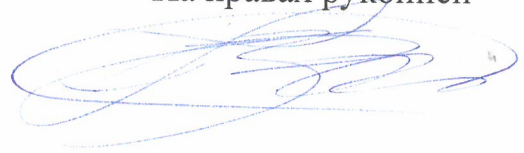


На правах рукописи



КУДРЯВЦЕВ СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НИЗКОСКОРОСТНЫХ  
ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ ЗА СЧЕТ НАНЕСЕНИЯ  
НАНОПОКРЫТИЙ НА РЕЖУЩУЮ ЧАСТЬ ИНСТРУМЕНТА

Специальность 2.5.5 Технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Орел-2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева»

Научный руководитель: **Тарапанов Александр Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Киричек Андрей Викторович**  
доктор технических наук, профессор,  
проректор по перспективному развитию,  
федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Брянский государственный  
технический университет»

**Макаров Алексей Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой ТОММ, СТИ НИТУ  
«МИСИС»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Защита состоится «21» декабря 2023 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.353.02 при ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева» ([www.oreluniver.ru](http://www.oreluniver.ru)) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орел, пл. Каменская д. 1.

Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева» ([www.oreluniver.ru](http://www.oreluniver.ru)) и на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации ([www.minobrnauki.gov.ru](http://www.minobrnauki.gov.ru)).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



О. Г. Кожус

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Современное машиностроение предъявляет все более высокие требования к процессам обработки отверстий осевым инструментом, в том числе процессам окончательной обработки отверстий от которых напрямую зависит качество обработанной поверхности.

Одним из инструментов, применяемым для окончательной обработки отверстий и работающим на сравнительно малых скоростях резания, является развертка, позволяющая получать высокий класс точности и низкую шероховатость обработанной поверхности.

Развертка представляет собой сравнительно дорогостоящий инструмент, поэтому повышение эффективности процесса развертывания является важной задачей.

Ключевым параметром развертки является период стойкости, напрямую зависящий от износа задней поверхности инструмента, который приводит к ухудшению качества обрабатываемого отверстия.

Повышение эффективности процесса развертывания возможно за счет применения одного из наиболее перспективных способов повышения стойкости инструмента – нанесения нанопокровтий на режущую часть инструмента, что позволяет защитить и укрепить поверхностный слой, снизить коэффициент трения и напряжения в зоне непосредственного контакта с обрабатываемым материалом. Эффект применения нанопокровтий усиливается в совместном применении со смазочно-охлаждающими технологическими средствами – СОТС.

Одной из разновидностей нанопокровтий являются эпиламные покрытия, образующие тонкие пленки размером от 40 до 80 нм и создающие на поверхности твердого тела строго ориентированную структуру, существенно снижающую поверхностную энергию материала инструмента. Данные покрытия применяют в качестве противоизносной присадки для увеличения моторесурса, антиадгезионной обработки, повышения качества штамповки такие большие компании как «Силловые машины», «Росатом», завод ГАЗ, КамАЗ, Белшина (Бобруйский шинный завод) и т. д.

В свою очередь, применение эпиламных покрытий в качестве износостойкого покрытия при низкоскоростной металлообработке малоизучено. Следовательно, выявление рациональных режимов эксплуатации разверток при применении эпиламных покрытий является важной задачей.

### **Степень разработанности.**

Изучением процесса эпиламирования, влияния тонкопленочного покрытия на работоспособность узлов трения занимались Г.И. Фукс, Л.В. Тимофеева, И.Б. Ганцевич, Н.А. Рябинин, А.В. Рогачев, И.С. Напреев, М.И. Харченко и др.

Проблемам повышения технологического обеспечения эффективности обработки эпиламированными быстрорежущими сверлами посвящены труды Киричека А.В. и Звягиной Е.А. Их работы показали влияние эпиламных покрытий на стойкость эпиламированных сверл, а также на взаимодействие эпиламных покрытий со смазочно-охлаждающими технологическими средствами.

Однако в их трудах не рассматривается влияние эпиламных покрытий на низкоскоростной процесс развертывания и управление процессом развертывания за счет контроля температуры в зоне резания в режиме реального времени.

**Цель работы:** повышение эффективности низкоскоростного процесса обработки отверстий развертыванием за счет применения нанопокровтий на режущую часть инструмента.

**Объект исследования:** низкоскоростной процесс обработки разверткой отверстий заготовки.

**Предмет исследования:** влияние режимов обработки (подача, скорость резания, глубина резания) низкоскоростного процесса развертывания на температуру в зоне резания и стойкость развертки.

**Задачи исследования:**

1. Провести аналитическое исследование поверхности и поверхностных явлений инструмента, влияния параметров и режимов обработки на стойкость развертки, возможных способов повышения стойкости инструмента, методов определения температуры процесса резания.

2. Провести теоретическое исследование влияния режимов обработки (скорость резания, подача, глубина резания) на температуру (стойкость) процесса развертывания для определения наиболее эффективных и максимальных режимов обработки при применении эпиламных покрытий.

3. Разработать методику управления низкоскоростным процессом развертывания за счет контроля и измерения температуры в зоне резания в режиме реального времени и устройство его реализации.

4. Определить влияние эпиламных покрытий на стойкость развертки, а также экономическую эффективность применения эпиламных покрытий при низкоскоростном процессе развертывания.

**Научная новизна работы:**

- установлена зависимость температуры низкоскоростного процесса развертывания от режимов обработки (скорость резания, подача, глубина резания) для выбора наиболее подходящего типа эпиламного покрытия в соответствии с его характеристиками (предельная температура эксплуатации);

- установлена зависимость максимальной скорости резания от подачи, а также режимы обработки, обеспечивающие минимальный износ инструмента, при совместном применении эпиламных покрытий и смазочно-охлаждающих технологических средств;

- установлена зависимость стойкости развертки от режимов обработки (скорость резания, подача, глубина резания) и диаметра развертки при совместном применении эпиламных покрытий и смазочно-охлаждающих технологических средств.

**Методология и методы исследования** представлены теоретическими исследованиями, базирующимися на теории обработки материалов, инженерии поверхности, экспериментальными исследованиями эпиламированных и неэпиламированных разверток. Исследования программного моделирования процесса резания произведено в программе Deform-3D.

**Теоретическая значимость.** Рассчитанные зависимости температуры в зоне резания от режимов обработки (скорость резания, подача, глубина резания), максимальная скорость резания, а также режимы обработки, обеспечивающие минимальный износ инструмента при совместном применении эпиламных покрытий и смазочно-охлаждающих технологических средств, вносят вклад в исследование низкоскоростного процесса развертывания и могут быть использованы при разработке расчетных методик.

**Практическая значимость:**

- впервые разработано устройство для управления низкоскоростным процессом развертывания за счет контроля и измерения температуры в зоне резания в режиме реального времени;

- разработаны научно обоснованный метод и методика контроля, измерения температуры в зоне резания при низкоскоростном процессе развертывания в режиме реального времени;

- разработана научно обоснованная методика управления низкоскоростным процессом развертывания, которая позволяет определять режимы обработки, обеспечивающие высокие значения стойкости инструмента, в том числе при совместном применении эпиламных покрытий и смазочно-охлаждающих технологических средств и их функциональные алгоритмы для последующего использования на станках с автоматическим управлением.

**Автор защищает:**

1. Результаты экспериментальных исследований по повышению стойкости развертки из быстрорежущей стали до 2 раз при совместном применении эпиламных покрытий со смазочно-охлаждающими технологическими средствами на рабочую часть инструмента.

2. Разработанное устройство для управления процессом развертывания за счет контроля и измерения относительных изменений температуры в зоне резания на основе патентов соискателя, научно обоснованный метод и методику измерения температуры в зоне резания, а также методику управления низкоскоростным процессом развертывания.

3. Результаты теоретического исследования влияния режимов обработки (скорость резания, подача, глубина резания) низкоскоростного

процесса развертывания на температуру в зоне резания для выбора наиболее подходящего типа эпиламного покрытия в соответствии с его характеристиками (предельная температура эксплуатации), а также режимы обработки (скорость резания, подача), обеспечивающие минимальный износ инструмента с сохранением качества обрабатываемой поверхности, зависимость максимальной скорости резания от подачи при совместном применении эпиламных покрытий и смазочно-охлаждающих технологических средств.

4. Экономическую эффективность применения эпиламных покрытий при низкоскоростном процессе развертывания.

**Степень достоверности.** Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки и формализации задач исследования, обоснованностью используемых теоретических зависимостей, принятых допущений, использованием общепринятых методов решения и анализа, а также применением альтернативных методов и подходов в решении задач исследования.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты, полученные в работе, опубликованы в статьях и доложены на 8, 9 и 10-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием им. Академика А. Г. Шипунова (г. Ливны, 2021, 2022 и 2023 г.), 6-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых (г. Курск, 2021 г.), 11-й и 12-й международной научно-практической конференции (г. Курск 2022 г.), а также на научных семинарах и других конференциях.

**Реализация работы.** Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И. С. Тургенева» при реализации программы бакалавриата по направлению 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и программы магистратуры 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

**Публикации:** по теме диссертации получено 2 патента на изобретение, опубликовано 15 печатных работ из них: 4 научных статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК и 11 научных публикаций в материалах конференций, индексируемых в РИНЦ.

**Структура и объем диссертации:** работа состоит из введения, пяти глав, выводов по работе и списка использованной литературы. Текстовая часть работы изложена на 119 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков, 8 таблиц, список литературы из 51 наименования и 3 приложения.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведено обоснование актуальности темы научного исследования, степень научной разработанности темы исследования, определены его объект и предмет, цель и задачи, методология и методы исследования, выявлены теоретическая и практическая значимость,

обозначена научная новизна и приведена информация об апробации результатов, реализации работы, публикациях и структуре диссертационной работы.

**В первой главе** приводится описание инструмента работающего на сравнительно малых скоростях резания, такого как развертка, его классификация, рынок и производство металлорежущего инструмента в России. Приведены основные производители разверток в России. Проведен анализ поверхности и поверхностных явлений инструмента, влияния параметров и режимов обработки на стойкость развертки, возможных методов повышения стойкости инструмента, метода повышения стойкости инструмента при применении нанопокровтий и методов определения температуры процесса резания. Рассмотрена одна из разновидностей нанопокровтий – эпиламы, представляющие собой многокомпонентные системы, включающие фторсодержащие поверхностно-активные вещества (фтор-ПАВ) и регулирующие добавки в различных растворителях. Основным достоинством применения эпиламных покрытий именно для инструмента, работающего на низких скоростях резания, является снижение адгезионного взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала, а при совместном применении с СОТС практически исключается адгезионное взаимодействие. Вследствие чего повышается качество обрабатываемой поверхности, что также является достоинством для низкоскоростного процесса развертывания, как чистового процесса. С точки зрения повышения стойкости развертки и снижения температуры резания. Достоинством эпиламных покрытий является снижение коэффициента трения от 2 до 5 раз, а также «удержание» молекул СОТС на эпиламированной поверхности.

Взаимодействие эпиламных покрытий с поверхностью инструмента выглядит следующим образом: при нанесении эпиламных покрытий формируется слой ориентированных молекул, сильно меняющих энергетические воздействия поверхности инструмента (рисунок 1).

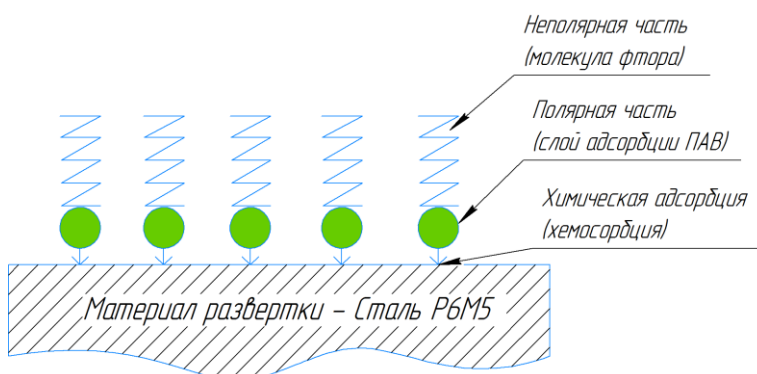


Рисунок 1 – Взаимодействие молекул эпилама с поверхностью инструмента

Молекулы эпилама образуют структуры Ленгмюра в виде спиралей с перпендикулярно направленными осями к поверхности инструмента и закрепляются за счет химической адсорбции, вследствие чего адгезия пленки к поверхности инструмента повышается и позволяет выдерживать удельные нагрузки до 300 кг/кв. мм и температуру до 450 °С.

Большую роль в поверхностных явлениях материала инструмента играют нарушения кристаллической решетки – дефекты, которые могут оказывать существенное влияние на механические и функциональные свойства металлов и сплавов.

Особо высокое сцепление молекул эпилама с поверхностью инструмента обусловлено тем, что молекулы эпилама вступают во взаимодействие с этими электронами, образуя совместную электронную структуру как бы «залечивая» их.

**Во второй главе** представлено теоретическое исследование влияния режимов обработки (скорость резания, подача, глубина резания) и геометрических параметров инструмента при низкоскоростном процессе развертывания на температуру в зоне резания, которая является определяющим фактором, влияющим на стойкость инструмента.

Теоретическое исследование зависимости температуры процесса развертывания от скорости резания (рисунок 2) и режимов обработки (рисунок 3) проведено методом С. С. Силина.

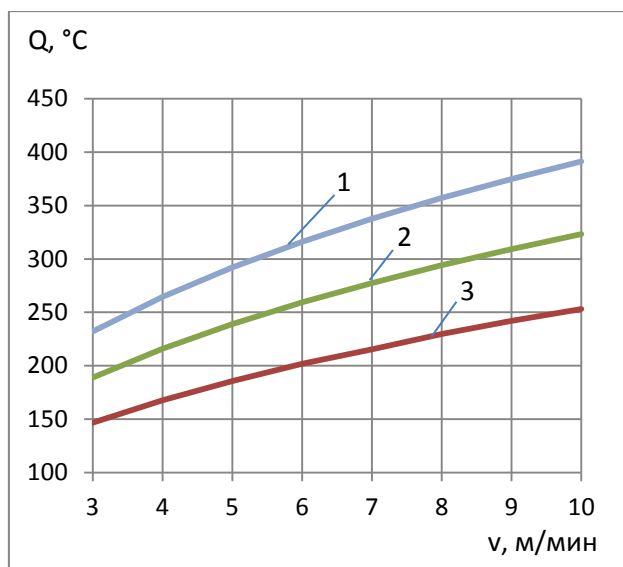


Рисунок 2 – Зависимость температуры процесса развертывания  $Q$  от скорости резания  $v$  при обработке: 1 – стали ХВГ; 2 – стали 40Х; 3 – стали 45.

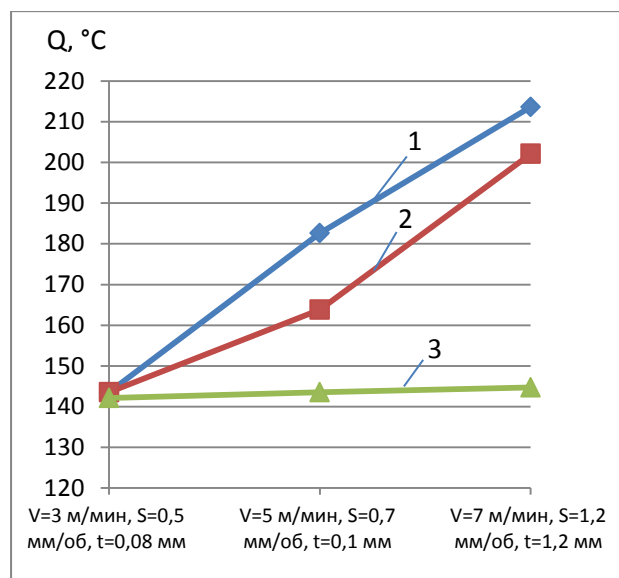


Рисунок 3 – Зависимость температуры  $Q$  процесса развертывания от: 1 – скорости резания; 2 – подачи; 3 – глубины резания при обработке заготовки из стали 45.

На графике (рисунок 2) приведена зависимость температуры процесса развертывания от скорости резания при обработке заготовок из стали ХВГ, 40Х, 45.

Проведено теоретическое исследование температуры процесса развертывания (рисунок 3) с исходными данными, используемыми при экспериментальном исследовании процесса развертывания (рисунок 10).

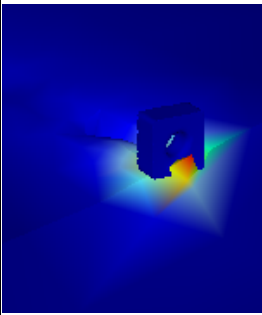
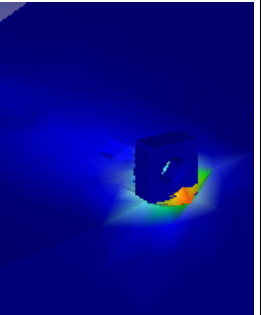
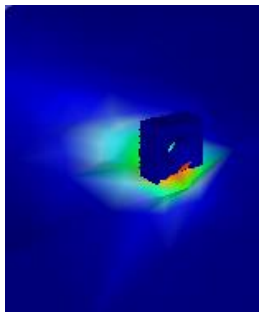


Обработка заготовки из стали 45 разверткой из стали Р6М5. Скорость резания  $V$  изменялась с 3 до 7 м/мин, глубина резания  $t$  с 0,08 до 0,12 мм, подача  $S$  с 0,5 до 1,2 мм при постоянных значениях  $V=3$  м/мин,  $t=0,09$  мм,  $S=0,5$  мм/об (рисунок 3).

Для относительного контроля теоретических расчетов температуры процесса развертывания произведено моделирование процесса резания в программе Deform-3D по близкому процессу развертывания процессу фрезерования и показана температура контактных поверхностей инструмента и обрабатываемого материала (зарубежный аналог стали 45) при  $V=5-15$  м/мин,  $S=0,5$  мм,  $t=0,1$  мм (таблица 1.1).

По результатам проведенного моделирования максимальная температура в зоне резания (стружки) составила 308 °С при скорости резания 10 м/мин. При скорости резания 15 м/мин температура в зоне резания (стружки) оказалась несколько меньше и составила 295 °С, но температурное поле, в свою очередь, имеет большую площадь.

Таблица 1.1

Скорость резания, $V=5$ м/мин	Температура, °С	Скорость резания, $V=10$ м/мин	Температура, °С	Скорость резания, $V=15$ м/мин	Температура, °С
	288 199 109 20.0		308 212 116 20.0		295 203 112 20.0

Для обеспечения условий, при которых температура низкоскоростного процесса развертывания  $Q_{cp}$  не превышает значение предельной температуры эксплуатации эпиламных покрытий  $T_T$ , доработана теоретико-экспериментальная формула, построенная на основе модифицированной формулы Баранова-Московского под условия низкоскоростного процесса развертывания для определения максимальной скорости резания при применении эпиламных покрытий и СОТС (формула 1.1).

$$v_{\max \text{покp}} = 0,985k_{\text{ИПСОТС}} \frac{a}{a_1} \left( \frac{\lambda}{\lambda_p} \right)^{0,17} \left( \frac{c\rho T_T}{\tau_p} \right)^{2,95} \frac{(b/b_1)^{0,17} (a_1/b_1)^{0,3} (b/b_1)^{0,04} (\beta\varepsilon)^{0,08} \sin^{0,12} \alpha}{(\rho_1/a_1)^{0,18} (a_1 z / \pi D)^{0,04} (1 - \sin \gamma)^{0,79}} x, \quad (1.1)$$

$$x \frac{(1+D/L)^{1,51}}{(1+\delta_m/\rho_1)^{0,13}}$$

где,  $\tau_p$  – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Н/м<sup>2</sup>;  $c\rho$  – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/м<sup>3</sup>·К;  $a$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;  $\gamma$  – передний угол, рад;  $z$  – количество режущих кромок развертки;  $a$  – толщина среза, м;  $b_1$  – ширина среза, м;  $b$  – периметр рабочих участков режущих кромок, м;  $D$  – диаметр развертки, м;  $L$  – глубина обработки отверстия, м.

Значение коэффициента  $k_{инсотс}$  определяют на основе результатов измерений таких величин, как силы резания  $P_o$ , крутящего момента  $M_{кр}$ , термоЭДС,  $E$  или температуры в абсолютных величинах, °С, отражающих физические явления при процессе развертывания.

В таблице 1.2 приведены рекомендованные значения максимальной скорости резания при совместном применении эпиламных покрытий с СОТС и (без СОТС) в зависимости от подачи при обработке отверстий заготовки из стали 45 разверткой из стали Р6М5 при постоянных значениях  $t=0,1$  мм;  $\gamma=0^\circ$ ;  $\alpha=12^\circ$ ;  $\varphi = 15^\circ$ ;  $\varphi_1=1^\circ$ .

Таблица 1.2

Обрабатываемый материал	Подача, мм/об	Марка эпилама и предельная температура эксплуатации		
		Эфрен-К Б2, Н2 (ТУ 6-02-2-929-87)	Эфрен 1, Эфрен 2, 6 СФК-180-05	Полизам-05
		270 °С	400 °С	450 °С
		Максимальная скорость развертывания, м/мин		
Сталь 45	0,5	10 (8)	до 15	до 15
	1	6 (4)	до 15 (12)	до 15
	1,5	4 (3)	12 (8)	14 (11)
	2	3 (2)	10 (6)	12 (8)

Результаты моделирования в таблице 1.1 косвенно подтверждают значения максимальной скорости резания, приведенные в таблице 1.2, в основном для эпиламных покрытий, имеющих предельную температуру эксплуатации от 400 °С.

Для определения режимов обработки, соответствующих минимальному значению износа инструмента при сохранении качества в требуемых пределах, рекомендуемой производительности и значению близкому к минимальной себестоимости обработки представлена зависимость скорости резания от подачи в соответствии с методикой С. С. Силина (рисунок 4).

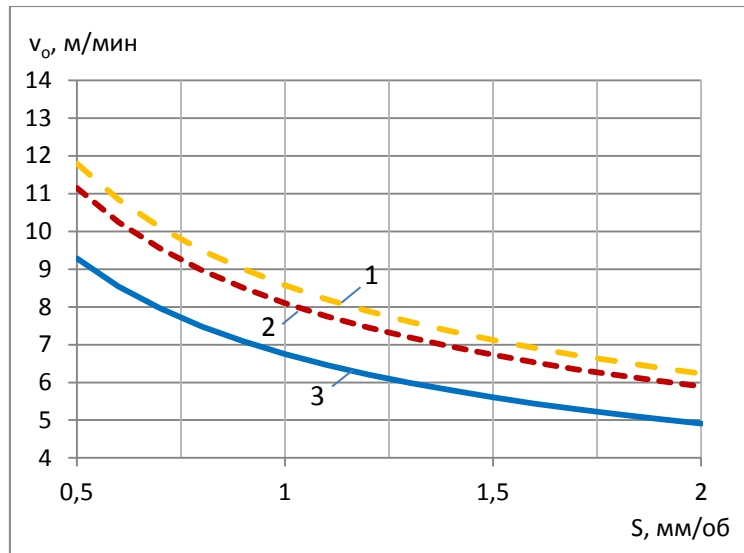


Рисунок 4 – Зависимость скорости резания, обеспечивающей минимальный износ инструмента, в зависимости от подачи:

1 – при совместном применении эпиламных покрытий и СОТС; 2 – при применении СОТС; 3 – при сухом трении.

Исходные данные: обработка разверткой из стали Р6М5 заготовки из стали 45 при значениях  $t=0,1$  мм;  $\gamma=0^\circ$ ;  $\alpha=12^\circ$ ;  $\varphi=15^\circ$ ;  $\varphi_1=1^\circ$ , оптимальной температуре  $\theta_o=270$  °С, коэффициента, учитывающего повышение скорости резания при охлаждении для стали 45  $k_{охл}=1,2$  (рисунок 4).

На графике показано (рисунок 4), что применение эпиламных покрытий и СОТС позволяет получить некоторый резерв для повышения производительности при сохранении минимальных значений износа инструмента.

**В третьей главе** представлены методика проведения эксперимента при применении эпиламных покрытий, впервые разработанный лабораторный комплекс и методика управления низкоскоростным процессом развертывания за счет разработанных метода и методики контроля, измерения температуры в зоне резания в режиме реального времени.

Основным недостатком эпиламных покрытий при применении на рабочую поверхность инструмента в процессе механической обработки отверстий, сопровождающимся достаточным тепловыделением, является предельная температура эксплуатации, которая может составлять до 450 °С. Следовательно, для сохранения пленки покрытий необходим контроль температуры процесса развертывания в зоне контакта «инструмент-заготовка».

В связи с этим для управления низкоскоростным процессом развертывания за счет контроля и измерения температуры процесса развертывания в режиме реального времени разработан автоматизированный лабораторный комплекс на базе запатентованных: устройства для изучения политропного процесса и комбинированного теплообмена, устройства для изучения тепловых процессов (рисунок 5).

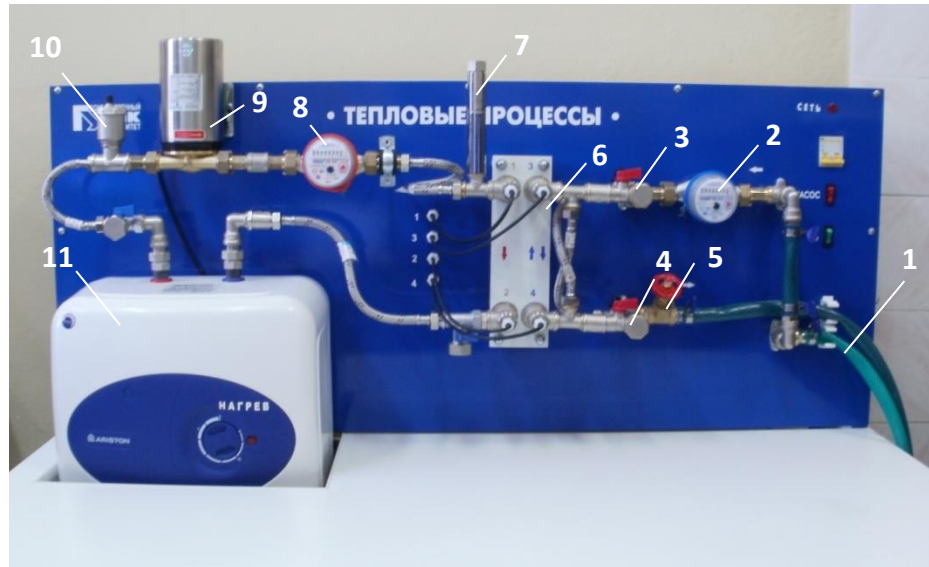


Рисунок 5 – Общий вид лабораторной установки для изучения тепловых процессов:

- 1 – соединительные шланги; 2 – расходомер холодной воды;
- 3, 4 – коллекторы; 5 – кран; 6 – теплообменник;
- 7 – заливная горловина; 8 – расходомер (горячего контура) для оценки массового расхода воды за расчетный период времени; 9 – циркуляционный насос; 10 – воздухоотводчик; 11 – водонагреватель.

Доработанный метод измерения температуры под условия процесса развертывания состоит в следующем (рисунок 6).

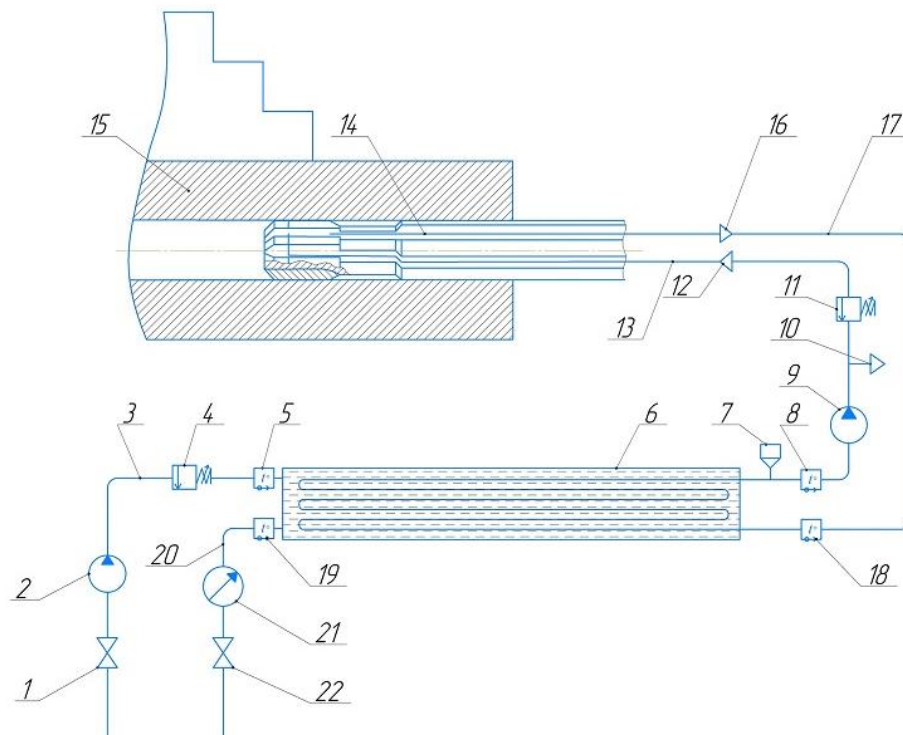


Рисунок 6 – Схема установки для определения относительных изменений температуры при процессе развертывания:

- 1 – водопроводный кран; 2 – насос холодного контура; 3 – подводящая трубка холодного контура; 4 – предохранительный клапан холодного контура; 5 – датчик температуры входной холодной контура; 6 – теплообменник; 7 – заливная горловина; 8 – датчик выходной горячей контура; 9 – насос горячего контура; 10 – воздухоотводчик; 11 – предохранительный клапан горячего контура; 12 – сужение трубки; 13 – подводящая часть трубки горячего контура; 14 – развёртка; 15 – обрабатываемая заготовка; 16 – сужение трубки; 17 – отводящая часть трубки горячего контура; 18 – датчик температуры горячего контура; 19 – датчик температуры; 20 – отводящая трубка холодного контура; 21 – расходомер; 22 – регулирующий вентиль (затворка).

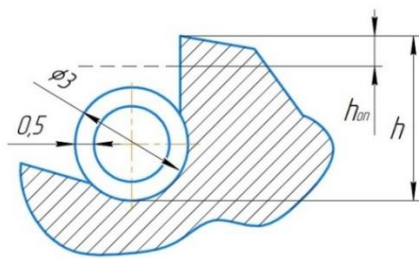


Рисунок 7 – Трубка горячего контура в пазе развёртки

Диаметр трубопровода для подвода теплоносителя к развертке ограничивается 3 мм, что связано с особенностью прохождения трубки горячего контура в пазах развертки (рисунок 7). Материалом трубок выбрана медь, которая обладает высоким значением теплопроводности  $\lambda=377,9$  Вт/(м·град) при 200 °С.

Для измерения температуры в зоне резания при обработке отверстий разверткой установлена хромель-копелевая термопара на отводящей части трубки после развертки.

Для определения скорости резания установлен датчик скорости вращения шпинделя станка, который подключен к блоку аналого-цифровых преобразователей.

Разработанный комплекс в рамках лабораторных исследований позволяет управлять процессом развертывания за счет контроля и измерения температуры процесса развертывания в режиме реального времени и изменения режимов резания (в основном скорости резания), в том числе для поддержания постоянной температуры процесса развертывания, что позволяет получить наиболее эффективные условия обработки, а также повысить точность обработки вследствие снижения интенсивности износа инструмента в области оптимальных температур (скоростей) резания.

Снижение интенсивности износа развертки при работе с постоянной температурой также позволяет повысить стойкость инструмента и путь, пройденный режущей кромкой за период стойкости.

Блок-схема методики контроля и измерения температуры процесса развертывания представлена на рисунке 8.

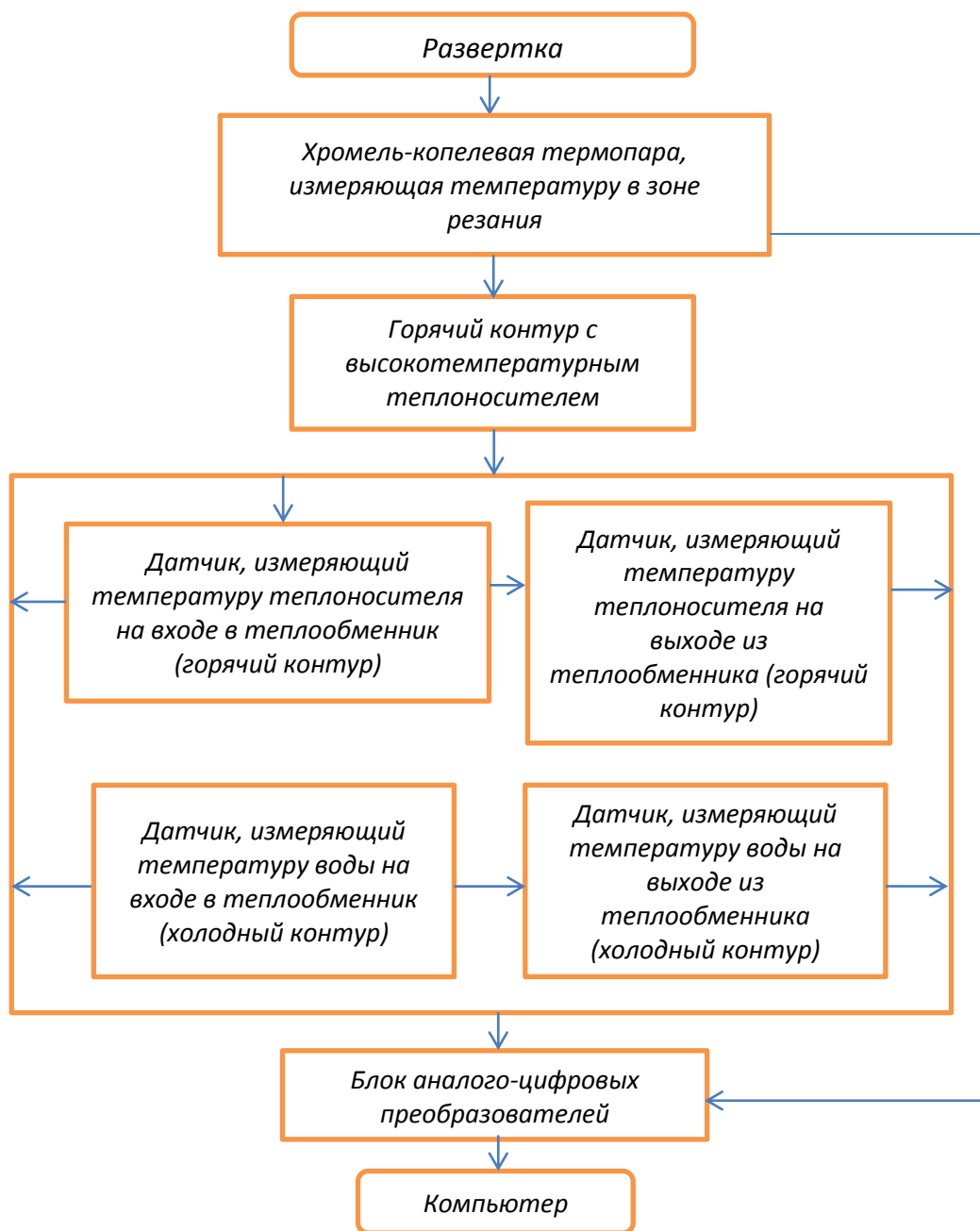


Рисунок 8 – Блок-схема метода измерения температуры процесса развертывания

Полученные функциональные алгоритмы режимов обработки низкоскоростного процесса развертывания, обеспечивающие высокие значения стойкости инструмента, в том числе при совместном применении эпиламных покрытий и смазочно-охлаждающих технологических средств, возможно использовать в производственных условиях, в том числе на станках с автоматическим регулированием, которое наибольшим образом подходит для чистовых процессов обработки по причине придания деталям высокого качества поверхностного слоя.

Методика управления процессом развертывания представлена на рисунке 9.

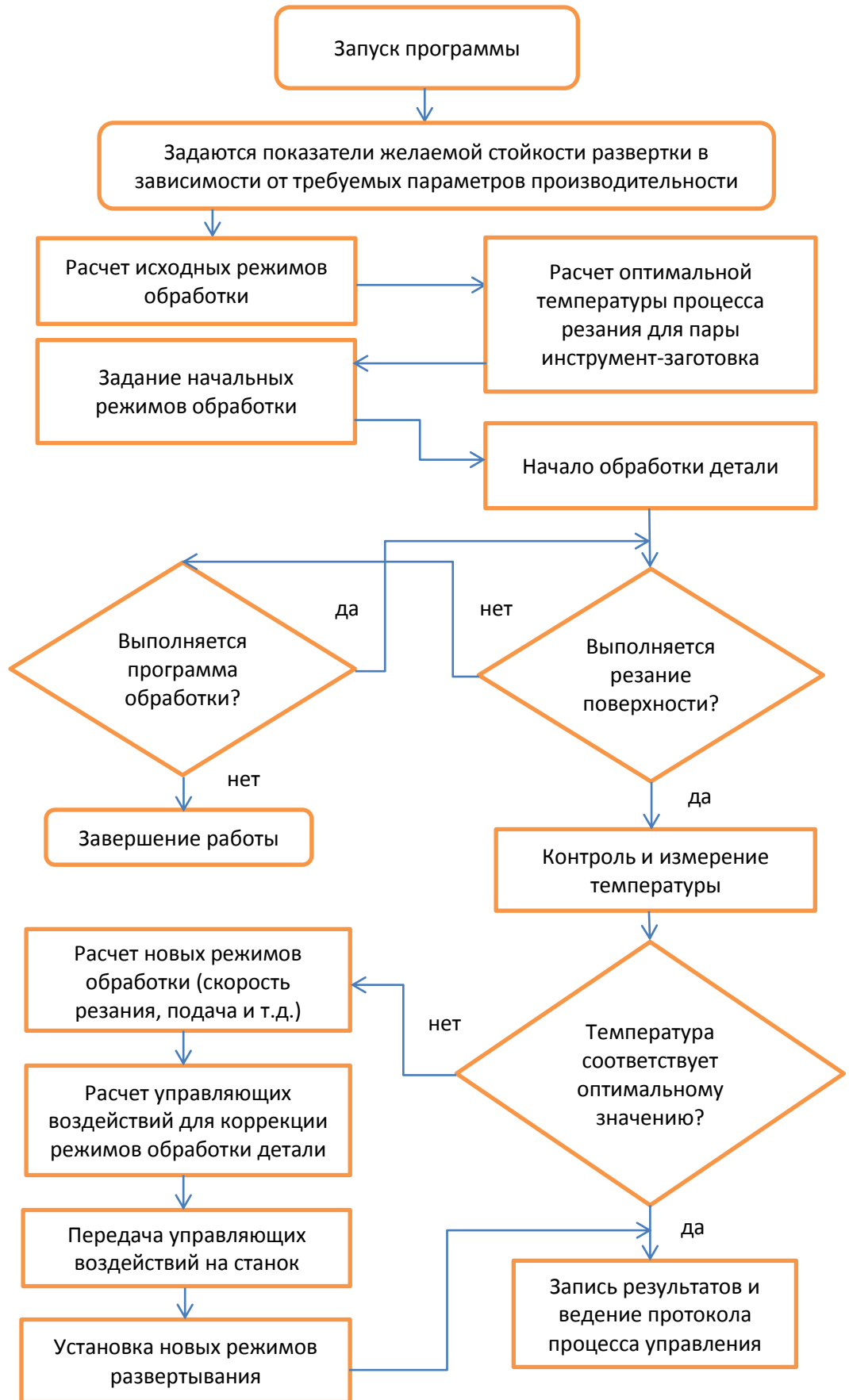


Рисунок 9 – Блок-схема методики управления процессом развертывания

Преимуществами данного лабораторного комплекса являются:

- контроль и измерение температуры низкоскоростного процесса развёртывания в режиме реального времени;
- отображение температуры в абсолютных величинах на компьютере в режиме реального времени;
- возможность исследования влияния эпиламных покрытий и СОТС на температуру в зоне контакта развертки и обрабатываемого отверстия в режиме реального времени;
- запись результатов на компьютере установки;
- возможность обработки разверткой при режиме с постоянным значением температуры, обеспечивающим наиболее эффективные условия обработки;
- возможность управления процессом развёртывания за счет изменения режимов обработки и параметров процесса развёртывания;
- возможность получения функциональных алгоритмов наиболее эффективных режимов обработки, в том числе при применении эпиламных покрытий и СОТС.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния эпиламных покрытий при совместном применении с СОТС на стойкость развертки, работающей на сравнительно малых скоростях резания. Результаты экспериментов представлены на графиках (рисунок 10) и (рисунок 11).

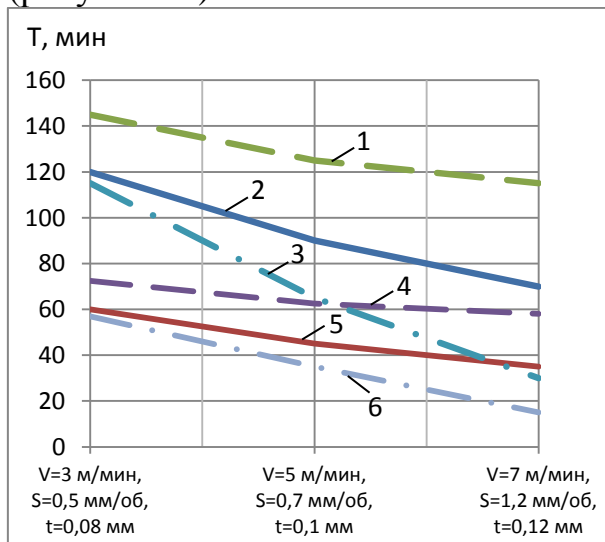


Рисунок 10 – Влияние режимов обработки на стойкость развертки при обработке стали 45 при применении эпиламных покрытий: 1 – глубина резания; 2 – скорость резания; 3 – подача. Без применения эпиламных покрытий: 4 – глубина резания; 5 – скорость резания; 6 – подача.

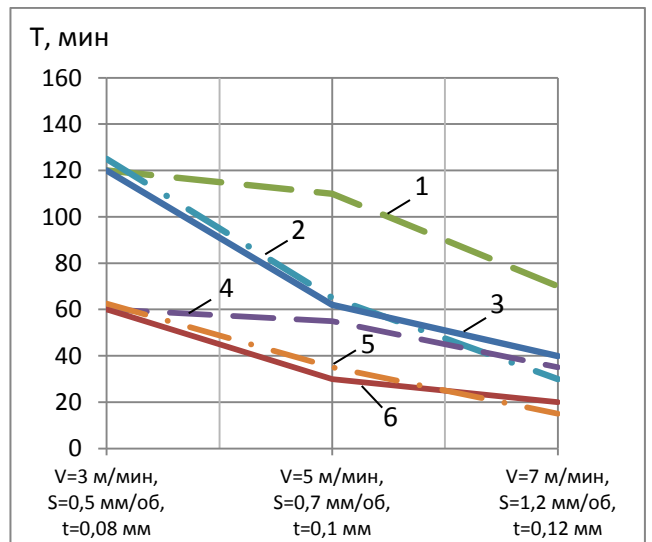


Рисунок 11 – Влияние режимов обработки на стойкость развертки при обработке стали 9ХС при применении эпиламных покрытий: 1 – глубина резания; 2 – подача; 3 – скорость резания. Без применения эпиламных покрытий: 4 – глубина резания; 5 – подача; 6 – скорость резания.



В экспериментах применялись развертки из стали Р6М5. Обработке подвергались конструкционные стали 45, а так же сталь 9ХС. На токарном станке 16К20 осуществлялась обработка с пятикратным дублированием каждого опыта. Использовался эпилам марки Эфрен-К ТУ 6-02-2-929-87 и СОЖ ГОСТ Р 50558-93.

Скорость резания  $V$  изменялась с 3 до 7 м/мин, глубина резания  $t$  с 0,08 до 0,12 мм, подача  $S$  с 0,5 до 1,2 мм при постоянных значениях  $V=3$  м/мин,  $t=0,09$  мм,  $S=0,5$  мм/об. Диаметр развертки  $D=15$  мм.

При обработке стали 45 с увеличением скорости резания стойкость развертки снижается от начальных значений на 42%, подачи на 74%, глубины резания на 21%.

При обработке стали 9ХС с увеличением скорости резания стойкость развертки от начальных значений снижается на 67%, подачи на 76%, глубины резания на 42%.

Следовательно, при увеличении прочности обрабатываемого материала (сталь 9ХС) стойкость развертки снижается быстрее, что связано с увеличением температуры процесса развертывания.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что эффект применения эпилажных покрытий практически не снижается с увеличением значений скорости, подачи и глубины резания как при обработке стали 45, так и 9ХС.

**В пятой главе** приведено экономическое подтверждение эффективности применения эпилажных покрытий при низкоскоростном процессе развертывания.

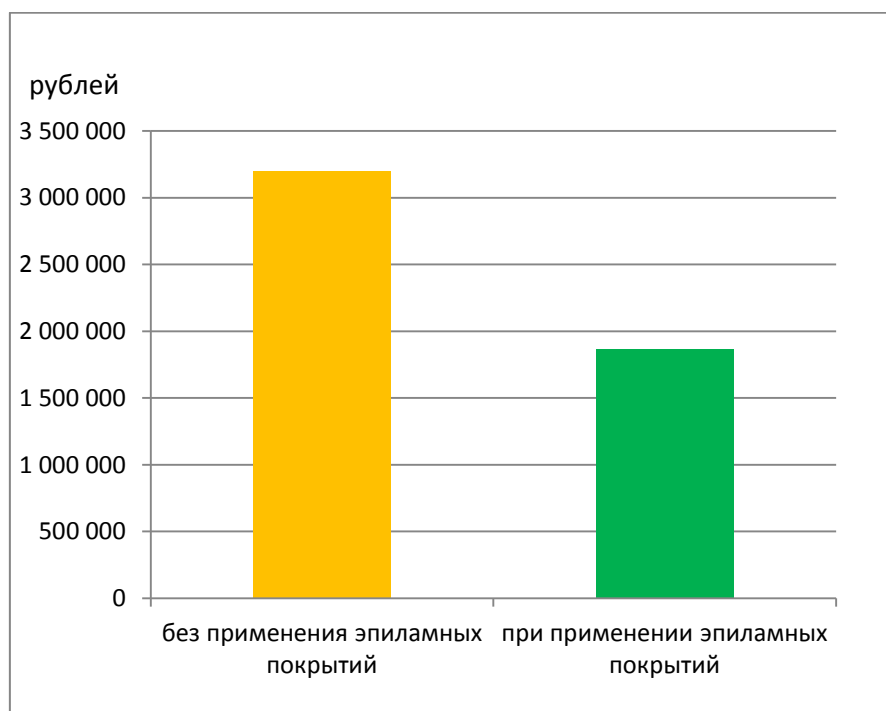


Рисунок 12 – Экономическая эффективность применения эпилажных покрытий при низкоскоростном процессе развертывания

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании решена актуальная научная задача, имеющая значение для развития теории и практики низкоскоростной обработки отверстий развертыванием – повышение эффективности низкоскоростного процесса развертывания за счет применения нанопокровтий (эпиламных покрытий) на режущую часть инструмента, что в итоге позволяет повысить стойкость такого дорогостоящего инструмента, как развертка.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. Установлено, что при совместном применении эпиламных покрытий со смазочно-охлаждающими технологическими средствами на режущую часть развёртки стойкость инструмента при работе на сравнительно малых скоростях резания от 3 до 7 м/мин повышается до 2 раз.

2. Впервые разработан автоматизированный лабораторный комплекс для управления низкоскоростным процессом развертывания за счет контроля и измерения температуры в зоне резания в режиме реального времени.

3. Разработаны метод и методика контроля, измерения температуры в зоне резания при низкоскоростном процессе развертывания, обеспечивающие измерение температуры процесса развертывания в абсолютных величинах в режиме реального времени.

4. Разработана научно обоснованная методика управления низкоскоростным процессом развертывания, с помощью которой возможно определение режимов обработки, обеспечивающих высокие значения стойкости инструмента, в том числе при совместном применении эпиламных покрытий и смазочно-охлаждающих технологических средств, и их функциональные алгоритмы для последующего использования на станках с автоматическим управлением.

5. Теоретически установлена зависимость температуры низкоскоростного процесса развертывания от режимов обработки (скорость резания, подача, глубина резания) для выбора наиболее подходящего типа эпилачного покрытия в соответствии с его характеристиками (предельная температура эксплуатации).

6. Установлены режимы обработки (скорость резания, подача), обеспечивающие минимальный износ инструмента с сохранением качества обрабатываемой поверхности в установленных пределах, рекомендуемой производительности и при значениях, близких к минимальной себестоимости обработки, а также зависимость максимальной скорости резания от подачи при совместном применении эпиламных покрытий и СОТС. Приведены рекомендации по их использованию.

7. Показано, что применение эпиламных покрытий и СОТС при обработке отверстий развертыванием с постоянным значением температуры, обеспечивающей минимальный износ инструмента, позволяет получить

некоторый резерв для повышения производительности обработки при сохранении высоких показателей стойкости инструмента и качества обрабатываемой поверхности в заданных пределах.

8. Установлено, что при увеличении скорости, подачи, глубины резания, диаметра развертки и прочности обрабатываемого материала эффект повышения стойкости при применении эпиламных покрытий и СОТС практически не снижается.

9. Установлено, что увеличение диаметра развертки и обрабатываемого отверстия благоприятно сказывается на повышении стойкости развертки за счет совместного применения эпиламных покрытий и СОТС, что связано с улучшением процессов теплообмена вследствие увеличения площади контакта инструмента с обрабатываемым отверстием.

10. Установлена экономическая эффективность применения эпиламных покрытий при низкоскоростном процессе развертывания.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Патенты на изобретение:

1. Патент 2668415 Российская Федерация, МПК G09В 23/12. Устройство стандового автоматизированного лабораторного комплекса для изучения процессов теплообмена // № 2017111455 : заявл. 14.06.2016: опубл. 28.09.2018 / Бодров В. К., Ванин В. С., Кудрявцев С. В. [и др].; заявитель и патентообладатель ОГУ имени И. С. Тургенева. – 16 с.

2. Патент 2656196 Российская Федерация, МПК G09В 23/06. Устройство стандового автоматизированного лабораторного комплекса для изучения политропного процесса и комбинированного теплообмена : № 2017101479 : заявл. 17.01.2017 : опубл. 31.05.2018 / Бодров В. К., Ванин В. С., Кудрявцев С. В. [и др].; заявитель и патентообладатель ОГУ имени И. С. Тургенева. – 11 с.

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций (ВАК):

3. Кудрявцев, С. В. Определение относительных изменений температуры параметров процесса развертывания при применении нанопокровтий на режущую часть инструмента / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов, М. Ф. Селеменев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – № 6 (338). – С. 53-58.

4. Кудрявцев, С. В. Определение температуры процесса развертывания в режиме реального времени / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов, Д. О. Золкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – № 2 (340). – С. 68-73.

5. Управление температурой контактных поверхностей режущей части разверток с нанопокровтием / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов, Г. Б. Панков

[и др.] // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 3 (347). – С. 78-84.

6. Кудрявцев, С. В. Анализ и управление процессом развертывания при применении нанопокрывтий / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – № 6 (356). – С. 32-38.

Публикации в других научных изданиях:

7. Кудрявцев, С. В. Автоматизированный лабораторный комплекс для изучения политропного процесса и комбинированного теплообмена / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов // Сборник научных трудов 8-й международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития». – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 302-305.

8. Кудрявцев, С. В. Автоматизированный лабораторный комплекс для изучения процессов теплообмена / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов // Сборник научных трудов 8-й международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития». – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 306-309.

9. Кудрявцев, С. В. Анализ изменений температур для низкоскоростных процессов механической обработки / С. В. Кудрявцев, Д. А. Казьмин, Ю. А. Кузнецов, А. Д. Новиков // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2019. – С. 423-427.

10. Кудрявцев, С. В. Установка для определения относительных изменений температуры при развертывании / Д. А. Казьмин, А. С. Тарапанов // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. тр. науч. симпозиума технологов-машиностроителей / Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2019. – С. 428-431.

11. Кудрявцев, С. В. Определение температуры процесса развертывания в режиме реального времени при использовании нанопокрывтий / С. В. Кудрявцев, О. С. Харченко, М. Ф. Селеменев, А. С. Тарапанов // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием имени академика А. Г. Шипунова: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, (г. Ливны 26 марта 2021 г.). – Орёл : ОГУ имени И. С. Тургенева, 2021. – С. 80-83.

12. Кудрявцев, С. В. Контроль эффективности нанопокрывтий рабочих поверхностей разверток / С. В. Кудрявцев, О. С. Харченко, А. С. Тарапанов // Сборник научных статей 6-й Международной научной конференции

студентов и молодых ученых (19-20 мая 2021 года). – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 290-293.

13. Кудрявцев, С. В. Повышение стойкости развертки при применении нанопокровтий / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов, М. А. Бурнашов // Сборник научных трудов «Вестник современных технологий». – Севастополь, 2021. – № 4 (24). – С. 9-13.

14. Кудрявцев, С. В. Механизм повышения стойкости инструмента с нанопокровтием при изменении поверхностного слоя / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов // Материалы 9-й Международной научно-практической конференция имени академика А. Г. Шипунова (г. Ливны, 25 марта 2022 г.). – Орёл : ОГУ имени И.С. Тургенева, 2022. – С. 39-42.

15. Кудрявцев, С. В. Метод повышения стойкости инструмента при малых скоростях обработки / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов // Сборник научных трудов 11-й Международной научно-практической конференции. – Курск : Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 176-180.

16. Кудрявцев, С. В. Взаимодействие поверхности развертки с нанопокровтиями / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов // Сборник научных трудов 12-й Международной научно-практической конференции. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 213-215.

17. Кудрявцев, С. В. Особенности контроля температуры процесса развёртывания в режиме реального времени / С. В. Кудрявцев, А. С. Тарапанов, А. В. Шамрин // Материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием имени академика А. Г. Шипунова (г. Ливны, 24 марта 2023 г.). – Орёл : ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023. – С. 39-43.