


*На правах рукописи*



**Сальников Сергей Владимирович**

**ТОЧЕНИЕ ЗАГОТОВОК С ДИСКРЕТНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ  
ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ЗОНУ РЕЗАНИЯ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Шадский Геннадий Викторович

Официальные оппоненты: Козлов Александр Михайлович,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный  
технический университет», заведующий  
кафедрой «Технология машиностроения»

Хандожко Александр Владимирович,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный  
технический университет», начальник  
отдела модульного оборудования  
лаборатории «ВДКУ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Белгородский государствен-  
ный технологический университет  
имени В.Г. Шухова»

Защита состоится «05» февраля 2019 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.271.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, 92 (9-101)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:  
[http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Salnikov\\_SV/](http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Salnikov_SV/)

Автореферат разослан «11» декабря 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Черняев  
Алексей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** Характерным признаком современного производства является непрерывный рост требований к эксплуатационным характеристикам выпускаемой продукции, что сопровождается появлением новых материалов, обработка которых традиционными методами представляет значительные трудности. Несмотря на это, доля операций механической обработки остается достаточно высокой.

Известно большое многообразие способов повышения эффективности процесса резания. Перспективным направлением считается его интенсификация путем введения в зону резания дополнительных потоков энергии, снижающих силы резания. Целый ряд исследований посвящен, в частности, выбору их вида, интенсивности, места и условий ввода. Однако окончательных ответов на вопросы их согласования с основным потоком энергии нет.

Проведенный анализ показал, что наиболее гибким и универсальным способом является электроимпульсная интенсификация. Она позволяет реализовать широкий набор механизмов воздействия на зону резания (нагрев, электропластичность, микровзрыв, термические напряжения, электромагнитные силы). Однако вопросы мониторинга состояния упругопластического деформирования материала в зоне резания при точении, синхронизации с фазой его изменения и определения интенсивности электрического воздействия остались нерешенными.

Вышесказанное позволяет сделать вывод, что исследование и разработка высокоэффективных технологических процессов механической обработки с дискретным электрическим воздействием на зону резания, инициализирующим в ней дополнительные локальные источники механической энергии, обеспечивающие уменьшение сил резания, износа инструмента и энергоемкости, являются весьма актуальными.

Диссертационная работа выполнялась в рамках исследований по проектам РФФИ № 10-08-97512-р\_центр\_а «Разработка и внедрение высокоэффективных технологических процессов механической обработки металлов, использующих дополнительное дискретное электрическое воздействие, оптимизирующее процессы разрушения на наноуровне», № 15-48-03270 «Развитие теории интенсификации механизмов направленного разрушения материала электрическим воздействием на зону упругопластического деформирования», № 16-48-710339 «Развитие теории высокоэффективных процессов направленного разрушения материалов, основанных на принципах пространственно-временной адаптации вектора воздействия по состоянию упругопластического деформирования зоны предразрушения».

**Цель работы** заключается в повышении эффективности точения заготовок на основе применения дискретного электрического воздействия на зону резания, форсирующего ее направленное разрушение, обеспечивая уменьшение сил резания, износа инструмента и энергоемкости операций.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы следующие **задачи исследования**:

1. Провести анализ известных методов повышения эффективности процессов резания с электрическим током, а также моделей упругопластического

деформирования материала в зоне резания, позволяющих определить механизм и условия возникновения локальных источников механической энергии в зоне предразрушения.

2. Разработать математическую модель и обосновать условия реализации механизма интенсификации процесса резания при тчении с дискретным электрическим воздействием, основанного на инициализации электромагнитными силами локальных источников механической энергии в зонах первичного и вторичного деформирования материала.

3. Обосновать выбор диагностических сигналов о динамике изменения деформированного состояния материала в зоне резания, обеспечивающих синхронизацию интенсифицирующего электрического воздействия с его фазой, с целью генерирования в ней дополнительных локальных источников механической энергии.

4. Разработать алгоритм и устройство интенсификации процесса резания при тчении, обеспечивающих инициализацию дополнительных локальных источников механической энергии в зоне резания электромагнитными силами, наводимыми в ней дискретным электрическим воздействием.

5. Провести экспериментальные исследования тчения заготовок с дискретным электрическим воздействием на зону резания.

6. Провести апробацию результатов исследований в производственных условиях и учебном процессе.

**Объектом исследований** являются процессы тчения заготовок с введением дополнительного потока электрической энергии в зону резания.

**Предметом исследований** являются модели и механизмы взаимодействий основного и дополнительного потоков энергии в зоне резания, условия их ввода, дозирования и согласования в пространстве и во времени.

**Научная новизна** заключается в обосновании условий генерирования электромагнитными силами, наводимыми в зоне резания дискретным электрическим воздействием, локальных источников механической энергии, форсирующих направленное разрушение материала при тчении, базирующемся на динамических моделях зон первичного и вторичного упругопластического деформирования металла, состоящих из цепочек инерционных элементов с кулоновым трением и упругими связями, позволяющих идентифицировать изменение степени дефектности их структуры и установить ее связь с параметрами интенсифицирующего воздействия.

**Теоретическая значимость работы** заключается в:

- обосновании условий генерирования дополнительных локальных источников механической энергии в зоне резания электромагнитными силами, наводимыми в ней дискретным электрическим воздействием;

- моделях, описывающих механизмы дискретного изменения состояния зон первичного и вторичного упругопластического деформирования материала при тчении, отражающих эволюцию степени дефектности их структуры;

- математическом описании электромагнитных сил, возникающих по границам дефектов (микротрещин) при их обтекании линиями тока по областям их стягивания, определяемым эффективным сечением зон деформирования при тчении.

Эти положения углубляют и конкретизируют методы специальности «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» как области науки и техники в сфере решения задач повышения эффективности точения деталей, в том числе из труднообрабатываемых материалов.

**Практическая значимость работы** заключается в создании:

- методики определения параметров интенсифицирующего воздействия и средств контроля состояния зоны предразрушения материала при точении, учитывающей характеристики обрабатываемого материала и режимы резания;
- алгоритма управления интенсификацией процесса резания при точении, основанного на определении степени дефектности структуры зоны резания и синхронизации с фазой ее изменения дискретного электрического воздействия;
- устройства электротоковой интенсификации точения заготовок, обеспечивающего формирование дискретного электрического воздействия на зону резания с заданными параметрами и согласование его с фазой ее упругопластического деформирования;
- методики и средств технического оснащения экспериментальных исследований процессов точения заготовок с дискретным электрическим воздействием на зону резания.

**Реализация работы**

На основании сформированного подхода и теоретических положений разработаны устройство и способ электротоковой интенсификации процесса резания, обеспечивающие повышение эффективности операции точения за счет уменьшения сил резания, приводящих к снижению их энергоемкости на 10...15 % и повышению стойкости инструмента на 14...16 %.

Результаты работы прошли апробацию и рекомендованы к использованию в ПАО «Тульский оружейный завод» и АО «НПО «СПЛАВ». Они применяются в учебном процессе при подготовке инженерно-технических работников по направлению «Машиностроение».

**Методология и методы диссертационного исследования**

Теоретические исследования процессов точения с электрическим воздействием на зону резания проводились с использованием основных положений технологии машиностроения, механики и теорий резания, автоматического управления, положений электроники и микропроцессорной техники, методов программирования. Вычислительные эксперименты осуществлялись с использованием современных методов и средств математического и имитационного моделирования механических и электромеханических систем на основе стандартных пакетов и программ. Экспериментальные исследования проводились с использованием современного оборудования, испытательных приборов и регистрирующей аппаратуры: токарный станок с ЧПУ 16K20T1 с устройством интенсификации, разработанные генератор одиночных импульсов и узел фиксации деформаций, динамометр ДПУ-1-2, тензометрический датчик ZEMIC H3, пьезоэлектрический датчик Kistler 9131A, осциллограф OWON PDS 5022-S, индикатор часового типа ИЧ-10 и другие измерительные устройства.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Дискретные математические модели динамики первичного и вторичного деформирования материала в зоне резания при точении заготовок, представ-

ленные в виде цепочек инерционных элементов с кулоновым трением и упругими связями, устанавливающие взаимосвязь фазы протекающих в ней релаксационных процессов со степенью дефектности ее структуры, которая определяет эффективное сечение для интенсифицирующего электрического тока и области его стягивания по границам между микротрещинами.

2. Модель генерирования локальных источников механической энергии по границам микротрещин в зоне резания электромагнитными силами, наводимыми в ней дискретным электрическим воздействием, устанавливающая взаимосвязь его энергетических параметров со степенью ее дефектности при точении.

3. Обоснование параметров динамики изменения деформированного состояния материала в зоне резания и ее диагностических сигналов, позволяющих идентифицировать фазу релаксационного процесса для эффективного приложения интенсифицирующего воздействия при точении заготовок.

4. Результаты экспериментального подтверждения теоретических положений, способа определения фазы упругопластического деформирования материала в зоне резания и условий генерирования в ней локальных источников механической энергии электромагнитными силами, наводимыми дискретным электрическим воздействием.

5. Способ интенсификации процесса резания, основанный на генерировании дополнительных локальных источников механической энергии в зоне резания электромагнитными силами, наводимыми в ней дискретным электрическим воздействием, обеспечивающий уменьшение сил резания, износа инструмента и энергоемкости операций точения.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались на I Международной научно-практической конференции «Технология машиностроения и материаловедение», Новокузнецк, 2017 г; XII Международной научно-практической конференции молодых исследователей «Содружество наук. Барановичи-2016», г. Барановичи, Республика Беларусь, 2016 г; международных научно-технических конференциях «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (АПИР), Тула, 2012 – 2014 гг.; Всероссийских научно-практических конференциях «Инновационные наукоемкие технологии: теория, эксперимент и практические результаты», Тула, 2014 – 2016 гг.; региональных молодежных научно-практических конференциях "Молодежные инновации", Тула, 2013 – 2017 гг.; региональных магистерских научных конференциях, Тула, 2012 – 2014 гг., а также на ежегодных научно-технической конференциях кафедр ТулГУ «Автоматизированные станочные системы» в 2012 – 2015 гг. и «Технология машиностроения» в 2016 – 2018 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 17 - в изданиях, входящих в «Перечень утвержденных ВАК Российской Федерации изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней», одна - на английском языке в издании, входящем в международные реферативные базы данных и цитирования Scopus и Springer, в рассмотрении находится одна заявка на изобретение и одна заявка на полезную модель (в соавторстве).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения. Полный объём диссертации составляет 162 страницы с 62 рисунками и 7 таблицами. Список литературы содержит 147 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика работы, обоснованы актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность.

**Первая глава** посвящена обзору способов интенсификации процессов резания и моделей описания деформирования материала в зоне резания на стадии предразрушения. Определены факторы и выделены управляющие воздействия, оказывающие наиболее существенное влияние на энергоёмкость операций точения.

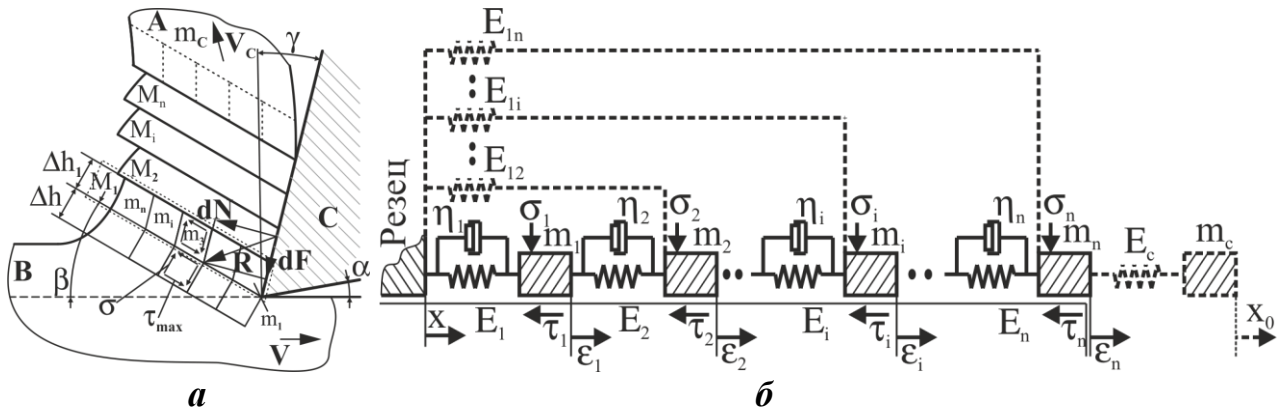
Проведен анализ известных методов повышения эффективности процессов резания (В.Ф. Бобров, В.И. Владимиров, А.С. Верещака, С.А. Васин, Ю.Г. Кабалдин, А.Н. Резников, В.К. Старков, Н.Ф. Талантов, GuiGen Ye, Aco Antic, Z. Li и др.). Ряд исследователей считают перспективным направлением их интенсификации воздействие импульсов электрического тока на зону резания (Ю.С. Степанов, О.С. Элинсон, Н.И. Иванов, А.И. Марков, Т.Г. Насад, Г.В. Шадский и др), причем И.Л. Батаронов, О.А. Троицкий, К.В. Кукуджанов указывают на непосредственное их влияние на физико-механические характеристики обрабатываемых материалов. Исследователи отмечают, что импульсы обладают свойствами избирательного воздействия на дефекты и скопления дислокаций, снижая уровни энергетических барьеров на пути их движения. Это является причиной уменьшения сил резания и износа инструмента.

Однако вопросы определения частоты следования импульсов, их мощности и синхронизации с фазой упругопластического деформирования материала в зоне резания при точении остались нерешенными. Таким образом, актуальными являются исследование и разработка высокоэффективных технологических процессов механической обработки с дискретным электрическим воздействием на зону резания.

На основании вышеизложенного определена цель диссертационной работы и сформулированы задачи научных исследований.

**Вторая глава** посвящена разработке математической модели процессов точения заготовок с дискретным электрическим воздействием на зону резания, устанавливающей взаимосвязь параметров и условий приложения интенсифицирующего воздействия со степенью дефектности ее структуры.

Для описания явлений релаксации на основании известного представления о зоне резания при точении (рис.1,а) предложена математическая модель динамических процессов в ней (рис.1,б). В частности, модель разрушения материала в плоскости сдвига представлена в виде цепочки последовательно соединенных элементов с промежуточными упругими связями и задающим движение звеном. Зависимость коэффициента трения покоя от амплитудного значения дискретного электрического воздействия моделирует, в частности, снижение энергии отрыва дислокаций от стопоров (О.А. Троицкий).



**Рис.1. Зона резания (а), модель динамических процессов (б)**

Движение  $i$ -го элемента цепочки, образующей мгновенную плоскость сдвига в упругопластически-деформируемой среде зоны резания, предложено описывать уравнением

$$E_i \varepsilon_{(i-1)} + \eta_i \dot{\varepsilon}_{(i-1)} + E_{li} \varepsilon_i = \tau_i + (E_i + E_{(i+1)}) \varepsilon_i + (\eta_i + \eta_{(i+1)}) \dot{\varepsilon}_i - E_{(i+1)} \varepsilon_{(i+1)} - \eta_{(i+1)} \dot{\varepsilon}_{(i+1)} + m_i \cdot \ddot{\varepsilon}_i'$$

$$F_{cd} = (\eta_i + E_i t) V - (\eta_i \dot{\varepsilon}_i + E_i \varepsilon), \quad \tau_i = \sigma_i \mu_i, \quad \mu_n = \mu_{n0} - A_{\mu 1} I^2, \quad (1)$$

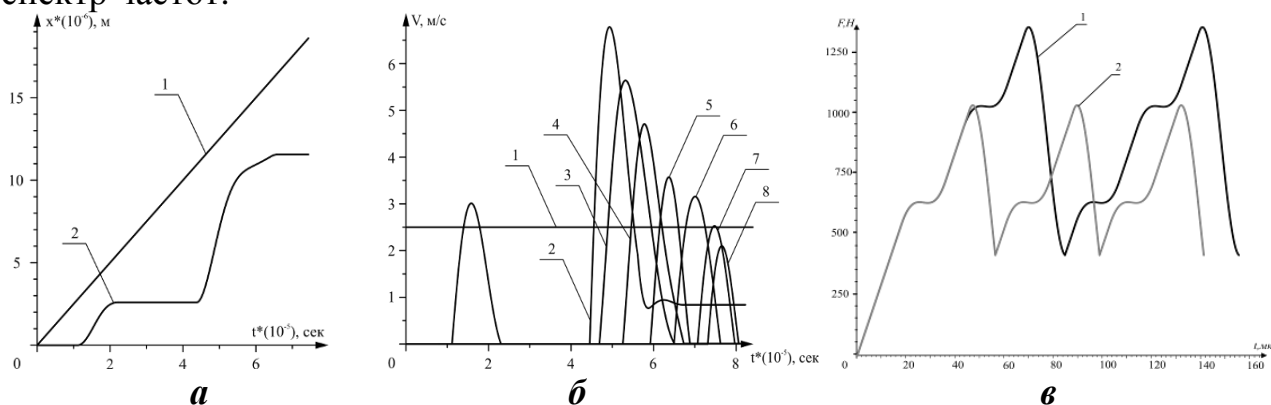
где  $E_i, m_i, \varepsilon_i$  - модуль упругости, масса и деформация  $i$ -го элемента цепочки соответственно;  $\tau_i$  - касательное напряжение, обусловленное наличием сухого трения при скольжении элементов по плоскости сдвига;  $\sigma_i$  - результирующее напряжение, действующее на элемент по нормали к плоскости сдвига;  $\mu_i$  - коэффициент трения, действующий в плоскости сдвига;  $\mu_{n0}, A_{\mu 1}$  - коэффициенты аппроксимации зависимости коэффициента трения покоя от амплитуды импульсов тока;  $E_{li}$  - дальнедействующие упругие связи;  $E_c, m_c$  - модуль упругости и масса свободного конца стружки;  $F_{cd}$  - сила, действующая на режущий клин.

Предложенная модель описывает эволюцию напряженного состояния материала и его проявление в степени дефектности структуры зоны резания при тчении. В процессе математического моделирования сделано предположение о том, что высота фрагментов срезаемого слоя на порядок больше критического радиуса трещины Гриффитса. Их число в плоскости сдвига  $N_{fr}$  варьировалось в зависимости от ее длины с целью обеспечения допустимой точности расчетов и минимально возможной размерности задачи.

Моделирование динамических процессов в мгновенной плоскости сдвига, например для стали 40X ( $E \approx 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ,  $\rho = 8,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_b = 1,2 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ ,  $\rho_{kp} = 10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ), при значениях режимов резания:  $V_p = 0,5 \dots 4 \text{ м/с}$ ,  $S_o = 0,1 \dots 0,5 \text{ мм/об}$ ,  $b_r = 0,2 \dots 2,5 \text{ мм}$ , инструмент - проходной резец Т15К6, главный угол в плане  $\varphi = 45^\circ$ , передний угол  $\gamma = 10^\circ$  (рис.2), позволило сделать вывод, что в процессе тчения в зоне резания происходит дис-



кретное перемещение элементов срезаемого слоя и генерируется широкий спектр частот.



**Рис. 2. Динамика изменения: координат задающего звена - 1 и первого элемента - 2 (а), скоростей всех 7-и элементов (2...8) срезаемого слоя(б), силы резания вдоль плоскости сдвига  $F$ , без тока – 1 и с током – 2 (в) при  $N_{fr} = 7$ , скорости резания  $V_p = 2,5 \text{ м/с}$  и токе  $I_A = 700 \text{ А}$**

Исследование динамических процессов в плоскости сдвига показало, что наиболее существенное влияние на параметры периодических решений и их устойчивость оказывают: режимы резания и характеристики нелинейной зависимости деформации от напряжённого состояния материала, то есть свойства обрабатываемого материала.

Дискретная модель движения стружки по передней поверхности режущего клина отличается меньшим числом элементов в цепочке, большей их массой, наличием свободного конца стружки со значительно большей массой  $m_c$  и незначительным демпфированием, отсутствием дальнедействующих упругих связей  $E_{1i}$  (см. рис.1,б).

Результаты моделирования динамических процессов на передней поверхности режущего клина показали, что электрическое воздействие снижает силы сопротивления движению стружки. В определенных условиях это может форсировать набор скорости свободным концом стружки, что является причиной возникновения разрывающих ускорений в стружке, приводящих к ее фрагментации.

Для оценки влияния интенсифицирующего воздействия на концентрацию напряжений у вершин микротрещин, образующих дефектную структуру материала в зоне резания при точении заготовок, сформулирована и решена задача нахождения распределения нагрузок, вызванных электромагнитными силами, по поверхности микротрещин. Они определяют начало их лавинообразного роста и являются «спусковым крючком» разрушения материала вдоль плоскости сдвига.

Зона предразрушения разбита на цилиндры с осью, проходящей через середину микротрещины и перпендикулярной плоскости сдвига в наибольшем ее сечении. Радиус цилиндра равен половине среднего расстояния между микротрещинами  $b$ . Дискообразная микротрещина характеризуется радиусом, равным его критическому значению, отвечающему условию ее равновесного состояния

$R_{kp} = 2\gamma E / \sigma^2$ , где  $\gamma$  - удельная поверхностная энергия обрабатываемого материала, углом раскрытия и радиусом при ее вершине.

Задача сводится к нахождению электромагнитного поля

$$\text{rot } \vec{E} = 0; \quad \text{rot } \vec{H} = \sigma_I \vec{E}; \quad J = \sigma_I E, \quad (2)$$

где  $E, H$  - напряженности электрического и магнитного полей соответственно,  $J$  - плотность электрического тока,  $\sigma_I$  - электропроводность материала, при следующих граничных условиях ( $ab$  и  $cd$  - основания цилиндра) (рис.3,а):

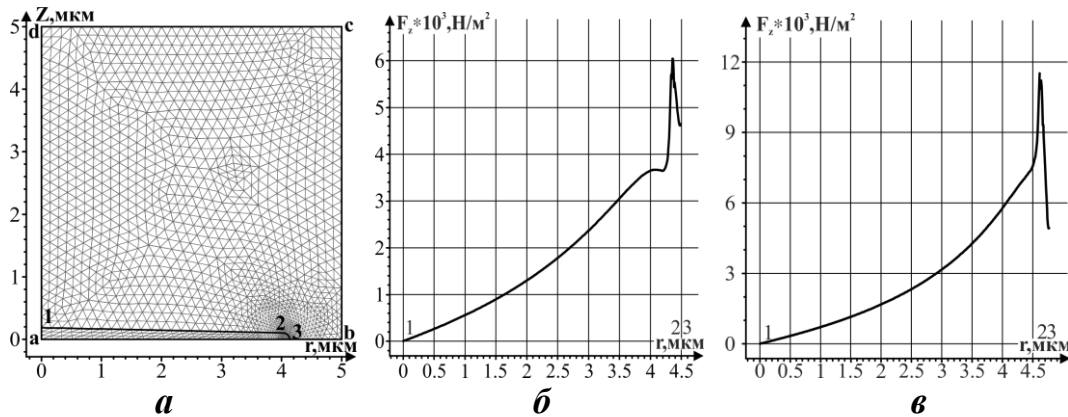
$$\begin{aligned} E|_{ab} = J_m / \sigma_I; \quad E|_{bc} = E|_{da} = 0; \quad E|_{cd} = -J_m / \sigma_I; \\ H|_{ab} = H|_{cd} = J \cdot r / 2; \quad H|_{bc} = J \cdot b / 2; \quad H|_{da} = 0. \end{aligned}$$

Нормальная составляющая электромагнитных сил к поверхности трещин

$$F_n(r) = \mu\mu_0 \int [\vec{j}(r, z) \vec{H}(r, z)]_n dz. \quad (3)$$

В качестве варьируемого параметра для моделирования различной степени дефектности структуры зоны предразрушения  $\psi(\sigma) = R_{kp}^2 / b^2$  использовался критический радиус трещины Гриффитса  $R_{kp}$ .

Проведенные исследования (рис.3) показали, что у вершины микротрещины плотность электромагнитных сил может более чем на порядок превышать интегральное их значение по всей плоскости сдвига и достигать значений  $10^3$  Па и более. Учитывая, что вершина в исходном состоянии является концентратором механических напряжений, этого достаточно для форсирования ее роста.



**Рис.3. Область интегрирования (а) и распределение электромагнитных сил на границе микротрещины при  $\psi(\sigma) \approx 0.75$  (б);  $\psi(\sigma) \approx 0.85$  (в)**

На основании полученных результатов, исходя из условия энергетического равновесия микротрещины, получены зависимости минимального значения интенсифицирующего тока, необходимого для форсирования разрушения предварительно напряженно-деформированного объема материала в зоне резания, характеризуемого определенной степенью дефектности ее структуры:

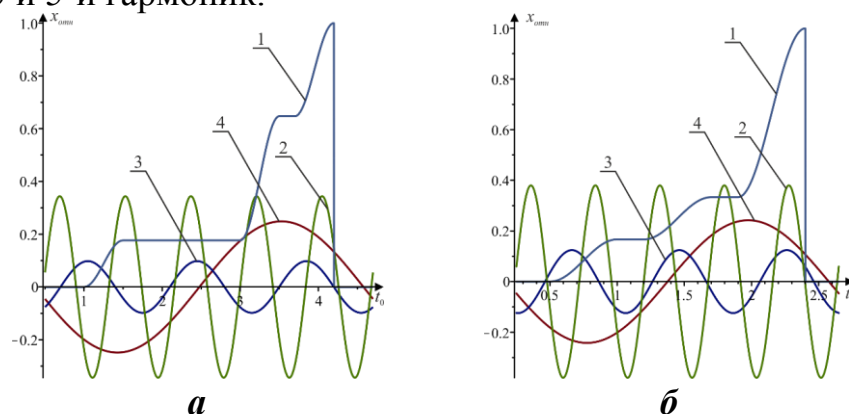
$$I_A = \sqrt{\frac{\sigma_p (S + b) b ((1 - \psi(\sigma)) \cdot (1 - \psi(\sigma) / \psi_{kp}(\sigma)))^{0.5} \cdot (1 - \psi_{kp}(\sigma))}{\mu h}} \approx 0.1b \sqrt{\frac{\sigma_p S}{\mu h}}, \quad (4)$$

где  $h$  - толщина сегмента стружки,  $\mu$  - магнитная проницаемость обрабатываемого материала,  $\psi_{кр}(\sigma)$  - критическая степень дефектности структуры зоны резания, при которой наступает ее разрушение под действием механических напряжений.

**В третьей главе** произведена оценка спектра гармонических составляющих в зоне резания при точении заготовок, обусловленных дискретным характером движения фрагментов срезаемого слоя, обоснован выбор диагностического сигнала для определения фазы упругопластического деформирования материала, определяющей момент подачи интенсифицирующего воздействия, способ и алгоритм интенсификации процесса резания при точении.

Сила, действующая на режущий клин, является функцией напряжений, возникающих в зоне резания. Внешним проявлением релаксационного процесса их изменения является ее периодическое изменение.

Анализ спектральных составляющих координат движения первого элемента срезаемого слоя (рис.4) показывает, что момент достижения высокой степени дефектности структуры зоны резания  $\psi(\sigma) > 0.5$  можно связать с завершением второго его скачка или со временем совпадения соответствующих полуволн 1, 3 и 5-й гармоник.



**Рис.4. Движение первого элемента-1 и его 1, 3, 5-я гармоники (2...4) для скоростей резания: 1,0 м/с (а); 2,5 м/с (б)**

$$(x_{отн} = x/x_{max}, t_{отн} = t/\sqrt{(m_{fr} \cdot N_{fr})/(E \cdot s)})$$

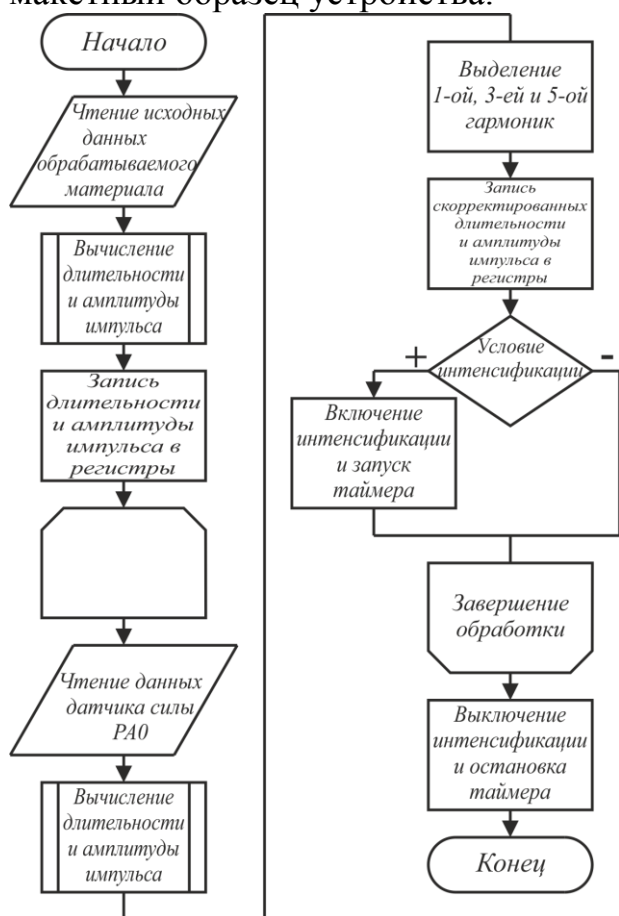
На основании проведенных исследований обоснована структура системы диагностики состояния зоны предразрушения. Предложено в качестве входного контролируемого параметра использовать координаты перемещения первого элемента срезаемого слоя материала, расположенного вдоль плоскости сдвига, определяемые силой его взаимодействия с режущим клином.

На основании проведенных исследований разработан способ обработки металлов с дискретным электрическим воздействием на зону резания, синхронизированным с фазой изменения степени дефектности ее структуры. Длительность импульса рекомендовано выбирать равной утроенному значению задержки начала пластического течения обрабатываемого материала, а амплитуду определять через режимы резания и физико-механические характеристики обрабатываемого материала по зависимости (4).

В четвертой главе приведено обоснование структуры и параметров устройства, реализующего способ электротоковой интенсификации процесса резания, дано его схемное решение. Приведены методика и результаты экспериментальных исследований влияния дискретного электрического воздействия на механические характеристики обрабатываемого материала и технологические показатели процесса резания.

В экспериментальных исследованиях диапазон изменения длительности импульсов для рассматриваемого механизма интенсификации ограничен: с одной стороны, временем образования плоскости сдвига, с другой, задержкой начала пластического течения, их энергия ограничена энергией сублимации материала, определяющей условие возникновения микровзрывов перемычек между микротрещинами в зоне предразрушения. В результате исследований установлено, что при изменении амплитуды импульсов тока от 400 до 800 А при длительности 25...35 мкс коэффициент трения покоя на поверхностях различных материалов уменьшается на 25...50 %, а модуль упругости - на 18...20 %. Влияния тока на предел прочности в рамках поставленного эксперимента не обнаружено.

На основании полученных экспериментальных данных и разработанной функциональной схемы формирователя импульсов электрического тока устройства электротоковой интенсификации (УЭТИ) сформулированы требования и обоснован выбор элементной базы его функциональных блоков. Создан макетный образец устройства.



**Рис 5. Блок-схема алгоритма интенсификации процесса резания**

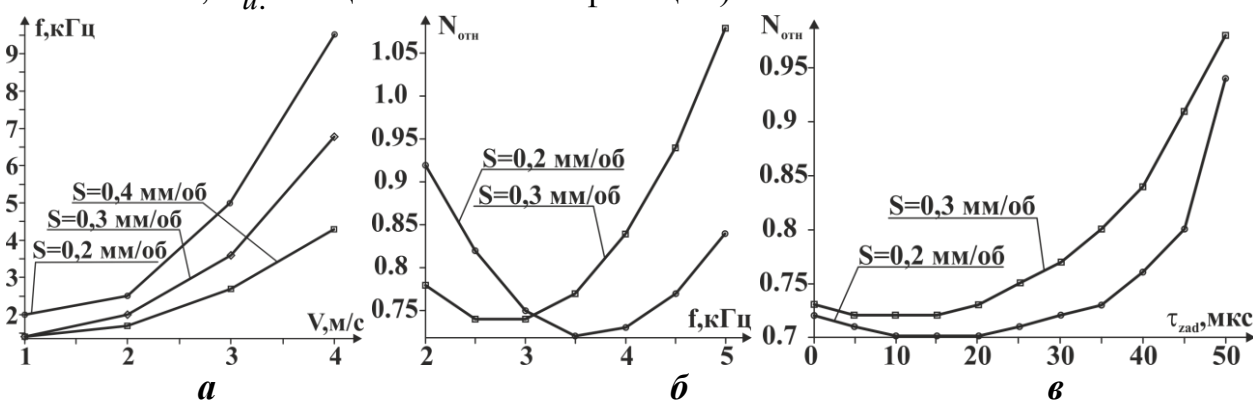
В соответствии с предложенным способом и принципиальной схемой разработан алгоритм функционирования устройства, его блок-схема приведена на рис.5.

На этапе проверки адекватности мониторинга состояния зоны резания средствами разработанного УЭТИ получена зависимость частоты колебаний силы резания от скорости резания и подачи для стали 40Х (рис.6,а). Характер полученных зависимостей хорошо согласуется с результатами теоретических разработок и известных исследований (А.А. Волкова, Л.Л. Евсеева).

На этапе проверки эффективности предложенного способа и устройства электротоковой интенсификации точения заготовок получены зависимости относительного значения мощности резания при интенсификации от длительности и

амплитуды импульсов тока. Они показывают, что при изменении их амплитуды  $I_A$  от 400 до 800 А и длительности  $T_I$  от 10 до 25 мкс относительное значение мощности резания уменьшается на 20...25 %. Эти результаты подтверждают сформулированные ранее теоретические положения.

С целью оценки адекватности предложенного алгоритма интенсификации исследовано влияние параметров настройки УЭТИ на относительное значение мощности резания. Показано, что при значениях глубины и скорости резания  $b = 2 \text{ мм}, V = 2,5 \text{ м/с}$  и  $I_A = 700 \text{ А}$  и  $T_I = 10 \text{ мкс}$  варьирование частоты настройки избирательных фильтров относительно расчетных значений и величины запаздывания интенсифицирующего импульса приводит к увеличению мощности резания (рис. 6), где  $N_{отн} = (P_{м.и.} + P_{и.}) / P_{м.}$  ( $P_{м.}, P_{м.и.}$  - механическая мощность, затраченная станком, без интенсификации и с интенсификации соответственно;  $P_{и.}$  - мощность интенсификации).



**Рис. 6. Зависимости частоты колебаний силы резания от скорости резания (а); относительного значения мощности резания при интенсификации: от частоты настройки избирательных фильтров (б) и от величины запаздывания интенсифицирующего импульса тока (в)**

Результаты исследований (рис.6,в) хорошо согласуются со значениями исходной настройки избирательного фильтра и данными, приведенными на рис. 6,а. Наличие экстремума объясняется необходимостью совпадения момента подачи интенсифицирующего импульса в зону резания с определенной степенью дефектности ее структуры.

Экспериментальные исследования подтвердили возможность практической реализации предлагаемого способа интенсификации процессов точения, снижение в рассмотренных условиях мощности резания на 20...25 %, и некоторое уменьшение шероховатости обработанной поверхности с 5.2 до 4.8 мкм. В результате его внедрения за счет уменьшения сил резания ожидается повышение стойкости инструмента на 14...16 %.

**В заключении** обсуждены итоги и сформулированы общие выводы диссертации.

**В приложении** представлены листинги отдельных модулей программного обеспечения системы управления процессом резания с дискретным электрическим воздействием на зону резания, акты испытаний устройства и использования результатов работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения создания высокоэффективных технологических процессов механической обработки с дискретным электрическим воздействием на зону резания, обеспечивающие снижение сил резания и износа инструмента, а также экономию энергоресурсов, имеющие важное значение для машиностроительных отраслей.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. В результате проведенного анализа показано, что перспективным способом повышения эффективности процессов точения является использование дискретного электрического воздействия на зону резания, согласованного по времени с фазой упругопластического деформирования материала в ней.

2. Установлена взаимосвязь режимов резания и динамики состояния зон первичного и вторичного деформирования материала в зоне резания при точении, описываемая математическими моделями, состоящими из цепочек инерционных элементов с кулоновым трением и упругими связями, позволяющими имитировать релаксационные процессы изменения степени дефектности их структуры с целью идентификации моментов приложения электрического воздействия.

3. Установлена взаимосвязь параметров дискретного электрического воздействия с режимами резания, физико-механическими характеристиками и степенью дефектности структуры материала в плоскости сдвига, раскрываемая на основе математического описания электромагнитных сил, возникающих по границам дефектов (микротрещин) при их обтекании линиями тока и инициализирующих локальные источники механической энергии, которые обладают высокой избирательностью к местам повышенной концентрации механических напряжений у вершин микротрещин и приводят к форсированному их разрушению. В результате математического моделирования установлено, что для инициирования лавинообразного роста микротрещин и направленного разрушения зоны резания необходимо, в частности для стали 40Х, при дефектности ее структуры  $\psi = 0,75$  прикладывать электрическое воздействие с длительностью не менее 10 мкс и амплитудой  $I_A \geq 700 \text{ A}$ .

4. На основании исследований динамики деформированного состояния материала в зоне резания при точении установлено, что совпадение положительных полуволн 1-й и 5-й и отрицательной полуволны 3-й гармоник релаксационного процесса движения фрагментов срезаемого слоя вдоль плоскости сдвига характеризует достижения степени дефектности ее структуры более 50 %. Показано, что использование в качестве диагностического сигнала соответствующих гармонических составляющих колебаний мгновенных значений сил резания позволяет контролировать фазу ее изменения и синхронизировать с ней дискретное электрическое воздействие, форсируя направленное разрушение зоны при минимально необходимой его амплитуде.

5. На основании предложенного подхода разработаны алгоритм управления, способ и устройство для повышения эффективности процесса точения заготовок с дискретным электрическим воздействием на зону резания, синхронизированным с фазой изменения дефектности ее структуры, обеспечивающим инициирование локальных источников механической энергии в точках повы-

шенной концентрации напряжений (подана заявка на полезную модель) и находящим свое отражение в уменьшении мгновенных значений сил резания. Рекомендовано длительность воздействия выбирать не более 3...5 задержек от начала пластического течения обрабатываемого материала, амплитуду по установленной функциональной ее зависимости от режимов резания и физико-механических характеристик обрабатываемого материала и подавать его в момент совпадения положительных полуволн 1-й и 5-й и отрицательной полуволны 3-й гармоник колебания мгновенных значений силы резания.

6. В результате экспериментальных исследований подтверждена квадратичная зависимость модуля упругости и коэффициента трения покоя от амплитудного значения интенсифицирующего тока. Показано, что увеличение амплитуды импульсов тока с 400 до 800 А при их длительности 25...35 мкс приводит к уменьшению модуля упругости на 18...20 %, коэффициента трения покоя на 25...50 %. Установлено, что в этих условиях при обработке стали 40Х относительное значение мощности резания с интенсификацией уменьшается на 20-25% и наблюдается снижение шероховатости обработанной поверхности с 5.2 до 4.8 мкм. Дальнейшее увеличение амплитуды приводит к возрастанию мощности резания.

7. Опытно-промышленная апробация разработанных способа и устройства электротокерной интенсификации процесса резания, основанных на инициализации дополнительных локальных источников механической энергии в зоне предразрушения электромагнитными силами, наводимыми в ней дискретным электрическим воздействием, показала, что их применение позволяет снизить энергоемкость операций точения на 10...15 % и увеличить стойкость инструмента на 14...16 % в зависимости от режимов резания.

8. Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» при подготовке инженерно-технических работников по направлению «Машиностроение».

Научные и практические результаты диссертационных исследований рекомендуется применять при решении задач повышения эффективности точения заготовок из труднообрабатываемых материалов, а также в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов в области машиностроения и повышения квалификации работников машиностроительных предприятий.

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является развитие предлагаемых в работе подходов к синхронизации интенсифицирующего и основного потоков энергии, воздействующих на зону резания, с целью повышения эффективности операций точения и привлечения методов и средств робастного управления комбинированным процессом.

**Содержание диссертации** отражено в 20 научных публикациях, основные из которых:

**Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Шадский Г.В., Ерзин О.А., Сальников С.В. Один из аспектов дискретного представления процесса стружкообразования // СТИН -2017. №8. С. 24-29.

2. Ерзин О.А., Шадский В.Г., Сальников С.В. Условия подвода интенсифицирующего потока электрической энергии к зоне резания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 3. С.65-74.

3. Шадский В.Г., Сальников С.В. Условия возникновения микровзрывов в зоне резания при интенсификации процесса импульсами электрического тока // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 3. С.279-282.

4. Ерзин О.А., Шадский В.Г., Сальников С.В. Один из механизмов разрушения материала при интенсификации процесса резания импульсами электрического тока // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 3. С.293-298.

5. Ерзин О.А., Шадский В.Г., Сальников С.В. Один из аспектов разрушения материала в зоне резания при действии электрического тока // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 3. С.305-308.

6. Шадский Г.В., Сальников С.В. Управление колебательными процессами в зоне резания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 2. С.36-42

7. Шадский Г.В., Сальников С.В. Возможности автоматического управления разрушением зоны резания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 2. С.53-57.

8. Шадский Г.В., Сальников С.В. Нелинейная модель системы управления процессом резания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч.2. С.545 – 554.

9. Шадский Г.В., Сальников С.В. Математическое описание процесса управления разрушением материала в зоне резания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч.2. С.395 – 401.

10. Шадский Г.В., Сальников С.В. Синтез оптимального регулятора процесса резания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч.2. С.560 – 567.

11. Шадский Г.В., Ерзин О.А., Сальников С.В. Анализ методов интенсификации процессов резания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 5. С.284 – 290.

12. Шадский Г.В., Ерзин О.А., Сальников С.В. Техническая реализация электротоковой интенсификации процесса резания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 7. С.139 – 146.

13. Шадский Г.В., Ерзин О.А., Сальников С.В. Дискретная модель движения стружки по передней поверхности режущего клина // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 11. Ч.2. С.553 – 560.

14. Шадский Г.В., Ерзин О.А., Сальников С.В. Управление процессом стружкообразования // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 11. С.99 – 109.

15. Сальников С.В. Исследования влияния параметров импульсного электрического воздействия на модуль упругости материала // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 6. С.349 – 357.

16. Сальников С.В. Устройство электротоковой интенсификации процесса резания // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 6. С.357 – 362.

**Статья на английском языке в журнале, входящем в международные реферативные базы данных и цитирования Scopus и Springer:**

1. Shadskii G.V., Erzin O.A., Salnikov S.V. Dynamic Aspects of Chip Formation// Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. No. 2. P. 130–134.

Подписано в печать 29.11.2018

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага типограф. № 2

Офсетная печать. Усл. печ. л. 1.2 Усл. кр. отт. 1.2. Уч. изд. л. 1.0. Тираж 100 экз.

Тулльский государственный университет. 300012, Тула, просп. Ленина, 92

Издательство ТулГУ. 300012, Тула, просп. Ленина, 95