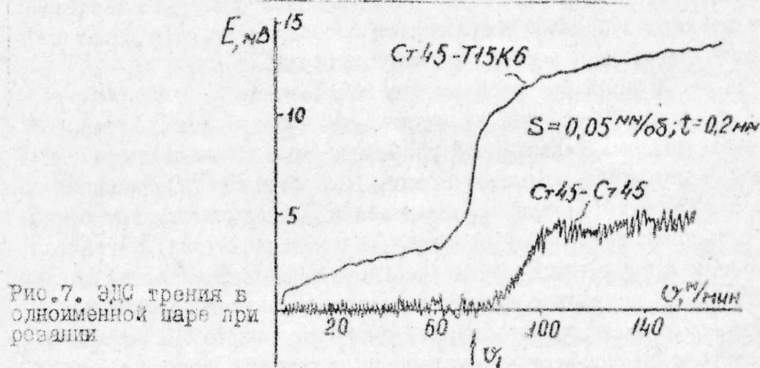


Рис. 7. ЭДС трения в одноименной паре при резании

симметричном относительно нуля сигнале. При достижении определенной скорости температура контакта достигает того уровня, когда в трущейся паре возникает температурный градиент, достаточный для смещения динамического равновесия в одну сторону. В случае, показанном на рис. 7, наблюдали преимущественно перемещение электронов из стружки в резец (противоположно направлению тока, плюс прибора соединен с обрабатываемой деталью). Это вызвано разогревом стружки, в результате которого направленное перемещение электронов стало возможным. Возникшая при этом разность потенциалов стремится компенсировать переход электронов, в результате чего во внешней цепи — цепи прибора — возникает движение электронов от вставки к обрабатываемой де-

тали и стружке. При резании твердым сплавом смещение сигнала связано с отличием свойств материалов пары: с разницей в работе выхода электронов для стали 45 и твердого сплава Т15К6. В силу этого имеет место преимущественное движение электронов в месте скользящего контакта из стали в твердый сплав. Соотношение работ выхода электронов и определяемая тем самым полнота сигнала аналогичны, естественно, тому, что наблюдали при их статическом нагреве. Однако, если полюбавать пару, контакт которой в условиях резания возбуждает электроны реза в большей степени в сравнении с электронами обрабатываемого материала, то наблюдается термоэлектрическая аномалия. Так при обработке чистого кремния твердым сплавом полнота сигнала не совпадает с той, что наблюдается при статическом нагреве. Определенный уровень энергии соударения микровыступов (скорости резания) возбуждает электроны трущейся пары стекающие в сторону материала с большей акцепторной способностью, что ведет к резкому увеличению регистрируемого сигнала.

На рис. 8 показана зависимость ЭДС резания E от скорости v , полученная при точении технически чистого свинца твердосплавным резцом. Характерной особенностью этой зависимости является чередование областей малых (1) и больших (2) значений ЭДС. В областях (1) трение при резании происходило между свинцом и твердым сплавом, в то время как в областях (2) фактически возникал скользящий контакт свинец-свинец. Химическая инертность свинца позволяет исключить влияние каких-либо окисных пленок на процесс генерирования, а резкие скачки ЭДС отрицают возможность их порождения средней температурой контакта, которая не может столь быстро и радикально меняться. Существенным отличием контакта свинец-свинец от контакта свинец-твердый сплав следует считать более мощные адгезионные интерметаллические связи, возникающие в первом случае. Контакт свинец-свинец характеризуется большей сплошностью. Резкий рост E_k при наличии свинца (см. рис. 5 при $t > 1$ мм) связан с уменьшением длины свободного пробега электронов с ростом степени деформации, и частично, с ухудшением проводимости по задней поверхности реза. Большая ЭДС в одноименной паре (сравните с наростом при резании стали) подтверждает, что основная причина генерирования в паре со столь различными свойствами-деформационное возбуждение свинца. Пассивные электроны твердого сплава практически не участвуют в формировании ЭДС как при наличии, так

и при отсутствии напильника. Поэтому зона (2) отличается от зоны (1) только более мощным возбуждением электронов свинца. Заметно, что с уменьшением скорости резания (деформации) "изометричная" ЭДС в областях (2) также убывает.

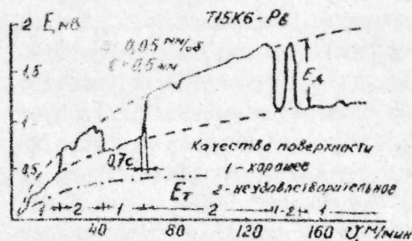


Рис.8. ЭДС при резании свинца

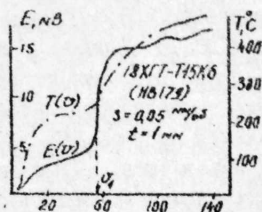


Рис.9. Сопоставление ЭДС и температуры резания

Полагая, что ЭДС зоны (1) E_1 состоит из термо-ЭДС E_T и деформационной E_d , примем, что ЭДС зоны (2) отличается двойной величиной E_d . Тогда $E_2 = E_T + 2E_d$. Кривая E_T (v) построена на рис.8 штрих-пунктиром. Характерно, что она асимптотически приближается к уровню 0,4-0,45 мВ, что совпадает (см.выше) по порядку с объемной термо-ЭДС в свинце.

Для изучения природы ЭДС представляет интерес осуществление процесса резания для одноименной пары – обработки сырой быстрорежущей стали быстрорежущим каленым резцом. В этом случае для кривой E (v) характерны положительная полярность сигнала (так как обычно при использовании быстрорежущего инструмента имеет место отрицательная полярность, т.е. "+" – резец) и его инвариантность к скорости резания. Сигнал, практически равный при скоростях 10 и 60 м/мин, противоречит монотермо-электрической модели ЭДС резания, однако хорошо согласуется со сказанным выше. Деформация более мягкой стали означает, что ее электроны, обладая большими энергиями, смогут перейти в резец. Такой переход является по полярности положительным. В данном случае, естественно, принципиально невозможно обеспечить полную идентичность материалов пар, имевших сильное различие по твердости и структуре, однако в работе показано, что влияние твердости и структуры материала на ЭДС невелико и не может полностью объяснить полученные результаты.

Измерение температуры резания с помощью системы термовидения, то есть оптическим методом, позволило сопоставить (рис.9) зависимости ЭДС - скорость резания и температура - скорость резания. Несмотря на сходство кривых (наличие аналогично зоне малых и больших ЭДС, соответственно зон малых и больших температур) налицо нарушение пропорциональности: в зоне больших скоростей отношение ЭДС к температуре возрастает в 2-2,5 раза, по сравнению с зоной малых скоростей. Увеличение скорости резания с 50 до 65 м/мин вызывает рост ЭДС на 250%, а температуру - всего на 50%. Это подтверждает существенное отличие в протекании процесса резания до (при напоре) и после скорости $v_{\text{крит}}$.

Анализ природы ЭДС в части ее сравнения с температурой резания невозможен без учета парциальных термо-ЭДС, возникающих во всех элементах цепи: обрабатываемой детали, резце, стержне, проводах и т.д. Другими словами необходимо получить картину термоэлектрического баланса зоны резания. Если от положительной клеммы прибора совершить обход цепи, то среди ее элементов, которые (в условиях дальнейшего искусственного охлаждения) могли бы менять свою температуру будут: медный провод, подходящий к контактному стальному винту заготовки, стальная заготовка, монокристаллический твердосплавный резец, резбовой стальной контактный стержень с винтом, медный провод, соединенный с отрицательной клеммой прибора. Искусственное охлаждение торца резца жидким азотом позволило создавать в нем градиент температуры в 216 градусов.

Предположив, что монотермоэлектрическая модель справедлива. Обозначив абсолютные термо-ЭДС обрабатываемой детали, резца и контактного стержня соответственно q_d , q_p , q_c можно записать выражения для интегральной термо-ЭДС для трех случаев: охлаждения резца, находящегося в контакте с обрабатываемой деталью в статике, обычного резания и резания с охлаждением резца, соответственно E_0 , E_p , E_{po} :

$$E_0 = \int_{T_k}^{T_d} q_p(T) dT - \int_{T_k}^{T_d} q_c(T) dT = \int_{T_k}^{T_d} [q_p(T) - q_c(T)] dT \quad (4)$$

$$E_p = \int_{T_k}^{T_d + T_p} q_p(T) dT - \int_{T_k}^{T_d + T_p} q_d(T) dT = \int_{T_k}^{T_d + T_p} [q_p(T) - q_d(T)] dT \quad (5)$$

$$E_{po} = \int_{T_k}^{T_d + T_p} q_p(T) dT - \int_{T_k}^{T_d + T_p} q_d(T) dT - \int_{T_k}^{T_p} q_c(T) dT = E_0 + E_p \quad (6)$$

Во всех выражениях T_a - температура жидкого азота; T_k - температура окружающего воздуха (20°C) и T_p - температура резания. Полярность каждой парциальной термо-ЭДС выбрана с учетом направления тока, создаваемого ею во внешнем контуре, считая положительный ток, текущий от обрабатываемой детали через токоотъемник и измерительный прибор к резцу (от А к Г). Записи E_0 , E_p и E_{p0} , полученные при резании сталей, свинца и сплава ЗИ787 в широком диапазоне скоростей резания, то есть при существенных изменениях T_p , показали: термо-ЭДС при охлаждении резца в статике не зависит от обрабатываемого материала и равна 2 мВ; при резании разница в интегральной ЭДС в случае охлаждения резца в установившемся после врезания и охлаждения тепловом режиме стабильна и также равна 2 мВ. Это подтверждает правильность вышеприведенной модели баланса парциальных термо-ЭДС элементов контактной зоны. Обозначив через q абсолютную термо-ЭДС твердого сплава относительно стали и принимая во внимание тождественность обрабатываемого материала материалу контактного стержня ($q_d = q_c$), перепишем (4)-(6):

$$E_0 = \int_{T_a}^{T_k} q(T) dT; \quad E_p = \int_{T_k}^{T_p} q(T) dT$$

При резании объем металла подвергавшегося разогреву незначителен и локализован в сходящей стружке, которая не входит в термоэлектрический баланс, поэтому зависимость q от температуры можно пренебречь. Тогда:

$$T_p = (T_k - T_a) \frac{E_p}{E_0}$$

и в случае резания сплава ЗИ787 минимальная(!) оценка температуры резания составит 1728°C , а при резании хромистых сталей T_p превзойдет 2000°C . Очевидно, столь высокие значения температуры резания, значительно превышающие температуру плавления стали, лишены физического смысла. Следовательно, ЭДС резания имеет существенную составляющую, обусловленную механическим, деформационным возбуждением металлических поверхностей. Вероятно, можно говорить о деформационном усилении термо-ЭДС или наоборот, о роли температуры как "катализатора" деформационного возбуждения электронов. Практически наиболее важно, что метод естественной термопары принципиально зависит температуры резания, а аналогия между неподвижным спаем традицион-

ной термопары и контактом резец-деталь, вообще говоря, не оправдана.

Наблюдавшиеся результаты находятся в хорошем соответствии с высказанным о модели генерирования: ЭДС растет со скоростью резания (увеличивается количество микровыступов, контактирующих в единицу времени) и давлением (увеличивается количество контактирующих микровыступов), причем сходным образом. Вполне объяснимым с этих позиций является и отсутствие существенного влияния интенсивного охлаждения на ЭДС резания.

Несмотря на спорный характер электризации при трении, есть все основания считать, что в скользящем контакте отдельные микровыступы могут иметь неодинаковый заряд, а механическая энергия трения и деформирования через тот или иной механизм увлечения электронов способствует электризации этих микровыступов. Допустим, что каждая пара микровыступов заряжается до некоторой постоянной одинаковой разности потенциалов U_0 . Очевидно, если отдельный микроконтакт будет неподвижен, то итоговая разность потенциалов по прошествии некоторого весьма малого времени τ_0 будет равна нулю. Наоборот, если время контакта τ пренебрежимо мало, то оставшаяся в микроконтакте разность потенциалов будет близка к начальной. Основываясь на этих рассуждениях для ЭДС резания может быть получена формула:

$$E = U_0 \frac{R_0 C_0}{R_K C_0} \exp\left(-\frac{\tau_0}{\tau}\right) \quad (7)$$

где $\tau = \frac{\alpha_0}{C_0} \sqrt{\frac{R_0}{R_K}}$, α_0 — минимальный размер пятна контактирования, C_0 — минимальная скорость резания, необходимая для поддержания в цепи тока, а отношение сопротивления по задней поверхности R_0 к R_K характеризует фактическую площадь контакта. В значительном диапазоне скоростей резания из-за очень малого времени релаксации электронов τ_0 справедливо соотношение $\tau \gg \tau_0$, однако при неограниченном увеличении скорости ЭДС стремится к экстремуму, когда из-за малости α_0 наступает равенство $\tau \approx \tau_0$. В диапазоне практически значимых скоростей в формировании ЭДС решающую роль играет число микровыступов, параллельно реализующих контакт и время обновления этих микровыступов. Очевидно, чем больше число микровыступов и чем чаще они сменяют друг друга, отдавая импульсы тока в измерительную цепь, тем при прочих равных условиях больше будет регистрируемая ЭДС.

Из формулы следует, что влияние на ЭДС глубины резания и подачи должно быть весьма близким. Так оно и есть на самом деле, если ограничиться не слишком большими глубинами резания. Вначале как при увеличении подачи, так и при увеличении глубины наблюдается рост ЭДС резания. Это связано с уменьшением отношения R_0/R_k (см. рис. 5), что связано с разгрузением передней поверхности реза. Дальнейшее увеличение как подачи, так и глубины ведет к быстрому насыщению, и ЭДС перестает расти. При еще большем увеличении глубины резания вступает в действие λ (см. ниже) изменение проводимости по задней поверхности из-за относительного увеличения скорости скольжения, что ведет к снижению ЭДС. Подача таких изменений не вызывает, так как наличие вспомогательного угла в плане исключает какие-либо существенные изменения проводимости по задней вспомогательной поверхности.

Идентичность влияния подачи и глубины на ЭДС резания прослеживается и на скоростной зависимости ЭДС при наличии граничной скорости $\dot{\phi}_L$. Как увеличение глубины резания, так и подачи однозначно вызывают уменьшение этой скорости. Существование скорости $\dot{\phi}_L$ вызвано тем, что до определенной для каждой пары инструмент-обрабатываемый материал скорости резания имеют место значительные адгезионные взаимодействия, возникновение интерметаллических связей, что вызывает интенсивное наростообразование и резкое ухудшение качества поверхности. Контакт в этом случае осуществляется между обрабатываемым материалом и частицами этого материала на рабочих поверхностях инструмента, деформируемых в результате схватывания при трении. Относительно малая скорость скольжения (резания) наряду с большим давлением на поверхности раздела создают условия для развития адгезионных связей. При этом возникает контакт весьма близкий к сплошному, причем в одноименной паре. В пользу такой интерпретации говорят многочисленные вырывы, царапины, следы наводкивания на обработанной поверхности. При этом R_k нестабильно, но уменьшается по абсолютной величине, а отношение R_0/R_k максимально (см. также рис. 4). Следствием этих процессов является малая величина ЭДС до граничной скорости. Характерно, что изменение как подачи, так и глубины резания не оказывает влияния на величину ЭДС, соответствующей скорости $\dot{\phi}_L$. Другими факторами постоянного давления на поверхности раздела, характерного для образования нароста, в условиях почти сплошного контак-

та, соответствует и постоянству ЭДС.

Вблизи граничной скорости $\mathcal{C}_g$ из-за более слабых интерметаллических связей между обрабатываемым материалом и инструментом срывается нарост и при дальнейшем увеличении скорости контакт в основном происходит по отдельным микровыступам. С позиций отдельного микроконтакта такое взаимодействие является более интенсивным, хотя при прочих равных условиях рабочий процесс в целом становится менее энергозатратным. По-видимому, с этим связаны известный факт уменьшения сил резания после достижения определенной скорости, изменение характера и коэффициента трения со скоростью и глубины упрочненного слоя. ЭДС в силу названных факторов резко увеличивается, опережая увеличение температуры контакта. Уменьшение граничной скорости с ростом глубины резания (до 1-2 мм) и подачи связано с тем, что уменьшение давления позволяет расширить диапазон скользящего контакта по вершинам микронеровностей, который при большем давлении сменяется контактом обрабатываемый материал-обрабатываемый материал. Нарост вытесняется с передней поверхности.

Следовательно, монотермоэлектрическая модель ЭДС резания некорректна. Объяснить экспериментальные факты можно лишь считая весомым вклад в ЭДС непосредственного деформационного возбуждения части электронов обрабатываемого металла, которое приводит к увеличению их энергии до уровня, достаточного для преодоления потенциального барьера в условиях формирования новых металлических поверхностей. В этой связи метод естественной термопары приемлем только тогда, когда деформационное возбуждение разрушаемого металла минимально, например, при обработке быстрорежущим инструментом стали с большей работой выхода электронов.

В четвертой главе рассмотрена взаимосвязь ЭДС резания и технологических параметров обработки.

Как следует из модели генерирования и известно из опыта скорость резания наиболее сильно влияет на ЭДС, в результате чего вид функции $E(\mathcal{C})$ является наиболее информативным. С этих позиций сравнивали кривые $E(\mathcal{C})$, полученные в одинаковых условиях для следующих материалов: железа Армо, стали Ю, 38ХМ0А, 18Х1Т, 9ХС, 65Г, ХВГ, Х12М, 9Х18, 4Х13, 8ХФ, Х6ВФ, 7Х12ВМ, сплавов ЗИ787, ВТ-6, титана, свинца, молибдена, бериллия, кобальта, никеля, ниобия, а также графита и кремния при их об-

работке сплавом Т15К6. Материалы, не склонные к наростообразованию, дают монотонный рост ЭДС с увеличением скорости, а другие — резкую немонотонность и наличие граничной скорости U_* на кривых $E(U)$. Взаимосвязь между видом кривой $E(U)$ и наростом можно использовать для исключения тех областей режимов резания, где образуется нарост (А.с.766747).

Как уже говорилось выше, экстремальность зависимости ЭДС от глубины резания, в отличие от подачи, связана с балансом ЭДС и электрических проводимостей на рабочих поверхностях инструмента. Показано существенное отличие ЭДС ($U_{AG\max}$), фиксируемой измерительным прибором и зависящей от E_k и фактических ЭДС (E_p), распределение которых по поверхностям реза получено расчетным путем. Анализ показывает, что E_p на вспомогательной задней поверхности реза E_{p0} лишь незначительно меньше E_p на передней поверхности. Вместе с тем, «из-за лучших условий проводимости источник ЭДС на вспомогательной задней поверхности имеет наибольшую электрическую мощность. Из изложенного ясно, что при измерении $U_{AG\max}$ фактически в большинстве случаев измеряют сигнал, наиболее близкий к ЭДС E_{p0} . Несмотря на увеличение E_p по мере удаления от вершины реза вдоль режущей кромки (то есть по мере увеличения глубины резания), возрастает скорость скольжения, и резко уменьшается проводимость скользящего контакта. При этом в общем сигнале $U_{AG\max}$ источники ЭДС, возникающие в элементарных контактах более удаленных от вершины реза, становятся все менее существенными.

Влияние диаметра обработки при постоянной скорости резания у вершины реза и глубине резания на ЭДС сводится к анализу зависимости ЭДС $E_n (= U_{AG\max})$, регистрируемой прибором от скорости резания, то есть функции $E_n(U)$, для которой получается формула:

$$E_n(U) = E_{p0} + \varepsilon \frac{\int_0^U U e^{-aU} dU}{\int_0^\infty U e^{-aU} dU}$$

где ε и a — коэффициенты. Функция $E_n(U)$ с увеличением U монотонно растет, стремится к пределу:

$$\lim_{U \rightarrow \infty} E_n(U) = E_{p0} + \varepsilon U_0 + \frac{\varepsilon}{a}$$

Следовательно, E_n в случае обработки малого диаметра с той же скоростью будет больше, чем при обработке большого, что и под-

твердил эксперимент. Единственным необходимым свойством E_p в этом случае (независимо от ее физической природы) является ее рост с увеличением скорости резания, что согласуется с моделью генерирования. Другими словами, взаимные глубины резания, подачи и формы режущей части инструмента на ЭДС резания (U_{ac-max}) связано как с перераспределением электрических проводимостей по отдельным участкам скользящего контакта на рабочих поверхностях инструмента, так и с изменением давления на поверхности раздела. По этой причине ЭДС резания обратно пропорциональна длине контакта режущего лезвия.

Режущий инструмент в процессе работы подвержен износу, который искажает его форму и уже поэтому сказывается на ЭДС. Наибольший практический интерес представляет изучение этой связи с точки зрения возможности получения на основе ЭДС информации об износе инструмента. Износ инструмента вызывает изменение уравновешивающих тепловых потоков, возникающих в контактной зоне в момент врезания, оказывающихся на температурной составляющей ЭДС и термо-ЭДС в стыке пластина-державка. Связанные с этим начальные (при врезании) изменения ЭДС резания могут служить источником информации об износе инструмента. Дополнительно ЭДС резания связана с износом через площадь фактического контакта и давление на поверхности раздела.

На заводе "Станкоконструкция" получена вероятностная оценка связи ЭДС - износостойкости твердого сплава. При этом статистический анализ показал, что связь оказывается весьма тесной - вероятность предположения, отрицавшего ее, составляет менее 0,1%. Следовательно, можно утверждать, что ЭДС и стойкостные характеристики пластин из твердого сплава связаны между собой. Основываясь на этом, может быть рекомендован входной контроль режущего инструмента - сортировка пластин по ЭДС резания - с применением специальных устройств (А.с. 649514). Судя по кривым стойкости пластин - ЭДС, чем больше допустимый износ, тем менее выгодно применять пластины с большими начальными ЭДС.

По полученным данным ЭДС пропорциональна содержанию карбидов вольфрама в твердом сплаве, а при постоянном химическом составе - меньшей зернистости твердого сплава соответствует меньшая ЭДС. Известно, что зернистость твердого сплава в первую очередь определяет его прочность, а уменьшение содержания связки-кобальта повышает твердость твердых сплавов вольфрамовой группы. Роль связки в образовании ЭДС резания оценена ну-

тем точенности чистого кобальта и оказалась неосуществленной. По величине скорости U , подтверждено, что карбиды вида $(TiW)_x$ обладают меньшей адгезионной активностью к сплавам железо-углерод, чем карбиды WC . Из вышеизложенного следует, что для сплава с большей адгезионной активностью при $U < U_c$ ЭДС будет меньше и наоборот. Эксперимент показал, что действительно при $U < U_c$ $E_{BK-6} < E_{Ti5K6}$, несмотря на то, что в зоне больших скоростей $E_{BK-6} > E_{Ti5K6}$ (рис. 10). Подтверждением связи ЭДС с характером трения являются данные по замеру ЭДС резания для пластин с износостойкими покрытиями. Наибольшая ЭДС соответствует пластине без покрытия марки $Ti5K6$, а наименьшая — с покрытием нитридом титана TiN . Фрикционная износостойкость покрытия обуславливает максимальное время обновления микровыступов, что резко снижает ЭДС.

Вышеперечисленные особенности твердых сплавов и полученные экспериментальные данные позволяют интерпретировать связь ЭДС с качеством твердого сплава следующим образом. При постоянном химическом составе уменьшение зернистости и увеличение твердости твердого сплава позволяют повысить прочность поверхностных слоев инструмента и сопротивление вырву микрочастиц карбидов, определяющих износостойкость твердых сплавов. Следовательно, каждый микровыступ на поверхности твердого сплава, образующий микроконтакт, где генерируется электрический импульс, реже обновляется. В соответствии с вышеизложенным такая ситуация должна снизить ЭДС. Изменение химического состава твердого сплава, выражающееся в увеличении содержания карбидов за счет кобальта, уменьшает адгезионное взаимодействие, площадь фактического контакта и, следовательно, время обновления и ЭДС растет.

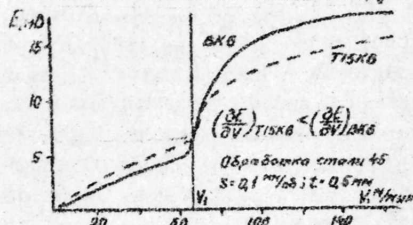
Уменьшение твердости твердого сплава с ростом температуры вызывает уменьшение прироста ЭДС, при этом для твердого сплава с большей твердостью при той же температуре ($Ti5K6$) уменьшение прироста ЭДС, не зависимо от ее абсолютной величины, должно происходить медленнее. Вычислим производную $\partial E / \partial \sigma$:

$$\frac{\partial E}{\partial \sigma} \approx U_0 \frac{R_0}{R_K \epsilon_0} \quad (8)$$

Различение при данной температуре (скорости) означает увеличение фактической площади контакта, или: $(R_0/R_K)_{BK-6} > (R_0/R_K)_{Ti5K6}$. Тогда из формулы (8): $(\partial E / \partial \sigma)_{BK-6} > (\partial E / \partial \sigma)_{Ti5K6}$. При

этом в зоне малых скоростей, но больших σ_T , различия в величине $\partial E / \partial \sigma_T$ должны быть больше, что и подтвердил эксперимент (см. рис. 10). В зоне наростообразования преобладают отличия в адгезионной активности карбидов твердых сплавов (см. выше). Время обновления микровыступов для сплава ВК6 больше из-за его большей адгезионной активности, следовательно, ему соответствует меньшая ЭДС. На основании вышеизложенного связь между ЭДС резания и износостойкостью твердого сплава можно считать

Рис. 10. Влияние различия в адгезионной активности и размягчения твердого сплава на ЭДС резания



доказанной и физически объяснимой и рекомендовать осуществление входного контроля инструмента на основе измерения ЭДС резания.

Получение информации об истинных свойствах обрабатываемого материала, которыми он обладает в процессе резания, является основой, на которой должна базироваться оптимизация рабочего процесса. Анализ показал, что наиболее информативен вид кривой $E(\sigma)$, которая изменяется в зависимости от распределения давлений, электрических проводимостей, а также от характера и коэффициента трения, структуры инструментального материала и других взаимосвязанных и взаимообусловленных факторов процесса резания. Характер кривой для данного обрабатываемого материала и режима обработки меняется в зависимости от марки твердого сплава или формы режущей части пластины. Наиболее существенно при этом меняется абсолютная величина ЭДС, скорость, соответствующая перегибу кривой $E(\sigma)$, а значительно меньше — границы зоны наростообразования — σ_T . Кривые $E(\sigma)$, полученные в одинаковых условиях при обработке 24 различных материалов для удобства анализа подвергли простейшей формализации. Регистрировали скорость σ , и учитывали три точки кривой $E(\sigma)$, соответствующих скоростям резания 20, 80 и 100 м/мин, причем в зоне наростообразования наряду с фактическим значением ЭДС для данной скорости E_σ , учитывали и гипотетическую ЭДС E_T , соответствующую как бы отсутствию нароста.

По относительному увеличению ЭДС резания, которое характеризовали отношением ЭДС для двух выбранных скоростей резания

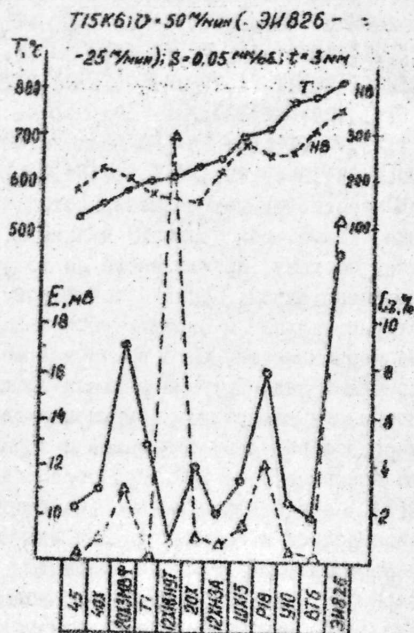
50 и 100 м/мин, обрабатываемые материалы располагаются в следующей последовательности ($E_{100} : E_{50}$ приведено в скобках): 9Х.З (I, II); 4Х13 (I, I4); Si (I, I5); ХВГ (I, I8); 9ХС (I, I8); Х6ВГ (I, 21); Х12М (I, 26); Ti (I, 27); 3И787 (I, 28); I3ХТ (I, 29); железо Армко (I, 32); 65Г (I, 33); С (I, 33); Рв - без налипания (I, 33); 7Х12ВМ (I, 35); ВТ-6 (I, 38); $\lambda/8$ (I, 41); Рв - с налипанием (I, 44); Со (I, 55); 8ХФ (I, 6); Мо (I, 63); Ве (I, 70); Ni (I, 78); Ст10 (I, 83). Наибольшее приращение ЭДС соответствует мелкозернистой стали 9ХФ, молибдену, бериллию, пластичной стали Ю и никелю. Стали, близкие по химическому составу, прежде всего по содержанию углерода и хрома расположены рядом. Стали с повышенным содержанием углерода (инструментальные и отличающиеся высокой износостойкостью) стоят на первом месте, в то время как мелкозернистые и пластичные замыкают ряд. Другими словами наблюдается та же тенденция, что и для материала инструмента-твердых сплавов: увеличение карбидообразующих элементов и зерна в обрабатываемом материале вызывает рост ЭДС. При обработке таких материалов кривая $E(\varphi)$ значительно раньше (по скорости резания) достигает точки перегиба и насыщения. Для этих материалов отношение $R_0/R_{\text{н}}$, характеризующее площадь контакта, будет меньше, чем для мелкозернистых и пластичных материалов. Нагрузка на контакт, определяемая сечением среза, реализуется на меньшей фактической площади, что создает условия для реализации в контакте максимального числа микровыступов, и насыщение кривой $E(\varphi)$ происходит при меньшей скорости.

При расположении обрабатываемых материалов по возрастанию температуры резания, измеренной оптическим способом в условиях свободного резания, получили последовательность: Ст15, 40Х, 20Х3МВФ, титан, I2Х18Н9Т, 20Х, I2ХНЗ, ИК15, Р18, У10, ВТ-6, 3И826. Если не считать обработки стали I2Х18Н9Т, сопровождающейся интенсивным наростообразованием, снизившим ЭДС, наблюдается подобие распределения ЭДС резания и содержания хрома в обрабатываемом материале (рис. II).

Общность, присущая механизму влияния на ЭДС как обрабатываемого материала, так и материала инструмента находится в хорошем соответствии с предложенной моделью генерирования ЭДС, которая является принципиально симметричной относительно контактирующих поверхностей. По этой причине в случае контакта односторонних материалов в зоне умеренных скоростей сигнал носит знакопеременный характер (см. рис. 7). Выявленная общность

сть позволяет сделать вывод о симметричности процесса резания с точки зрения генерирования ЭДС, который представляет собою специфическую фрикционную пару. Тогда влияние карбидообразующих элементов связано с истирающим воздействием обрабатываемого материала. Эксперимент, при котором сравнили ЭДС резания для частей одного прутка стали 40Х, подвергнутых различной термообработке, показал, что наблюдаются

Рис. II. Распределение температуры резания, твердости, содержания хрома и ЭДС резания для ряда конструктивных материалов



две тенденции: увеличение ЭДС с ростом твердости обрабатываемого материала и рост ЭДС с увеличением зернистости перлита и переходом его в пластинчатое состояние. Известно, что параллельно увеличивается и истирающая способность стали 40Х. Однако основным механизмом влияния твердости обрабатываемого металла на ЭДС является повышение давления на поверхности раздела. Экстремальные истирающие условия создали при обработке чистого кремния. При этом ЭДС резания достигает сотен милливольт, то есть увеличивается на порядок! Исходя из монотермоэлектрической модели, полиарность ЭДС резания аномальна, а ее величина дает минимально возможную температуру резания более 2300°C , что лишено какого-либо смысла.

Следовательно, сопоставление традиционных характеристик обрабатываемости металлов с ЭДС резания позволяет прийти к выводу о том, что она отражает реальные изменения их свойств в процессе резания, то есть является информативным сигналом.

Пятая глава посвящена разработке способов использования генерируемых электрических сигналов. Изучение физики процесса

резания в конечном счете служит цели наиболее выгодного осуществления рабочего процесса, то есть подбору такого режима, который обеспечит минимальную себестоимость обработки при удовлетворении всех требований к качеству продукции. Попытки учета фактического взаимодействия обрабатываемого материала и материала инструмента и интенсивности процесса нашли свое отражение в способах определения оптимальной по износу скорости резания. По А.Д.Макарову установлено постоянство ЭДС резания для определенной пары инструмент-обрабатываемый материал в смысле ее инвариантности к сечению среза для раз найденной оптимальной с точки зрения износа инструмента скорости резания.

Интерпретация ЭДС резания как сигнала, связанного в значительной степени с деформационным возбуждением поверхностных слоев и определяемого кинематической сплошностью контакта, позволяет по-новому трактовать оптимизацию по ЭДС. Поиск оптимальной скорости можно представить, как нормирование энергии, приходящейся на отдельный микроконтакт. Если температура, возникающая в скользящем контакте, может служить мерой энергии процесса трения в паре, повышение которой выше определенного уровня увеличит износ, то ЭДС резания характеризует сплошность фактического контакта. Не случайно учет температуры (рис. II) позволил выявить пропорциональность ЭДС содержанию хрома - элемента, образующего карбиды чрезвычайной твердости. Очевидно, только карбидная сетка может реализовать хоть сколько-нибудь продолжительный микроконтакт со стороны обрабатываемого материала. Оптимальное взаимодействие, по-видимому, должно отличаться минимальной фактической площадью контакта, и максимальной энергией, приходящейся на отдельный, непрерывно обновляющийся микровыступ. Если увеличение скорости резания вызывает пропорциональный рост как температуры, так и ЭДС, то это можно интерпретировать как нормальное восприятие скользящим контактом увеличивающейся нагрузки. Однако, если рост ЭДС будет опережать рост температуры, то это может служить признаком "перенапряжения" незначительного по площади фактического контакта, выражающегося в резком сокращении времени обновления пары микровыступов или увеличения числа взаимодействующих микронеровностей. Следовательно, интенсификация режима следует вести до того уровня, пока отношение приращений температуры будет оставаться на прежнем уровне или незна-

чительно меняться. Математически оптимизация выражается в поиске минимума функции dE/dT . Поверочные стойкостные испытания, проведенные как при оптимальной скорости, найденной по этому критерию, так и на других скоростях резания подтвердили действенность критерия и способа на нем основанного (А.с.648383). Оценка температуры резания, например, по объемной термо-ЭДС, возникающей в резце может существенно упростить оптимизацию.

Следовательно, предложенный способ назначения оптимальной по износу инструмента скорости резания (которую можно считать ограничением режима снизу) физически обоснован и экспериментально подтвержден. Наряду с упомянутыми выше другими способами практического использования ЭДС, он образует комплекс мероприятий по совершенствованию обработки резанием на основе использования генерируемых электрических сигналов.

Анализ показал, что и в парах трения станка генерируются электрические сигналы. Различие состоит в частоте и амплитуде сигнала. Их исследование позволило заложить основы использования этих сигналов для целей технической диагностики опор качения и фрикционных элементов станков: подшипников качения, зубчатых зацеплений, электромагнитных фрикционных муфт, автоматических коробок скоростей. Развитие этих работ позволит выявить область использования предложенных способов, включая реализацию принципов безлюдной технологии.

В ы в о д ы:

1. Настоящая работа представляет собой комплексное исследование металлорежущего станка как системы, функционирование которой сопровождается генерированием малых электрических сигналов, применительно к возможности их использования, что позволило создать методологию построения электрического отображения рабочего процесса.

2. Вскрыта нелинейность вольт-амперной характеристики внутреннего сопротивления источника ЭДС резания, то есть сопротивления контакта резец-деталь (отружка). Это позволило резко повысить точность измерения ЭДС, правильно интерпретировать получаемую информацию, сформулировать требования к измерительному прибору и получить достоверные данные о сопротивлении контакта резец-деталь и распределении токов в контактной зоне.

3. Метод электрического отображения дал возможность показать применимость модели внешнего трения для изучения процесса резания (вне зоны наростообразования), объяснить наблюдаю-

щееся сходство во влиянии на ЭДС резания свойства обрабатываемого материала и материала инструмента, изучить характер наугрубления поверхности раздела.

4. Исследование позволило создать качественную модель ЭДС резания, включающую параметры характеризующие энергию взаимодействия макровыступов, фактическую площадь контакта и относительное время контактирования. Модель оправедлива независимо от физической природы ЭДС резания.

5. Исследованы главнейшие факторы, которые могли бы оказывать влияние на возникающую ЭДС. В их числе давление на поверхности раздела, температура резания, охлаждение скользящего контакта, явление наростообразования. Все эти факторы рассмотрены с позиций предложенной качественной модели ЭДС. Это позволило дополнить и уточнить монотермоэлектрическую модель ЭДС резания, что требует внесения в метод естественной термопары существенных ограничений.

6. Измерение и сопоставление с ЭДС температуры резания в широком диапазоне скоростей, изучение термоэлектрического баланса в зоне резания, оценка парциальных термо-ЭДС, в частности путем постановки оригинального эксперимента по искусственному изменению градиента температуры в резце и заготовке в статике и при резании, позволило получить практически прямые доказательства ошибочности подхода к ЭДС резания как сигналу, имеющему только термоэлектрическую природу и объяснить аномальные с термоэлектрических позиций эффекты, сопровождающие резание свинца, ниобия, кремния и других материалов.

7. Обнаружена аналогия во влиянии на результирующий сигнал обрабатываемого материала и материала инструмента. Эта аналогия проявляется во влиянии в обоих случаях зернистости материала и содержании карбидов и карбидообразующих элементов. Выделен в чистом виде сигнал, генерируемый в одноименных парах трения в условиях резания.

8. Модель ЭДС резания позволила по-новому оценить и объяснить связи между технологическими параметрами обработки резанием и возникающими электрическими сигналами. Впервые экспериментально-расчетным путем учтено влияние электрической проводимости на результирующий сигнал в реальных условиях резания. Предложены простые способы контроля наростообразования, оптимизации обработки по износу инструмента без предварительных стойкостных испытаний, контроля состояния инструмента в про-

цессе резания.

9. Исследование позволило сравнить и подтвердить преимущества новых инструментальных материалов — твердых сплавов с покрытием, предложить способ для оценки совершенства этих покрытий, непосредственно в процессе резания.

10. Предложены способы использования ЭДС, возникающих в парах трения и элементах конструкции станка, таких как подшипники, электромагнитные муфты, зубчатые передачи или целой технической диагностики, то есть разработанная методология является общей и применима для различных областей изучения процессов трения и резания.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Васильев С.В. Измерение термоэлектрических токов при точении. — Станки и инструмент, 1973, №11, с.31-32.

2. Васильев С.В. Электрические токи в зоне резания. — Станки и инструмент, 1974, №9, с.26-28.

3. Васильев С.В. Термоэлектрические явления как отображение процесса резания. — Станки и инструмент, 1975, №3, с.28-31.

4. Васильев С.В. Термо-ЭДС при резании как характеристика качества твердосплавных пластинок. — Станки и инструмент, 1976, №5, с.27-28.

5. Васильев С.В. ЭДС и электрическая проводимость в зоне резания. — Станки и инструмент, 1979, №8, с.30-31.

6. Васильев С.В. ЭДС и температура резания. — Станки и инструмент, 1980, №10, с.20-22.

7. Васильев С.В. Измерение ЭДС резания. — Станки и инструмент, 1983, №6, с.23.

8. Васильев С.В. ЭДС при контактом взаимодействии тел в условиях резания. Трение и износ, 4, №4, с.716-719.

9. Васильев С.В. Использование термоэлектрических явлений для контроля процесса обработки. — Рекомендации /-М.: ОНТИ, ЭНПАС, 1975. — 17с.

10. Васильев С.В. Использование электрических явлений при резании для коррекции режима обработки. — Методические рекомендации /-М.: ОНТИ ЭНПАС, 1981. — 16с.

11. Васильев С.В. Контроль процесса резания с помощью термоэлектрических токов. — Инф. листок №107-74/-М.: НИИМАШ, 1974. — 2с.

12. Васильев С.В. Совершенствование и коррекция режима резания в мелкосерийном производстве. — Инф. листок №79-73/-М.: НИИМАШ, 1973. — 1с.

13.Васильев С.В.К вопросу о совершенствовании систем адаптивного управления металлорежущих станков.-М.,1977,2с.-Рукопись представлена ЭНИМСом.Деп.в НИИМАШ,МТО-77.

14.Васильев С.В.Температура резания и способы ее определения на современных металлорежущих станках.-В кн.:Перспективы развития резания конструкционных материалов:Тез.докл.Всесоюз.н.-т.симпозиума. Ворошиловград,1980,с.126-127.

15.Васильев С.В.Особенности измерения температуры резания на станках.-В кн.:Теплофизика технологических процессов:Тез.докл.У Всесоюз.конф.,Волгоград,1980,с.202.

16.Васильев С.В.,Синопальников В.А. и др.Сравнение методов измерения температуры резания при применении быстрорежущего инструмента-Изв.ВУЗов.Машиностроение.1983,№6,с.158-160.

17.Васильев С.В.,Евстегнеев М.Ю.,Латышев А.Н.Безразборный контроль натяга в прецизионных подшипниковых опорах-В кн: Станкостроение Литвы/Сб.статей.Вып.13-Вильнюс: Мокслас,с.117-122.

18.Васильев С.В.,Палей С.М.Оценка смазывающей способности СОЖ.- В кн.:Теории трения,смазки и обрабатываемости металлов/Межвузовск.сб. - Чебоксары:Чув.ГУ,1982,с.90-93

19.Васильев С.В.,Юденков Н.И. Испытание токарно-револьверного станка с ЧПУ и адаптивным управлением.-В кн:Металлорежущие станки и автоматические линии.-Сборник/НИИМАШ, вып.2,-М., 1975,с.18-21.

20.Палей С.М.,Васильев С.В.Влияние температуры заготовки, на ЭДС резания - Вестник машиностроения,1983,№1,с.45-46.

21. Kaminskaja W.W., Postman W.T., Wasiljev S.W. *Zeifthin L.N. Messen von Zerspanungskenngrößen in adaptiven Regelsystemen - Werkstatt und Betrieb, 109(1976) 10, s 601-604.*

22.А.с.477823(СССР).Предохранительное устройство к металлорежущим станкам с программным управлением/Ю.А.Лешенко,С.В.Васильев.-Опубл.в Б.И.,1975,№27.

23.А.с.503025(СССР).Токоосъемное устройство/Ю.А.Лешенко, С.В.Васильев.-Опубл.в Б.И.,1976,№13.

24.А.с.536378(СССР).Способ контроля состояния режущих кромок инструментов/Ю.А.Лешенко,С.В.Васильев.-Опубл.в Б.И.1976, № 9.

25.А.с.598163(СССР).Токоосъемное устройство/С.В.Васильев, М.П.Козочкин.-Опубл.в Б.И.1978,№10.

26.А.с.616548(СССР).Способ оценки качества зубчатого зацеп-

ления/М.Ю.Евстегнеев,С.В.Васильев,М.П.Козочкин.-Опубл.в Б.И.
1978, №27.

27.А.с.629467(СССР).Способ определения работоспособности
подшипников качения/С.В.Васильев,А.Н.,Латышев.-Опубл.в Б.И.,
1978, №39.

28.А.с.634854(СССР).Устройство для контроля состояния ре-
жущей кромки инструмента/Ю.А.Лещенко,С.В.Васильев,-Опубл.в Б.
И., 1978, №41.

29.А.с.648383(СССР).Способ определения скорости резания/
С.В.Васильев,М.П.Козочкин.-Опубл.в Б.И., 1979, №7.

30.А.с.649071(СССР).Токоъемное устройство/С.В.Васильев,
М.Ю.Евстегнеев,А.Н.Латышев,-Опубл.в Б.И., 1979, №7.

31.А.с.649544(СССР).Устройство для определения режущих
свойств твердосплавных пластинок/Ю.А.Лещенко,С.В.Васильев.-
Опубл.в Б.И., 1979, №8.

32.А.с.753547(СССР).Способ контроля износа режущей кром-
ки инструмента/С.В.Васильев-Опубл.в Б.И., 1982, № 15.

33.А.с.786747(СССР).Способ определения зоны наростообра-
зования при резании /С.В.Васильев,Л.А.Ломко.-Опубл.в Б.И.
1980, №36.

34.А.с.890096(СССР).Способ оценки работоспособности элект-
ромагнитной фрикционной муфты/М.Ю.Евстегнеев,В.С.Ревеко,С.В.
Васильев - Опубл.в Б.И., 1981, №46.

35.А.с.1009620(СССР).Способ контроля состояния режущей
кромки инструмента/С.М.Палей,С.В.Васильев-Опубл.в Б.И., 1983,
№ 13.

Л.№ - ЛВ7773 к печ. 1Л7.83 Заказ 970 2 печ.л.

Тираж 100 экз. Ротационная печать. 107005. Москва, 2-я Бауманская, 5