

М 380322

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ФРИЦ Виктор Эмануилович

И С С Л Е Д О В А Н И Е
РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРОТЯГИВАНИЯ
ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ9

Специальность 05.03.01. - Процессы и
машины обработки материалов резанием;
автоматические линии

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание уч. ной степени
кандидата технических наук

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское

ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

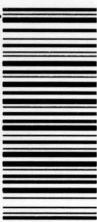
ОРИЦ, Виктор Эмануилович

И С С Л Е Д О В А Н И Е
РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРОТЯГИВАНИЯ
ТИТАНОВОГО СЛОВА ВТ9

Специальность 05.05.01. - Процессы и
машины обработки материалов резанием;
автоматические линии

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание уч. ной степени
кандидата технических наук



Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
ПОКРОВСКИЙ В.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ЮДИН Д.Л.
кандидат технических наук
старший научный сотрудник
ДВОРОВ Ю.И.

Ведущая организация: указано в решении специализированного
Совета.

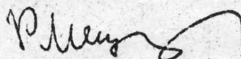
Защита диссертации состоится " 27 " апреля 1981 г.
на заседании специализированного совета К 053.15.15 по техно-
логии машиностроения Московского высшего технического учили-
ща им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская,
дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ име-
ни Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверен-
ные печатью, просим направлять по указанному адресу.

Автореферат разослан " " марта 198 г.

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК
ДОЦЕНТ



МЕЩЕРЯКОВ Р.К.

Л. № 85977 к печ. 23.23.81 Заказ 62 Объем 1.0 и.л.

Тираж 100 экз. РОТОПРИНТ МВТУ. 107005 Москва, 2-я Бауманская, 5

Актуальность проблемы. Повышение эффективности производства, улучшение качества труда и выпускаемой продукции является одной из главных задач на современном этапе. Применение в машиностроении новых конструкционных материалов, обладающих повышенными прочностными и теплофизическими свойствами, предопределяет более эффективную работу машин, повышение надежности, увеличение ресурса работоспособности. Это в полной мере, и даже более чем для других отраслей машиностроения, относится к самолетостроению. Развитие техники во многом обусловлено появлением новых жаропрочных материалов. Однако использование этих марок материалов ставит перед металлообработкой, удельный объем которой в ряде отраслей промышленности достигает 40% от общей трудоемкости всех технологических процессов, новые проблемы, обусловленные пониженной обрабатываемостью этих материалов, приводит к увеличению расхода инструмента и затрудняет получение требуемых параметров точности и качества поверхностей деталей машин и приборов. Использование инструмента из быстрорежущих сталей для процесса протягивания, как наиболее производительного, а иногда и единственного возможного метода обработки ряда поверхностей деталей машин, ограничивается недостаточной изученностью возможности использования их при обработке труднообрабатываемых материалов. Протягивание таких материалов усложняется отсутствием сведений о взаимосвязи между состояниями режущего лезвия и поверхности, формируемой в процессе резания. В связи с этим, изыскание резервов повышения производительности при эксплуатации инструмента из быстрорежущих сталей и обеспечение при этом стабильных параметров качества поверхностного слоя деталей машин является актуальной задачей.

Цель исследования. Изыскание резервов повышения производительности при эксплуатации инструмента из быстрорежущих сталей, увеличение ресурса работоспособности протяжек и обеспечение при этом стабильных параметров поверхностного слоя деталей машин.

Методы исследования. Работа выполнена по комплексной методике, включающей теоретико-экспериментальные исследования работы наружных протяжек в условиях несвободного резания, документирования параметров, характеризующих состояние режущего лезвия в процессе резания, оценку влияния состояния режущего лезвия инструмента на величины сил и температуру при протягивании, определение качественных показателей протянутой поверхности (шероховато-

ости продольной и поперечной, величины и глубины залегания остаточных напряжений, микротвердости), установлению взаимосвязи между состоянием режущего лезвия протяжки и показателями, характеризующими поверхностный слой в условиях отсутствия наростов образования, с последующим анализом эффективности использования протяжек из быстрорежущих сталей, апроксимирования и внедрением в производственных условиях.

Научная новизна работы заключается в выявлении условий формирования параметров качества поверхности в зависимости от состояния режущего лезвия зуба протяжки. В результате теоретико-экспериментальных исследований получена величина критерия износа инструмента, обусловленная требованиями к обработанной поверхности в условиях несвободного резания, с учетом которой на основе анализа вида и характера износа протяжек из быстрорежущих сталей от режимов резания получены и математически описаны зависимости производительности и эксплуатационного ресурса от скорости резания для протяжек из семи исследованных марок сталей. Установлена взаимосвязь между соотношением режущего лезвия инструмента и геометрическими и физико-механическими параметрами поверхностного слоя в условиях отсутствия наростов образования.

Практическая ценность диссертации состоит в разработке рекомендаций по условиям и режимам резания высокопроизводительной эксплуатации протяжного инструмента при обеспечении стабильных параметров качества обработанных поверхностей. Определены оптимальные марки быстрорежущих сталей с пониженным содержанием вольфрама (Р6М5, Р6М4К8) для изготовления наружных протяжек при обработке деталей из сплава ВТ9, обеспечивающие увеличение ресурса работоспособности в 4,5..6,5 раз в сравнении с Р18 при неизменном качестве обработанных поверхностей. Установлены рациональные условия эксплуатации протяжек - скорость резания $V = 5$ м/мин, величина подъема на зуб протяжки $S_z = 0,06$ мм/зуб с использованием в качестве СОС 5% эмульсия "Аксол 2" и следующих параметров самого инструмента: передний угол $\gamma = 5^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$.

Экспериментально показано, что температуры, измеренные методом естественной термопары, при протягивании сплава ВТ9 на скоростях резания $V = 1..9$ м/мин и величинах подъемов на зуб $S_z = 0,02..0,10$ мм/зуб не превышают 200°C и не оказывают суще-

ственного влияния на процесс обработки.

Эмпирически полученная общая формула для расчета сил при протягивании, учитывающая величины подъема на зуб протяжки, суммарную длину режущих лезвий, влияния СОС, износа, переднего и заднего углов, количества режущих и калибрующих зубьев инструмента позволяет определять силы P_z и P_y . Установлено, что при протягивании титанового сплава ВТ9 в диапазоне скоростей резания $V = 1..9$ м/мин наростообразование отсутствует. Формирование обработанной поверхности происходит в результате копирования микронеровностей режущего лезвия инструмента.

Показано, что постоянство параметров, характеризующих состояние режущего лезвия, обеспечивает стабильные геометрические и физико-механические показатели протянутой поверхности.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на трех научных семинарах кафедры "Теории механической обработки и инструмент" МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1977-1979 гг.; на зональной конференции "Технологические методы управления качеством деталей машин и приборов" - Пенза, 1979 г.; на Всесоюзной научно-технической конференции "Прогрессивные методы обработки труднообрабатываемых материалов на металлорежущих станках" - Жданов, 1980 г.; на 6-ой научно-технической конференции КФ МВТУ им. Н.Э.Баумана, посвященной 110 годовщине со дня рождения В.И.Ленина - Калуга, 1980 г.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 123 страницах машинописного текста, включающих введение, шесть глав и основные выводы. Работа иллюстрирована 81 рисунками, содержит 24 таблицы, список литературы включает 91 наименование.

В первое главе приведен литературный обзор по современному состоянию изучаемого вопроса. Установлено, что в проведенных работах по исследованию режущих свойств протяжек, изготовленных из различных марок быстрорежущих сталей, при обработке конструкционных и труднообрабатываемых материалов не изучен или изучен недостаточно ряд вопросов, а именно: износ инструмента, закономерности изменения стойкости, силы резания, температуры в зоне резания при обработке титановых сплавов и, в частности, сплава ВТ9, влияние интенсивности и характера изменения рабочих поверхностей инструмента на формирование поверхностного слоя обработанной поверхности в зависимости от условий протекания процесса протягивания, и другие.

На основе анализа литературных данных и опыта промышленности определена цель данного исследования: изыскание резервов повышения производительности при эксплуатации инструмента из быстрорежущих сталей, увеличение ресурса работоспособности протяжек и обеспечение при этом стабильных параметров качества поверхностного слоя деталей машин. В соответствии с целью исследования в диссертации ставятся следующие задачи:

1. Исследование закономерностей износа режущихлезвий инструмента при обработке титанового сплава ВТ9.
2. Исследование силовой и температурной напряженности процесса протягивания, как факторов, влияющих на основные показатели качества поверхностного слоя.
3. Исследование влияния износа режущего лезвия на показатели, характеризующие состояние поверхностного слоя при протягивании.
4. Исследование возможностей увеличения ресурса работоспособности протяжек из быстрорежущих сталей.
5. Обоснование выбора оптимальной марки быстрорежущей стали для изготовления наружных протяжек при обработке сплава ВТ9.
6. Определение экономической эффективности использования протяжек из различных марок быстрорежущих сталей при протягивании поверхностей со стабильными показателями качества.

Во второй главе изложена методика экспериментальных исследований.

Для исследования выбраны 7 марок быстрорежущих сталей: P18, P18Ф2КМЗ, P12МК5, P12Ф3, P9Ф3, P9Ф10, P9М4К8, P6М5. Выбор произведен на основе анализа влияния процентного содержания легирующих компонентов и опыта промышленности в предположении, что они с наибольшей вероятностью обеспечат высокие режущие свойства при протягивании титанового сплава ВТ9.

Протяжки изготовлены, термообработаны и заточены в условиях Губышевского моторного завода. Параметры режима заточки и характеристики кругов выбраны в соответствии с нормативными рекомендациями ВНИИ и НИИТАвтопрома.

В качестве обрабатываемого материала использовался наиболее перспективный представитель группы жаропрочных титановых сплавов - сплав ВТ9.

Экспериментальные исследования проводились на вертикально-протяжном станке мод. 775 с тяговым усилием 0,1 МН, оснащенном приспособлениями для крепления протяжек и автоматической подачи

образца.

Методические основы получения исходной информации выражались следующим. Документировались величины износа зубьев протяжки по уголку, по задней поверхности, по радиусу округления режущего лезвия и шероховатости режущего лезвия. Обрабатываемая поверхность контролировалась по геометрическим параметрам (продольная и поперечная шероховатость с оценкой по показателям, предусмотренным ГОСТ 2789-73) и физико-механическим параметрам (знаку, величине и глубине проникновения остаточных напряжений, микротвердости).

Измерение и фотографирование износа осуществлялось при помощи приспособления, собранного на основе микроскопа, микрофотонасадки МЭН-II и фотоаппарата. Радиус округления и шероховатость режущего лезвия фиксировались на профиллографе - профилометре мод. 20I завода "Калибр".

Для измерения сил резания был использован тензометрический динамометр конструкции МВТУ им. Н.Э.Баумана, тензостанции БАНЧ и осциллограф НИИ5.

Температура при протягивании сплава ВТ9 определена методом естественной тормозной с записью на осциллографе.

Продольная и поперечная шероховатость дна паза, а также шероховатость боковой поверхности паза по глубине определены с помощью профиллографа - профилометра мод.20I завода "Калибр".

Ширина протянутого паза контролировалась на приборе "Ортотест" с точностью $\pm 0,001$ мм.

Микротвердость определена на образцах с косым срезом на приборе ПМТ-3.

Остаточные напряжения в поверхностном слое определены методом непрерывного стравливания по формуле академика Н.Н.Давиденкова на установке УЭОН-I в условиях завода.

Корни стружек получены путем мгновенной остановки процесса резания. Исследования микрошлифов выполнены с помощью микроскопа МИМ-7.

Экспериментальные исследования проведены при следующих условиях: скорость протягивания $V = 1, 3, 5, 7, 9$ м/мин; подъем на зуб $S_z = 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,10$ мм/зуб; передний угол $\gamma^* = 0,5, 10, 15, 20, 25^\circ$; задний угол $\alpha = 5, 10, 15, 20, 25^\circ$; вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 30^\circ$; количество режущих зубьев

$Z_p = 1, 2, 3, 4, 5$; количество калибрующих зубьев $Z_k = 0, 1, 2, 3, 4$. В качестве смазочно-охлаждающего состава использовался 5% раствор эмульсола "Аквол 2" с расходом 18..20 л/мин.

В третьей главе обоснован теоретико-экспериментальный выбор критерия износа наружных протяжек в условиях несвободного резания и рассмотрен износ их в процессе протягивания.

Анализ условий работы инструмента в условиях несвободного резания определил износ по уголку как лимитирующий фактор. Исходя из точности протягиваемого паза, получена зависимость максимального допустимого износа по уголку и количество возможных переточек инструмента от степени износа инструмента. Характер зависимостей, отражающих суммарный путь резания протяжки из быстрорежущей стали Р6М5 от величины износа по уголку при обработке паза, выполненного показателем Н7..Н9, позволил установить величину критерия износа по уголку $h_y = 0,4$ мм.

Для протяжек, изготовленных из семи марок быстрорежущей стали, построены кривые линейного износа по уголку и по задней поверхности от длины пути резания. Износ зубьев протяжек по внешней поверхности значительно меньше величин износа по уголку, причем величина его быстро возрастает в первоначальный момент работы инструмента до определенной величины в зависимости от марки инструментального материала и в дальнейшем остается практически постоянной. На основании кривых износа и принятого критерия износа получены функциональные зависимости пути и стойкости от скорости резания. Указанные зависимости аппроксимированы по методике, предложенной профессором Г.И.Грановским, функциями вида:

$$L = a \cdot V^b \cdot e^{cV}, \text{ м,} \quad (1)$$

$$T = a \cdot V^{b-1} \cdot e^{cV}, \text{ мин,} \quad (2)$$

где e — основание натурального логарифма;

a — постоянный коэффициент, учитывающий влияние различных факторов на режущую способность инструмента;

b, c — показатели степени.

Значения a , b и c подсчитаны на ЭВМ "Искра-1250" и приведены в табл. I.

Анализ полученных данных выявил возможность использования протяжек с повышенным содержанием вольфрама для обработки титанового сплава BT9 и определить лучшие марки: Р6М5 и Р6М5А.

Таблица I

Марка стали	Постоянный коэффициент	Показатели степени		
	α	β	γ	ϵ
P18	0,160	10,110	-	2,161
P1203	7,094	8,942	-	0,658
P1204K5	0,582	8,870	-	1,610
P1202K5M3	13,100	3,936	-	0,748
P9K10	4,028	4,144	-	0,785
P9M4K8	27,720	4,277	-	0,958
P6M5	4,943	5,503	-	0,994

Исследовано изменение радиуса округления режущего лезвия в процессе резания. Показано, что при работе протяжек происходит первоначальное увеличение радиуса округления с 0,008 ... 0,012 мм и последующей стабилизацией величины его порядка 0,030 мм при использовании инструмента в пределах эксплуатационного ресурса.

Шероховатость режущего лезвия по мере работы инструмента увеличивается несколько в первоначальный период и в дальнейшем остается практически неизменной, определяясь величиной порядка $R_a = 1,2$ мкм. Характер изменения шероховатости режущего лезвия хорошо коррелирует с износом протяжки по задней поверхности и радиусу округления.

В четвертой главе приводятся результаты исследований сил резания и температуры при протягивании.

Экспериментальными исследованиями определено влияние скорости резания, геометрии инструмента, количества режущих и калибрующих зубьев, степени изношенности инструмента и примененного смазочно-охлаждающего состава на силы резания при наружном протягивании. Экспериментально полученные частные зависимости аппроксимированы формулами, выражающими влияние условий резания на удельные силы P_z и P_y . Установлено, что наибольшее влияние на силы при протягивании оказывает величина подъема на зуб инструмента. Увеличение износа зубьев протяжки в пределах эксплуатационного ресурса инструмента приводит к увеличению сил резания не более, чем на 20%.

Применение смазочно-охлаждающего состава не изменяет характера полученных зависимостей, а лишь несколько снижает величины сил при протягивании (в 1,1...1,2 раза).

Получена общая формула для расчета сил при протягивании сплава ВТ9:

$$P = 977.02 \cdot S_z^{0.73} \cdot \sum \beta \cdot K, \text{ Н},$$

где S_z - величина подъема на зуб, мм/зуб;
 $\sum \beta$ - суммарная длина режущих лезвий, мм;
 K - коэффициент, учитывающий влияние неучтенных факторов, который определяется как:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6,$$

где K_1 - коэффициент, учитывающий возрастание сил резания от степени изношенности инструмента и определяемый из табл. 2.

Таблица 2

Износ по уголку, мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
K_1	0,4	1,08	1,13	1,17	1,21

K_2 - коэффициент, учитывающий возрастание сил резания при протягивании без применения СОС ($K_2 = 1,15$);

K_3 - коэффициент, учитывающий изменение сил резания в зависимости от переднего угла зуба протяжки и определяемого из табл. 3.

Таблица 3

Передний угол, град.	0	5	10	15	20	25
K_3	1,02	1	0,97	0,95	0,92	0,90

K_4 - коэффициент, учитывающий изменение сил резания в зависимости от заднего угла зуба протяжки и определяемого из табл. 4 .

Таблица 4

Задний угол, град.	5	10	15	20	25
K_4	1,02	1	0,98	0,95	0,92

K_5 - коэффициент, учитывающий изменение сил резания в зависимости от количества калибрующих зубьев протяжного инструмента и определяемого по табл. 5 .

Таблица 5

Количество калибрующих зубьев, шт	0	1	2	3	4
K_5	1	1,05	1,09	1,14	1,19

K_6 - коэффициент, учитывающий возрастание сил резания в зависимости от количества режущих зубьев протяжного инструмента и определяемого по табл. 6 .

Таблица 6

Количество режущих зубьев, шт	1	2	3	4	5
K_6	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20

Экспериментальными исследованиями определено влияние скорости резания, величины подъема на зуб и величин передних и задних углов на температуру при протягивании. Полученные зависимости описаны математически. Установлено, что температуры при протягивании сплава БТ9 инструментом из быстрорежущей стали

не превышают 200°C в диапазоне скоростей резания $V = 1 \dots 9$ м/мин и подъемов на зуб $S_z = 0,02 \dots 0,10$ мм/зуб.

Отмечено, что температуры при протягивании не оказывают влияние на интенсивность протекания износа инструмента.

В пятой главе рассмотрено состояние поверхностного слоя.

Установлены частные зависимости взаимосвязи поперечной и продольной шероховатости обработанной поверхности от скорости протягивания, величины подъема на зуб инструмента, величин передних и задних углов зубьев протяжки и количества калибрующих зубьев. Отмечено, что во всех случаях поперечная шероховатость по величине превосходит продольную шероховатость и является определяющей при характеристике микрогеометрии обработанной поверхности. Оценка шероховатости поверхности выполнена по показателям в соответствии со стандартами. Указано, что наиболее существенное влияние на шероховатость поверхности оказывает величина подъема на зуб. На основании экспериментальных исследований определены рациональная геометрия протяжек ($\gamma^* = 5^{\circ}$, $\alpha = 10^{\circ}$, $\varphi_1 = 30^{\circ}30'$), режимы протягивания ($V = 1 \dots 9$ м/мин, $S_z = 0,05$ мм/зуб) при работе инструментом с количеством калибрующих зубьев $Z_k = 2$ и применении в качестве СОС 5% эмульсии "Ахвол 2", обеспечивающие удовлетворение требований, предъявляемых к шероховатости поверхности при протягивании.

Экспериментально установлено, что при протягивании титанового сплава ВТ9 во всем исследованном диапазоне скоростей резания ($V = 1 \dots 9$ м/мин) наростообразование отсутствует. В этих условиях формирование поверхности при протягивании является результатом копирования микрорельефа режущего лезвия.

Показано, что износ зубьев протяжки по уголку обусловливается изменением ширины протянутого паза; данный процесс сопровождается разбивкой паза, величину которой необходимо учитывать при расчете и конструировании пазовых протяжек. Шероховатость боковых поверхностей паза находится в интервалах требований, предъявляемых к соответствующим поверхностям ($R_a = 1,25 \dots 2,5$ мкм), при использовании инструмента в пределах эксплуатационного ресурса.

Установлена взаимосвязь глубины проникновения остаточных напряжений от скорости резания и величины подъема на зуб протяжки. Показано, что скорость протягивания не оказывает практического влияния на глубину проникновения остаточных напряжений, а возрастание величины подъема на зуб инструмента увеличивает

глубину проникновения остаточных напряжений. Полученные экспериментальные зависимости описаны математически.

На основании экспериментальных данных и частных математических зависимостей получена формула для расчета глубины проникновения остаточных напряжений от величины удельных сил резания при протягивании. Следует особо отметить, что величина напряжений достигает определенной величины и далее, несмотря на ужесточение режимов, не возрастает, меняется только глубина проникновения этих напряжений.

В целом протягивание инструментами из быстрорежущих сталей сплава ВТ9 обуславливает получение сжимающих напряжений в поверхностном слое до 4500 Н/мм^2 . Следует отметить, что максимумы этих напряжений находятся на глубине $0,005 \dots 0,025 \text{ мм}$ от поверхности в зависимости от условий обработки. Непосредственно же поверхностный слой характеризуется сжимающими напряжениями порядка $500 \dots 800 \text{ Н/мм}^2$. Степень наклепа обработанной поверхности составляет порядка $8 \dots 10\%$.

Впервые установлена взаимосвязь между износом режущего лезвия и показателями, характеризующими состояние поверхностного слоя. Показано, что использования инструмента, имеющего стабильные параметры износа режущих лезвий, обеспечивает постоянные физико-механические параметры поверхностного слоя и соответственно эксплуатационные свойства обработанных деталей.

В шестой главе представлена экономическая эффективность использования протяжек из быстрорежущих сталей.

Оценка экономической эффективности использования протяжек из быстрорежущих сталей различных марок выполнена в сравнении с маркой Р18, ранее применявшейся для обработки сплава ВТ9. Экономическая эффективность получена за счет повышения эксплуатационного ресурса, причем, следует отметить, что это повышение связано с обеспечением стабильности параметров поверхностного слоя. Расчеты показывают, что применение протяжек, изготовленных из стали Р6М5 и Р9М4К8 при обработке сплава ВТ9, взамен протяжек из стали Р18, обеспечивает максимальный экономический эффект при работе на скорости $V = 5 \text{ м/мин}$ и величине подъема на зуб $S_z = 0,06 \text{ мм/зуб}$, соответственно 1600 и 1400 рублей на одно рабочее место в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Определены оптимальные марки быстрорежущих сталей с пониженным содержанием вольфрама (Р6М5, Р9М4К8) для изготовления наружных протяжек при обработке деталей из сплава ВТ9, обеспечивающие увеличение ресурса работоспособности в 4,5... 6,5 раз в сравнении с Р18 при неизменном качестве обработанных поверхностей.

2. Разработана методика определения критерия износа наружных протяжек, исходя из требований по точности и качеству обрабатываемых поверхностей; определения на этой основе ресурса работоспособности протяжек.

3. Установлено, что при протягивании титанового сплава ВТ9 в диапазоне скоростей резания $V = 1...9$ м/мин наростообразование отсутствует. Формирование обработанной поверхности происходит в результате копирования микронеровностей режущего и впадины инструмента.

4. Определены оптимальные условия эксплуатации протяжек из быстрорежущей стали при протягивании титанового сплава ВТ9 — скорость резания $V = 5$ м/мин, величина подъема на зуб $S_z = 0,06$ мм/зуб с использованием в качестве СОС 5% эмульсии "Аквол 2", передний угол $\gamma = 5^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 30^\circ$ и количество калибрующих зубьев протяжки $Z_k = 2$.

5. Температуры, измеренные методом естественной термопары, при протягивании сплава ВТ9 на скоростях резания $V = 1...9$ м/мин и подъемах на зуб $S_z = 0,02 ... 0,10$ мм/зуб не превышают 200°C и не оказывают существенного влияния на процесс обработки.

6. Экспериментально получены и математически описаны частные зависимости сил при протягивании от условий резания. Установлено, что наибольшее влияние на величину сил при протягивании оказывает подъем на зуб. На основе частных зависимостей получена общая формула для расчета сил при протягивании, учитывающая величины подъема на зуб протяжки, суммарную длину режущих лезвий, влияние СОС, износа, переднего и заднего углов,

количества режущих и калибрующих зубьев инструмента. Отмечено, что износ протяжек в пределах эксплуатационного ресурса не оказывает существенного влияния на изменение сил при протягивании. Показано, что применение СОС несколько снижает численные значения сил резания (в среднем на 15%).

7. Экспериментально получены и математически описаны частные зависимости, устанавливающие взаимосвязь между поперечной и продольной шероховатостью протянутой поверхности и условиями резания. Отмечено, что поперечная шероховатость во всех случаях больше продольной и является определяющей при характеристике микрогеометрии протянутой поверхности. Оценка шероховатости протянутой поверхности выполнена по показателям, предусмотренным ГОСТ 2789-73.

8. Впервые установлена взаимосвязь между состоянием режущего лезвия инструмента и физико-механическими параметрами, характеризующими, поверхностный слой. Установлено, что использование инструмента, имеющего стабильные параметры износа режущего лезвия в пределах эксплуатационного ресурса, обеспечивает постоянные физико-механические параметры поверхностного слоя.

9. Получены и математически описаны зависимости, устанавливающие взаимосвязь глубины проникновения остаточных напряжений от режимных факторов; величина остаточных напряжений достигает максимума (порядка 4500 Н/мм^2) и дальнейшее ужесточение условий обработки вызывает только увеличение глубины их проникновения. Установлено, что наибольшее влияние на глубину проникновения остаточных напряжений оказывает величина подъема на зуб инструмента.

10. Результаты исследований внедрены на промышленных предприятиях и научно-исследовательских учреждениях. Годовой экономический эффект от внедрения протяжек из рекомендованных марок быстрорежущих сталей составляет 44,9 тыс. рублей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. В.Э.Фриц. Исследование процесса протягивания титановых сплавов инструментами из быстрорежущих сталей. — Материалы Всесоюзной научно-технической конференции "Прогрессивные методы обработки труднообрабатываемых материалов на металлорежущих

Всероссийской научно-технической конференции "Прогрессивные методы обработки труднообрабатываемых материалов на металлорежущих станках", Иданов, 1980, с.69 - 70.

2. В.П.Покровский, В.Э.Фрад. Протягивание титановых сплавов инструментами из быстрорежущих сталей. - В сб. "Технология машиностроения для легкой и пищевой промышленности и бытовых приборов", ЦНИИТЭИлегпищепром, М., 1980, с.4 - 5.

3. В.Э.Фрад. Методика определения критерия износа протяжек из быстрорежущих сталей в условиях несвободного резания. - Депонированная рукопись. Указатель ВИНТИ 1980, №7, с.81.

4. В.Э.Фрад. К вопросу о протягивании пазов. - Депонированная рукопись. Указатель ВИНТИ 1980, №7, с. 81.