

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



ВОРОПАЕВ Владимир Валерьевич

**УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКОЙ
КОЛЬЦЕВЫХ УЧАСТКОВ СТАЛИ 20X13 ПРИ ОБРАБОТКЕ
ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена на кафедре термообработки и физики металлов Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
КУЗНЕЦОВ Виктор Павлович

Официальные оппоненты: **ПОТЕХИН Борис Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры технологических машин и технологии машиностроения;

СМОЛИН Игорь Юрьевич, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, заведующий лабораторией нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем;

ШВЕЙКИН Владимир Павлович, доктор технических наук, доцент, ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, заместитель директора по научной работе

Защита состоится «28» июня 2021 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.04.08 по адресу: 640002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=2246>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Селиванова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Эксплуатационные свойства деталей трибосопряжений, работающих в условиях высоких контактных давлений, в значительной степени определяются свойствами поверхностного слоя. Существуют два подхода к поверхностному упрочнению сталей. Первый основан на наращивании нового слоя наплавкой или нанесением покрытия. Второй предполагает модификацию поверхностного слоя без намеренного увеличения размеров детали за счет применения методов диффузионной или селективной (трансформационной) закалки. Наиболее распространенными методами селективной закалки в настоящее время являются плазменная и лазерная.

Поверхностная закалка сталей в процессе обработки трением с перемешиванием (далее ОТП, в зарубежной литературе FSP – Friction Stir Processing) имеет ряд существенных преимуществ. Во-первых, ОТП может быть одним из переходов многоцелевой обработки деталей трибосопряжений на станках с ЧПУ. Во-вторых, предлагаемая технология поверхностного упрочнения является экологически чистой и энергосберегающей.

Существует множество высокоточных деталей трибосопряжений с кольцевыми уплотнительными поверхностями, которые могут быть упрочнены закалкой в процессе обработки трением с перемешиванием на современных обрабатывающих центрах. Примером этих деталей могут быть запорные органы клиновых и шиберных задвижек, подшипники скольжения и др.

В настоящее время теоретических исследований в области управления поверхностной закалкой кольцевых участков методом ОТП практически не существует. Отсутствуют сведения о совокупном влиянии параметров нормальной силы, коэффициента трения, скоростей вращения и подачи, а также траектории движения инструмента на термический цикл закалки и формирование твердости и структуры в поверхностном слое сталей. Таким образом, научное обоснование управления поверхностной закалкой при ОТП ограниченных кольцевых участков стали 20X13, вовлеченных в трибологический контакт, является актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам теории и конечно-элементного моделирования (КЭМ) селективной поверхностной закалки с применением лазерного и плазменного теплового воздействия посвящены работы отечественных и зарубежных ученых – Григорьянца А.С., Майорова В.С., Короткова В.А., Сафонова Е.Н, Kovacevic R., Hyungson Ki, Sangwoo So, Campana G., Mazumder J., Mahmoudi B. и др., в которых подробно исследована взаимосвязь технологических параметров процессов с термическим циклом и формированием структуры и свойств упрочняемых сталей и сплавов при одно- и многопроходной обработке.

Впервые вопросы закалки в процессе ОТП поверхностного слоя рассмотрены в работе S. Dodds применительно к стали AISI 420. Дальнейшие исследования фрикционной закалки выполнены Lorenzo-Martin C. и Ajaay O., которые выявили ее механизмы: измельчение зерна и повышенная растворимость углерода. Показано, что применительно к стали AISI 4140 происходит быстрый нагрев до температуры 1000 °С и более, при этом температура инструмента достигает 940...1000 С. После прохождения инструментом участка поверхности происходит быстрое охлаждение и аустенит переходит в гораздо более твердую мартенситную фазу. Однако теоретического подхода к управлению поверхностной закалкой сталей во взаимосвязи с технологическими параметрами процесса и коэффициентом трения, а также траекторией движения инструмента не существует.

Цель диссертационной работы: научное обоснование поверхностной закалки и обеспечения равномерной твердости кольцевых участков при ОТП изделий из стали 20X13 цилиндрическим твердосплавным инструментом с плоским торцом на основе КЭМ и экспериментальных исследований процесса.

Задачи исследования:

1 Разработать обобщенную модель управления поверхностной закалкой конструкционных материалов в процессе однопроходной ОТП и обосновать траектории движения твердосплавного инструмента с плоским торцом и метод охлаждения заготовки для уменьшения влияния объемного нагрева при упрочнении кольцевых участков.

2 Установить взаимосвязь температуры нагрева, времени аустенизации и скорости охлаждения стали 20X13 с технологическими параметрами процесса ОТП и коэффициентом трения методом конечно-элементного моделирования.

3 Выполнить экспериментальные исследования влияния технологических параметров и коэффициента трения на эволюцию термического цикла поверхностной закалки, микротвердость, микроструктуру и толщину упрочненного слоя в процессе однопроходной ОТП и сравнить с результатами конечно-элементного моделирования.

4 Исследовать распределение твердости в кольцевых участках стали 20X13 после ОТП с движением инструмента по концентрическим окружностям и веерной траектории.

5 Определить влияние охлаждения заготовки в процессе ОТП кольцевого участка стали 20X13 по веерной траектории на изменение микроструктуры и микротвердости по глубине поверхностного слоя и равномерность ее распределения по ширине участка.

Научная новизна:

- впервые разработаны конечно-элементные модели процесса ОТП стали 20X13 твердосплавным цилиндрическим инструментом с плоским торцом, позволяющие управлять поверхностной закалкой на основе определения взаимосвязи температурно-временных параметров термического цикла с технологическими параметрами процесса и коэффициентом трения;

- показана возможность определения методом конечно-элементного моделирования процесса ОТП оптимальной механической нагрузки (нормальной силы и частоты вращения инструмента) при различных коэффициентах трения по критерию достижения температуры 1050...1100 °С, которая благоприятна для аустенизации стали 20X13 и поддержания стойкости твердосплавного WC-Co инструмента;

- научно обоснована поверхностная закалка кольцевого участка стали 20X13 в процессе ОТП при движении твердосплавного инструмента с плоским торцом по веерной траектории, которая обеспечивает стабильный нагрев обрабатываемого материала с температурой от A_{C3} до 1050 °С и равномерную твердость в пределах ширины участка;

- создана экспериментальная установка и выявлено, что стабилизация величины коэффициента трения в процессе ОТП на этапе предварительного нагрева твердосплавного инструмента и стали 20X13 до температуры 1050 °С определяется временем разогрева и частотой вращения инструмента при заданной нормальной силе;

- впервые установлено, что характер циклического нагрева материала при поверхностной закалке в процессе ОТП кольцевого участка с веерной траекторией движения инструмента оказывает определяющее влияние на протекание процессов аустенизации, мартенситного превращения и распределения твердости по ширине участка.

Теоретическая значимость работы. Результаты диссертационной работы вносят существенный вклад в развитие материаловедческих основ процесса ОТП, заключающийся в

научном обосновании поверхностной закалки. На основе разработанного теоретического подхода к управлению термическим циклом закалки в процессе ОТП и применения полученных результатов КЭМ, прогнозирования диффузии углерода и экспериментальных исследований могут быть определены оптимальные параметры термомеханического воздействия твердосплавным инструментом с плоским торцом на обрабатываемый материал, глубина упрочнения и равномерность твердости в ограниченном кольцевом участке.

Практическая значимость. Разработанный метод управления закалкой в процессе ОТП кольцевых уплотнительных поверхностей трибосопряжений клиньев и шиберов задвижек позволяет исключить дорогостоящие технологии наплавки. Полученные результаты могут быть использованы на предприятиях арматуростроения и нефтегазового машиностроения, в подшипниковой промышленности, а также в образовательном процессе высших учебных заведений по направлению подготовки «Материаловедение и технологии материалов».

Методология и методы исследований. В качестве методологической основы использованы труды отечественных и зарубежных ученых, указанные в диссертации. Для изучения процесса поверхностной закалки применялись методы КЭМ и экспериментальных исследований с использованием современного технологического и измерительного оборудования. Для изучения эволюции микроструктуры и свойств поверхностного слоя использован комплекс методов исследований: растровая (РЭМ) и просвечивающая (ПЭМ) электронная микроскопия, рентгено-структурный анализ, микродюрометрия и трибометрия.

Положения, выносимые на защиту:

1 Стадийность поверхностной закалки, включающая предварительный разогрев инструмента и обрабатываемого материала до достижения температуры 1050...1100 °С с продолжительностью до стабилизации величины коэффициента трения, и высокоскоростной термический цикл закалки при оптимальной подаче инструмента.

2 Результаты конечно-элементного моделирования эволюции термических циклов закалки стали по глубине поверхностного слоя при изменении подачи и коэффициента трения в контакте твердосплавного инструмента.

3 Методы экспериментального исследования и определения динамики изменения коэффициента трения на этапе разогрева и температуры в контактной зоне и на глубине 0,5 мм от поверхности на этапах аустенизации и охлаждения стали 20X13.

4 Анализ распределения микротвердости по ширине кольцевого участка и глубине упрочняемого слоя

Достоверность результатов обеспечивается комплексным подходом к решению поставленных задач с использованием апробированных методов моделирования и экспериментальных исследований, аттестованных средств измерения, применением статистических методов обработки данных, непротиворечивостью полученных и приведенных в литературе результатов поверхностной закалки стали 20X13.

Апробация диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на 5-ти конференциях, в том числе на V Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Томск, 2016 г.), VI Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в науке и технике» (Томск, 2016 г.), IV Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2017 г.), XIX Международной научно-технической Уральской школе-семинаре металловедов – молодых ученых (Екатеринбург, 2018 г.), XXV Уральской школе металловедов-термистов (Екатеринбург, 2020 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 5 статей в журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ в том числе 3 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Scopus; 6 публикаций в сборниках трудов научно-технических конференций различного уровня, 2 патента РФ на изобретение и полезную модель.

Личный вклад автора состоит в формулировании методологического подхода к управлению поверхностной закалкой в процессе ОТП; подготовке образцов, планировании и проведении экспериментальных исследований процесса, структуры и свойств упрочненного поверхностного слоя; сопоставлении полученных результатов с литературными данными; обобщении результатов моделирования и экспериментов; формулировании основных научных положений и выводов; подготовке и написании публикаций и патентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-08-01511А и в рамках реализации совместных исследований ООО «Предприятие «Сенсор» и кафедры «Термообработка и физика металлов» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка цитируемой литературы из 54-х источников и 6-ти приложений. Работа изложена на 169 страницах, содержит 100 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, степень ее разработанности; сформулированы цель и задачи диссертационной работы, положения, выносимые на защиту; определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования. Описаны личный вклад соискателя, структура и объем диссертации.

В первом разделе представлены результаты аналитических исследований литературных источников, касающихся современных методов поверхностной закалки, особенностей их моделирования и экспериментальных исследований, изучения эволюции микроструктуры и свойств упрочненного материала, анализа подходов к оценке влияния поверхностной закалки сталей в процессе ОТП.

Второй раздел посвящен обоснованию выбора обрабатываемого и инструментального материалов, оборудования, а также разработке теоретического подхода к управлению термическим циклом поверхностной закалки в процессе ОТП во взаимосвязи с технологическими параметрами и коэффициентом трения, формированием структуры и свойств упрочняемого поверхностного слоя.

Обрабатываемым материалом при исследованиях фрикционной поверхностной закалки была выбрана мартенситная нержавеющая сталь 20X13, которая является аналогом стали AISI 420 и применялась ранее в исследованиях трансформационной поверхностной лазерной закалки, а также при упрочнении методом FSP, результаты настоящей работы можно будет сопоставить с работами В. Mahmoudi, M.L. Escudero, S. Dodds. Кроме того, выбор стали 20X13 связан с практической задачей локального упрочнения кольцевых уплотнительных поверхностей клиньев и шиберов задвижек.

Образцы для экспериментальных исследований в виде дисков толщиной 15 мм были получены из круглого прутка стали 20X13 диаметром 100 мм в состоянии поставки. Обработка трением с перемешиванием осуществлялась на обрабатывающем центре OKUMA MA-600H, который позволяет обеспечить частоту вращения шпинделя от 50 до 6000 об/мин и

скорость минутной подачи в пределах 1...60000 мм/мин при мощности привода шпинделя 22 кВт.

Важнейшим условием фрикционной закалки является применение материала инструмента с минимальной теплопроводностью, высокой тепловой стойкостью и способностью обеспечить коэффициент трения для развития тепловой мощности, сравнимой с лазерным или плазменным воздействием. Для ОТП стали 20X13 использовался твердосплавный инструмент из мелкозернистого сплава KMG303 фирмы ZSC СТ (Китай) диаметром 10 мм с плоским торцом и фаской 0,5 x 45° с кратковременной тепловой стойкостью более 1000 °С.

Для задания нормальной силы F_n была разработана и изготовлена специальная инструментальная державка с пружиной, позволяющая осуществлять плавную настройку в диапазоне от 2 до 4 кН [Патент РФ 197773].

Научное обоснование поверхностной закалки в процессе ОТП инструментом с плоским торцом основано на поэтапной реализации обобщенной модели взаимосвязи параметров термического цикла с технологическими и тепловыми параметрами процесса и коэффициентом трения. Схема процесса ОТП и обобщенная модель управления термическим циклом поверхностной закалки приведена на рисунке 1 а, б.

Реализация обобщенной модели управления закалкой на первом временном этапе разогрева инструмента $t_p(f=0)$ и нагрева материала $t_H(f)$ состоит в установлении взаимосвязи технологических параметров процесса ОТП (нормальной силы F_n , частоты вращения инструмента n и коэффициента трения μ) с параметрами тепловыделения (мощностью тепловыделения P_μ и плотностью теплового потока q_M), температурой нагрева материала (T_M) по глубине поверхностного слоя и инструмента (T_H) при отсутствии подачи ($f_H=0$) и при движении с линейной скоростью f .

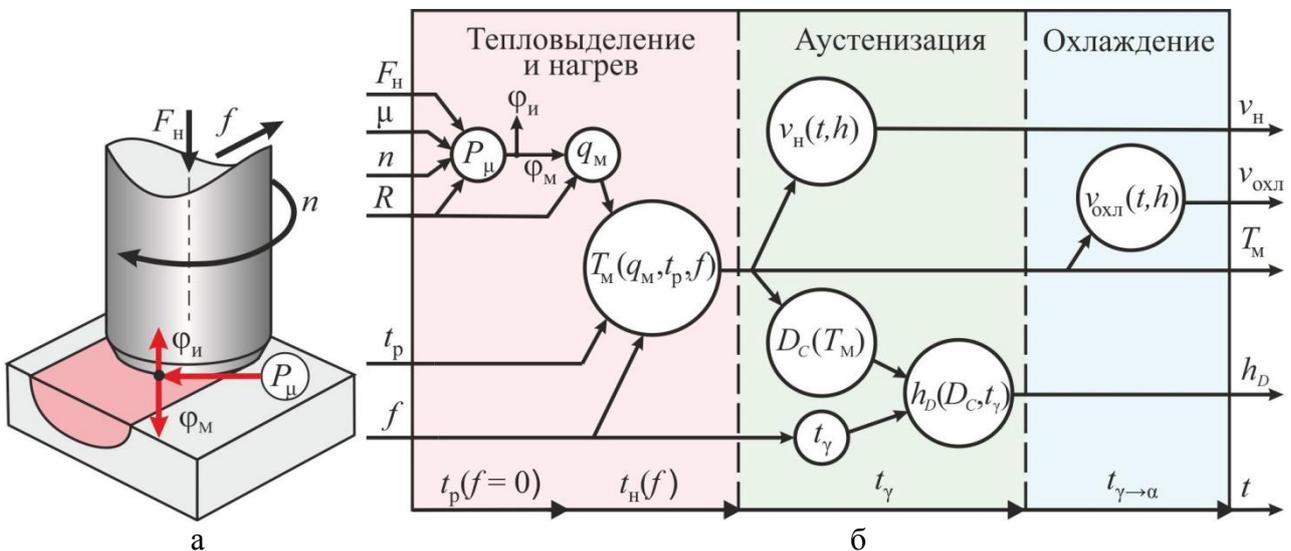


Рисунок 1 – Схема процесса ОТП с технологическими и тепловыми параметрами (а) и обобщенная модель управления термическим циклом закалки конструкционных материалов (б)

Мощность фрикционного тепловыделения P_μ в контакте цилиндрического инструмента с плоским торцом радиусом R_H может быть определена по зависимости, предложенной Frigaard:

$$P_{\mu} = \frac{4}{3} \pi \mu F_{\text{н}} n R_{\text{и}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения, $F_{\text{н}}$ – нормальная сила, Н; n – частота вращения инструмента, об/мин.

Время разогрева упрочняемого материала $t_{\text{р}}$ определяется по достижению температуры нагрева $T_{\text{м}} \geq A_{\text{СЗ}}$ и минимальному переносу обрабатываемого материала на инструмент. Выявить закономерности изменения температуры нагрева материала от частоты вращения инструмента n , нормальной силы $F_{\text{н}}$, коэффициента трения μ и подачи $f_{\text{и}}$ по глубине поверхностного слоя можно методом конечно-элементного моделирования при установленных зависимостях теплопроводности инструментального и обрабатываемого материала от температуры.

Второй этап реализации обобщенной модели управления поверхностной закалкой предполагает определение $T_{\text{м}}$ и анализ температурных всплесков $T_{\text{м}} = f(t, f_{\text{и}}, \mu)$ по глубине поверхностного слоя методом конечно-элементного моделирования и путем экспериментальных исследований процесса. Предполагается вычислении скоростей нагрева $v_{\text{н}}$ и охлаждения $v_{\text{охл}}$, времени аустенизации t_{γ} и глубины диффузии углерода h_{D} .

Для обеспечения равномерной твердости широкого участка в процессе ОТП инструментом с плоским торцом предложены два вида траектории его движения: 1) по концентрическим окружностям с 50% перекрытием дорожек трения, рассмотренных в работах Г. Самрана и др. для многопроходной лазерной закалки; 2) веерная.

Инструмент для упрочнения кольцевой поверхности шириной более 4-х радиусов рабочего торца инструмента ($l_{\text{кп}} \geq 4R_{\text{и}}$) начинает движение из положения (точка) О и далее последовательно перемещается по 3 концентрическим дорожкам трения А, В, С (рис. 2).

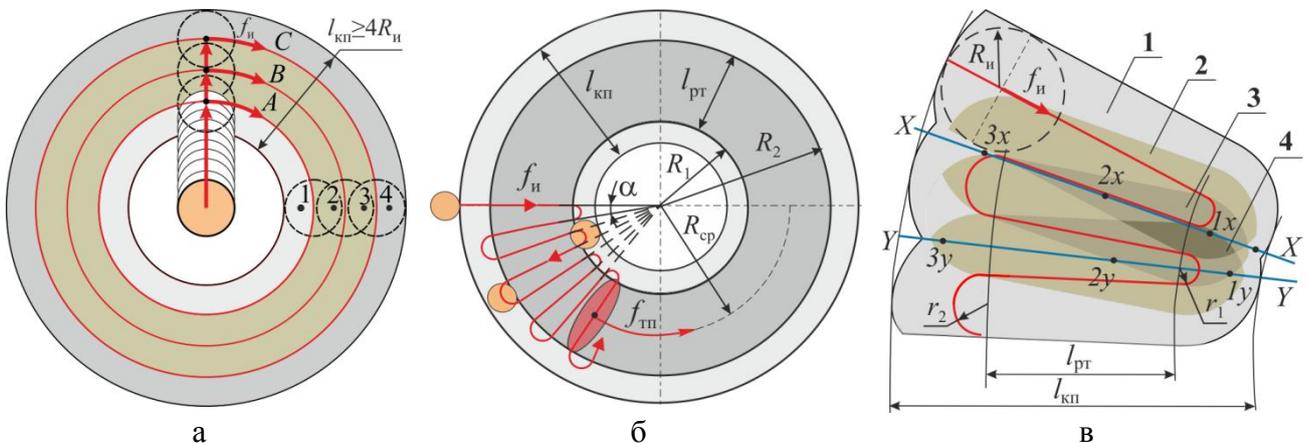


Рисунок 2 – Схемы обработки широкой кольцевой поверхности при движении инструмента:
а) по концентрическим окружностям с 50% перекрытием дорожек трения;
б, в) по веерной траектории

Равномерность твердости по глубине кольцевого участка в значительной степени будет зависеть от температуры термического воздействия при формировании последующих дорожек В и С. Повторный нагрев материала до температуры среднего отпуска (~ 500 °С) может привести к снижению твердости на первой дорожке А (точка 1) и в зонах перекрытия (точки 2 и 3) дорожек В и С.

Для более равномерного упрочнения материала в процессе ОТП широкого кольцевого участка ($l_{\text{кп}} \geq 4R_{\text{и}}$) впервые предложена веерная траектория непрерывного движения инстру-

мента, которая в пределах участка $l_{\text{пр}} \approx \frac{2}{3}l_{\text{кп}}$ обеспечивает формирование интегрального теплового пятна, перемещающегося с оптимальной скоростью для закалки и получения равномерной твердости материала. В тепловом пятне обеспечивается стабильный нагрев поверхностного слоя выше температуры A_{C3} и исключается отпук (рис. 2, б).

На основе геометрической модели ОТП кольцевой поверхности с веерной траекторией движения инструмента получена математическая зависимость скорости перемещения интегрального теплового пятна:

$$f_{\text{пр}} = \frac{(R_1 + R_2) \cdot \alpha \cdot f_{\text{и}}}{2(R_2 - R_1) + \pi(r_1 + r_2)}, \quad (2)$$

где R_1, R_2 – радиусы верхней и нижней границы участка $l_{\text{пр}}$; α – угол секции веерной траектории; $f_{\text{и}}$ – подача инструмента; r_1, r_2 – радиусы траектории поворота инструмента у наружной и внутренней границы кольцевой поверхности $l_{\text{пр}}$;

При применении веерной траектории движения в ограниченной кольцевой поверхности шириной $l_{\text{пр}} = \frac{2}{3}l_{\text{кп}}$ на различных участках от периферии к центру возникает от двух до четырех перекрытий дорожек трения (выделены цифрами и цветом на рисунке 2, в). Материал в характерных точках x_1, x_2, x_3 вдоль линии X-X и y_1, y_2, y_3 вдоль линии Y-Y будет претерпевать от двух до четырех циклов закалки.

Третий раздел посвящен теоретическому исследованию термического цикла поверхностной закалки стали 20X13 на основе КЭМ одно- и многопроходного процесса ОТП.

Для прогнозирования температурных полей нагрева материала в зависимости от изменения технологических параметров процесса ОТП использован метод конечных элементов, реализованный в лицензированном пакете программного обеспечения ANSYS Mechanical 2019 R3, с использованием APDL (ANSYS Parametric Design Language). Переходные зависимости температуры от времени в декартовой системе координат определялись на основе трёхмерного нелинейного уравнения теплопередачи:

$$\frac{\partial(\rho(T)C_p(T)T)}{\partial t} = \frac{\partial^2(k(T)T)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(k(T)T)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(k(T)T)}{\partial z^2} + Q_{\text{int}}, \quad (3)$$

где k – коэффициент теплопроводности, C_p – удельная теплоёмкость и ρ – плотность материала, Q_{int} – мощность внутреннего тепловыделения.

Геометрическая модель процесса ОТП в пакете ANSYS представляет собой цилиндрический инструмент (pin) с фаской, находящийся во фрикционном контакте с поверхностью образца в виде параллелепипеда (рисунок 3). Сетка конечных элементов построена по методу Multizone и состоит из гексаэдров с размерами 1x1 мм в поверхностном слое и инструменте вблизи контактной зоны. Контакт торца инструмента с образцом имеет формулировки asymmetric frictional с изменяемым коэффициентом трения. Установлен идеальный тепловой контакт между сопрягаемыми телами путём задания контактного коэффициента теплопроводности $\lambda = 1E+06$ Вт/м²°С как параметр элементов CONTA174.

Тепловые свойства подвергаемой поверхностной закалке стали 20X13 в состоянии поставки, такие как плотность ρ , теплопроводность λ и теплоёмкость C_p , задавались в диапазоне температур от 0 до 2000 °С в соответствии с данными коммерческой базы данных SYSWELD. Тепловые свойства инструментального материала KMG303 принимались на ос-

нове экспериментальных исследований температуропроводности и расчета теплопроводности с использованием данных о теплоемкости из работы Hugh O. Pierson. Плотность материала принималась неизменной $\rho = 15,0 \text{ г/см}^3$.

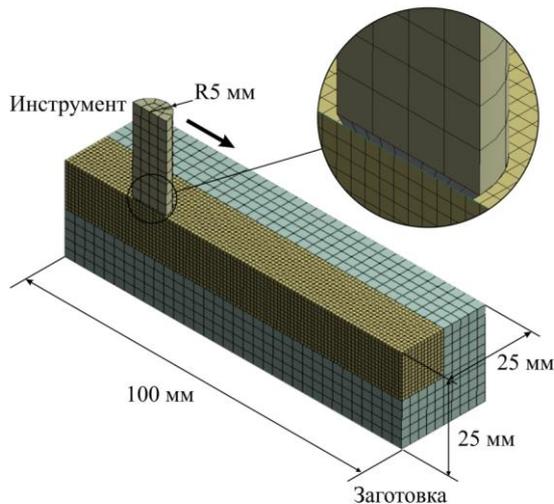
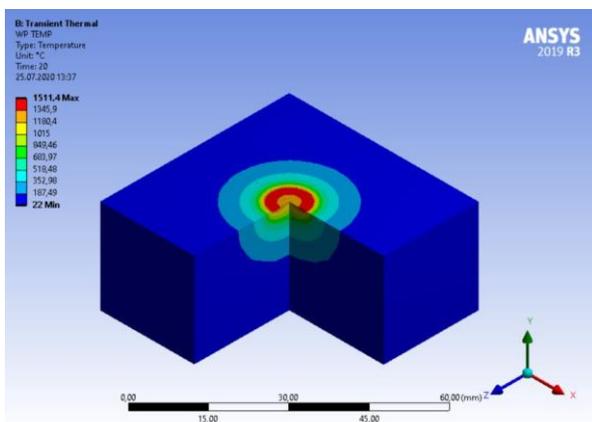


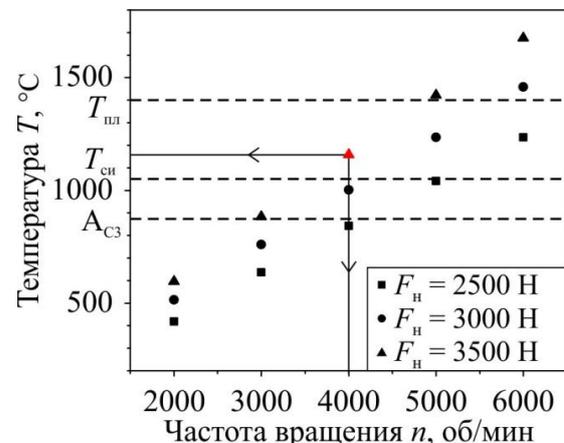
Рисунок 3 – Геометрическая модель процесса ОТП с наложенной сеткой конечных элементов

Начальные тепловые условия для инструмента и обрабатываемой детали задавались следующим образом: $T(x, y, z, t = 0) = T_0; T_0 = +22 \text{ }^\circ\text{C}$.

В рамках модели инструмент первоначально только вращается ($f_n = 0$), симулируя этап разогрева. Время разогрева упрочняемого материала определялось по достижению температуры $T_M \geq A_{C3}$ при изменении трех величин нормальной силы F_H (2500, 3000 и 3500 Н), пяти значений частоты вращения инструмента n (2000, 3000, 4000, 5000 и 6000 об/мин) и коэффициенте трения $\mu=0,3$. Выбор величины коэффициента трения сделан на основе работ J. Rech, из которых известно, что в условиях сухого трения скольжения твердого сплава по сталям при вращающемся контакте цилиндрической или полусферической поверхности и скорости скольжения в пределах 50...300 м/мин $\mu=0,2...0,4$. Результаты моделирования контактной температуры (рисунок 4) позволили установить наиболее благоприятный режим механического воздействия с учетом температуры красностойкости твердосплавного инструмента $T_{CH} \cong 1050...1100 \text{ }^\circ\text{C}$ и в условиях работы станка ниже предельной частоты вращения шпинделя 6000 об/мин: $F_H = 3500 \text{ Н}$ и $n = 4000 \text{ об/мин}$.



а



б

Рисунок 4 – Распределение температуры в контактной зоне при $\mu=0,3$, $F_H=3500 \text{ Н}$, $n=4000 \text{ об/мин}$ (а) и зависимость температуры материала T_M от частоты вращения инструмента n (б)

Выбор данного режима соответствует обеспечению максимальной контактной температуры, практически равной $T_{\text{си}}$. Однако известно, что при движении инструмента с подачей $f_{\text{и}} > 0$ реальная величина коэффициента трения будет меньше, чем $\mu=0,3$. Фактическое значение величины μ может быть определено только экспериментально. Влияние подачи инструмента и коэффициента трения на изменение температуры и времени аустенизации в поверхностном слое образца определялось на втором этапе КЭМ. При этом инструмент вращался и перемещался прямолинейно с постоянной скоростью подачи $f_{\text{и}}$, проходя расстояние 50 мм.

Моделирование процесса выполнялось при подачах $f_{\text{и}} = 50, 75, 100, 125$ и 150 мм/мин для следующих величин коэффициента трения μ : 0,2; 0,22; 0,24; 0,26; 0,28 и 0,30. Нормальная сила $F_{\text{н}}$ и частота вращения n задавались при моделировании равными, соответственно, 3500 Н и 4000 об/мин ($\omega = 66,67$ Гц). На рисунке 5 представлен пример результатов моделирования температуры стали 20X13 на различной глубине от поверхности во взаимосвязи с подачей $f_{\text{и}}$ при коэффициенте трения $\mu = 0,22$.

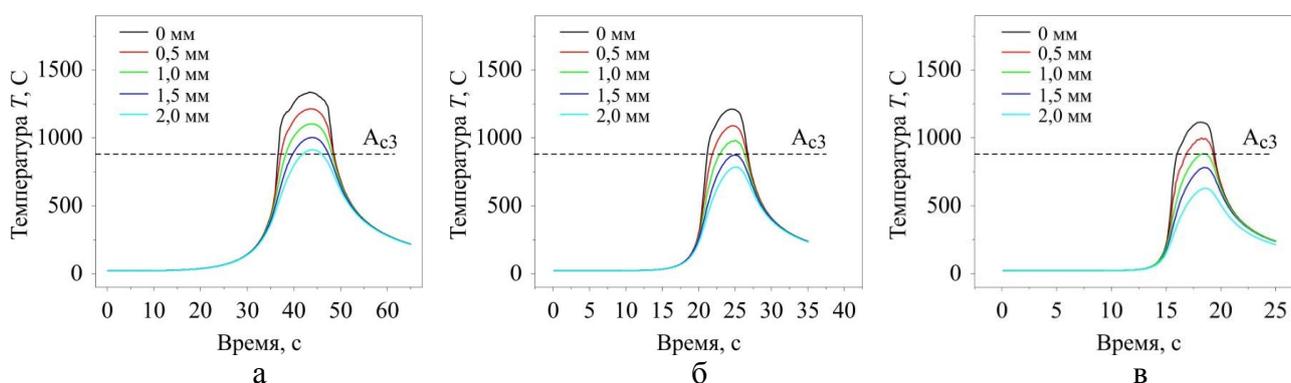


Рисунок 5 – Зависимость температуры в поверхностном слое стали 20X13 от времени нагрева при подачах: а – $f_{\text{и}} = 50$ мм/мин; б – $f_{\text{и}} = 100$ мм/мин; в – $f_{\text{и}} = 150$ мм/мин

Анализ данных температурных вспышек $T_{\text{м}} = f(t, f_{\text{и}}, \mu)$ позволил построить зависимости температуры $T_{\text{м}}$ и времени аустенизации t_{γ} от подачи $f_{\text{и}}$ для различных значений коэффициента трения μ . Пример данных зависимостей на глубине 0,5 мм от поверхности приведен на рисунке 6 а, б.

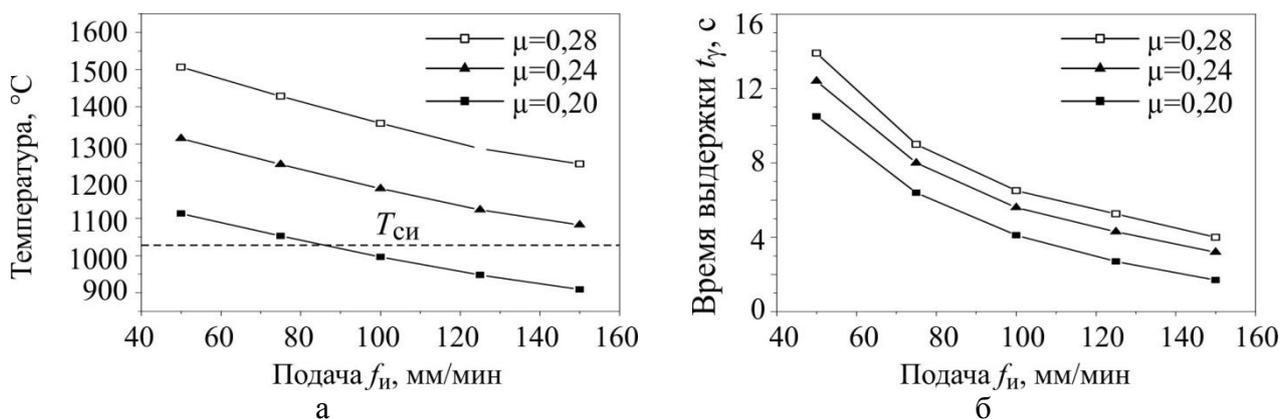


Рисунок 6 – Зависимость температуры материала поверхностного слоя (а) и времени выдержки (б) от подачи $f_{\text{и}}$ и коэффициента трения μ

В результате моделирования процесса при подаче $f_{\text{и}} = 100$ мм/мин и коэффициенте трения $\mu = 0,22$ установлено, что скорость нагрева достигала 245 °C/с, а при $\mu = 0,3$ – практически 500 °C/с. Установленные зависимости времени выдержки t_{γ} от подачи инструмента

f_n и коэффициента трения μ позволили определить глубину диффузии h_D углерода по формуле G. Gottstein:

$$h_D = \int_0^{t_\gamma} \sqrt{6D_C(t)} dt, \quad (4)$$

где D_C – коэффициент диффузии углерода.

Коэффициент диффузии углерода в стали 20X13 определялся по зависимости М.И. Гольдштейна и В.В. Попова

$$D_C = \exp\left[V_0 + \sum V_j C_j\right] \exp\left[-(Q_0 + \sum Q_j C_j)/(RT)\right], \quad (5)$$

где C_j – содержание j -ого элемента в стали, масс. %; коэффициенты $V_0 = -12,511 \text{ м}^2/\text{с}$; $Q_0 = -12560 \text{ Дж/моль}$; $V_j = 0,17 \text{ м}^2/\text{с}$; $Q_j = 2710 \text{ Дж/моль}$.

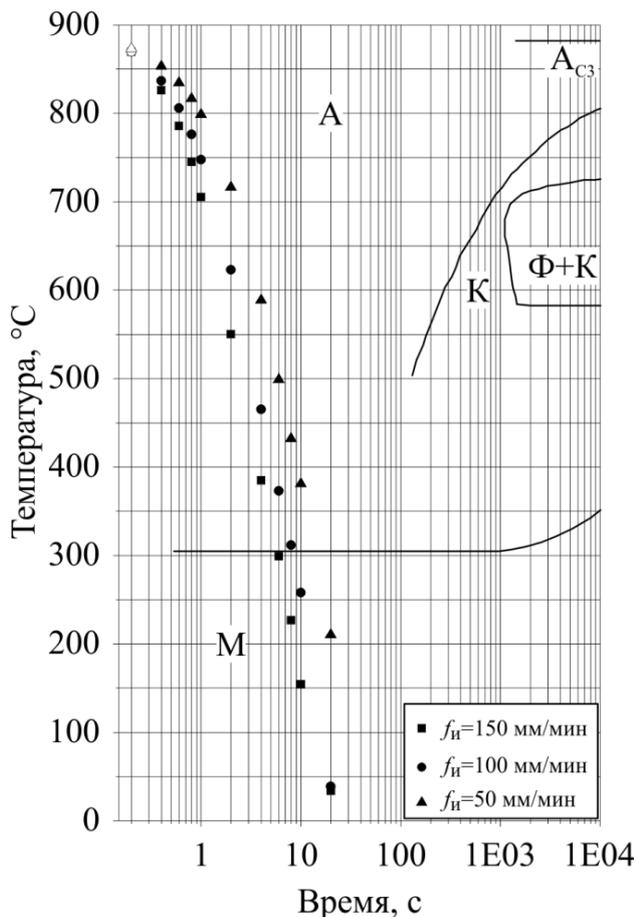


Рисунок 7 – Диаграмма охлаждения стали 20X13 при однопроходной обработке с $F_n=3500 \text{ Н}$, $n=4000 \text{ об/мин}$ и $\mu=0,22$ (КЭМ)

Моделирование выполнялось для обоснованного ранее режима нагружения поверхности ($F_n = 3500 \text{ Н}$, $n = 4000 \text{ об/мин}$, $\mu = 0,22$) при радиусе инструмента $R_n = 4,5 \text{ мм}$ и $f_n = 100 \text{ мм/мин}$. Термические циклы поверхностной закалки материала для характерных точек 1...4 радиального сечения поверхности формируемой кольцевыми концентрическими дорожками трения А, В, С приведены на рисунке 8.

Выявлено, что только на третьей дорожке материал не испытывает повторного нагрева до температур ниже A_{C3} (рисунок 8, в). Таким образом, в рамках обработанного кольцевого участка равномерная твердость может быть обеспечена только на последней дорожке.

На основе КЭМ построены диаграммы охлаждения стали 20X13 после нагрева с различными подачами в процессе однопроходной ОТП с оптимальным режимом механического нагружения ($F_n = 3500 \text{ Н}$ и $n = 4000 \text{ об/мин}$) и коэффициентом трения до $\mu = 0,3$ (рисунок 7).

Анализ диаграмм показывает, что в исследуемом диапазоне подач от 50 до 150 мм/мин скорость охлаждения материала составляет 53,2...140,5 °C/с для обеспечения мартенситного превращения.

КЭМ процесса ОТП широкой кольцевой поверхности ($l_{\text{кп}} > 4R_n$) первоначально проводилось при последовательном движении вращающегося инструмента по 3-м концентрическим окружностям А, В, С с 50-процентным перекрытием соседних дорожек (рисунок 2, а).

Величина перекрытия дорожек трения принималась на основе рекомендаций Г. Самрана для многопроходной лазерной закалки с позиций обеспечения равномерной твердости.

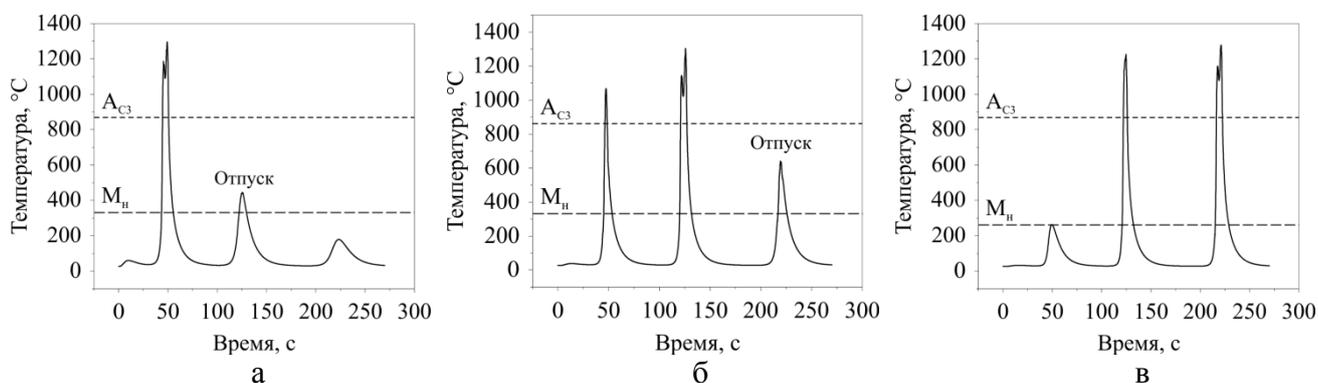


Рисунок 8 – Временные диаграммы изменения температуры в циклах нагрева материала при движении инструмента по кольцевым концентрическим окружностям: а) в точке 1 дорожки А; б) в точке 2 дорожки В; в) в точке 4 дорожки С

Методом КЭМ процесса ОТП получены диаграммы термических циклов поверхностной закалки стали 20Х13 в характерных точках веерной траектории движения инструмента по кольцевой поверхности образца в условиях поддержания температуры на тыльной стороне заготовки $\sim 27^\circ\text{C}$, приведенные на рисунке 9.

При формировании более двух термических циклов некоторые из них происходят при температуре от A_{C1} (810°C) до A_{C3} (870°C) (рисунок 9, а, б) и могут быть охарактеризованы как неполная закалка. Однако последний цикл закалки всегда является полным с температурой нагрева $\sim 1000 \pm 15^\circ\text{C}$.

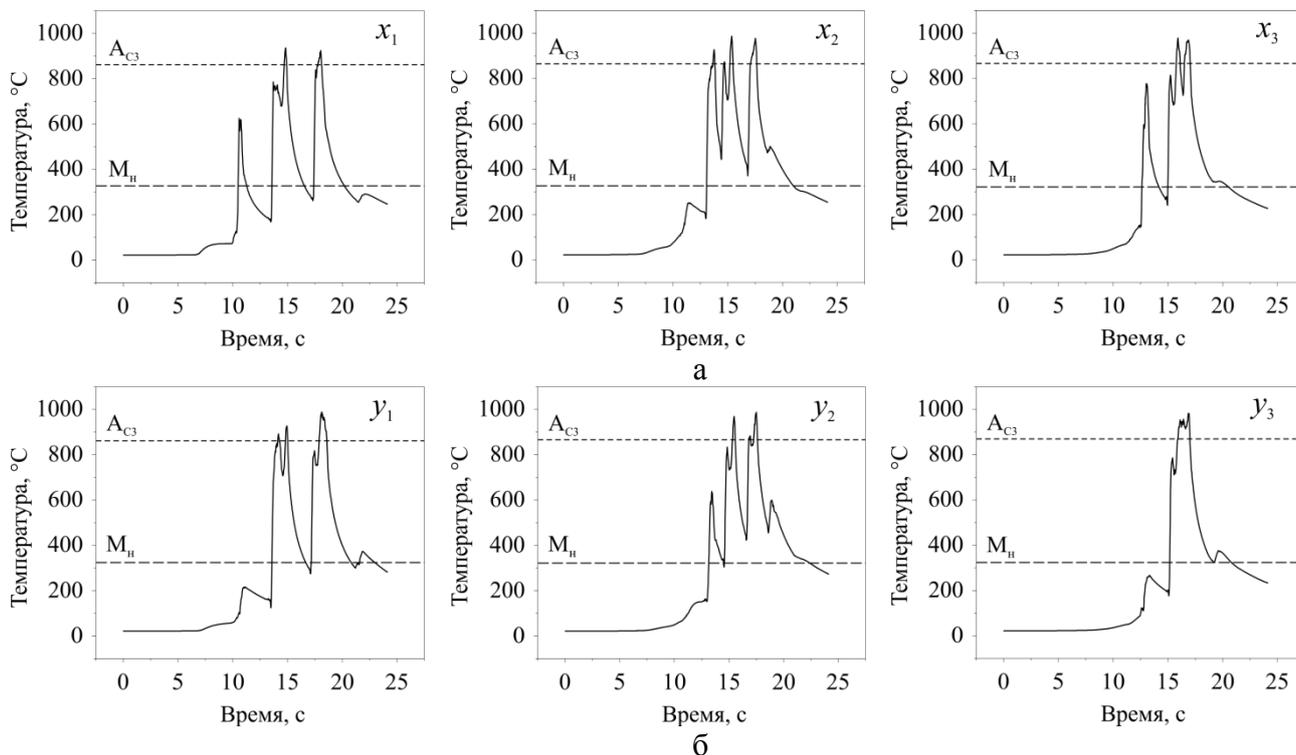


Рисунок 9 – Диаграммы термических циклов поверхностной закалки стали 20Х13 в характерных точках веерной траектории движения инструмента по кольцевой поверхности: а) в точках x_1 , x_2 и x_3 , находящихся в зоне двух, трех и одного циклов закалки вдоль линии X-X; б) в точках y_1 , y_2 и y_3 , находящихся в зоне двух, трех и одного циклов закалки вдоль линии Y-Y.

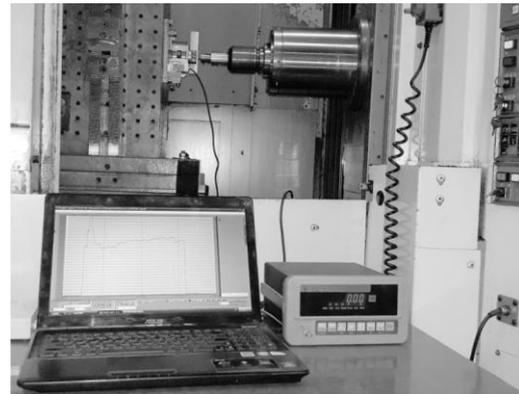
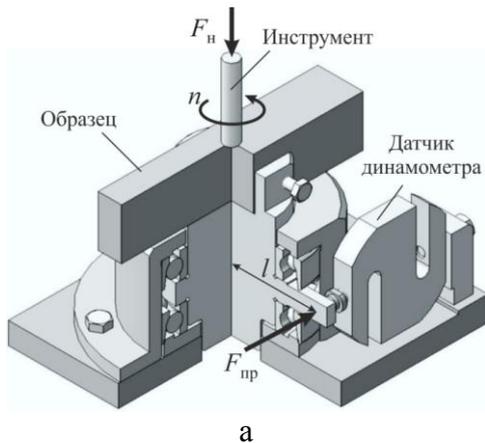
В четвертом разделе приведены результаты экспериментальных исследований процесса ОТП стали 20Х13 на этапе разогрева инструмента и при формировании одной дорожки

трения. На этапе разогрева определена связь величины коэффициента трения с параметрами механической нагрузки (F_n и n) и временем разогрева.

Оценка коэффициента трения μ на этапе разогрева материала вращающегося цилиндрического инструмента осуществлялась путем определения приведенного крутящего момента с помощью разработанного трибометрического устройства. Крутящий момент в трибометре приводится к величине $M_{пр} = F_{пр}l$. Сила $F_{пр}$ измеряется с помощью датчика типа PST-50, входящего в состав динамометра АЦД 2С-05/1И-1 (рисунок 10).

Используя зависимость Φ . Frigaard $M=2\mu F_n R_n/3$ для крутящего момента инструмента в процессе ОТП при условии $M_{пр}=M$, получена формула для вычисления коэффициента трения

$$\mu = \frac{3F_{пр}l}{2F_n R} \quad (6)$$

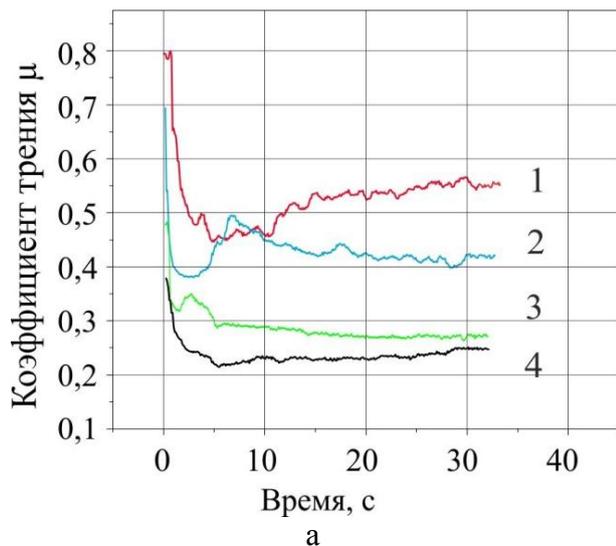


а

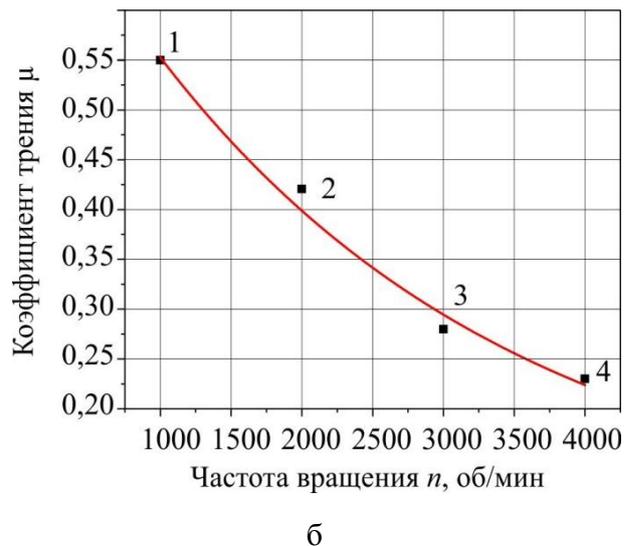
б

Рисунок 10 – Схема трибометрического устройства (а) и общий вид измерительного комплекса на базе динамометра АЦД 2С-05/1И-1 (б)

Расчеты величин коэффициента трения по формуле (6) осуществлялись в программе OriginPro 2019 на основе измерения величины $F_{пр}$ для четырех значений частоты вращения инструмента $n = 1000, 2000, 3000$ и 4000 об/мин при нагрузке $F_n = 3500$ Н (рисунок 11, а).



а



б

Рисунок 11 – Динамика изменения коэффициента трения μ в процессе разогрева контактной зоны (а) и при различной частоте вращения инструмента (б)

Зависимость коэффициента трения μ от частоты вращения инструмента n в установленном режиме представлена на рисунке 11, б. Установлено, что наиболее благоприятным

режимом разогрева стали 20X13 при нормальной силе $F_n=3500$ Н является продолжительность 5...6 с с частотой вращения 3000...4000 об/мин.

Экспериментальные исследования процесса для установления взаимосвязи изменения температуры в контактной зоне инструмента и на глубине 0,5 мм от поверхности, а также изменения микроструктуры и микротвердости $HV_{0,05}$ по толщине упрочняемого слоя от подачи f_n инструмента, выполнены при оптимальной механической нагрузке $F_n = 3500$ Н и $n = 4000$ об/мин. На плоских образцах с тыльной стороны были сделаны отверстия диаметром 1,5 мм для установки термопар 1...4 марки ТХА типа К (рисунок 12). Подача инструмента принималась равной 25; 50; 75; 100; 125; 150 и 175 м/мин.

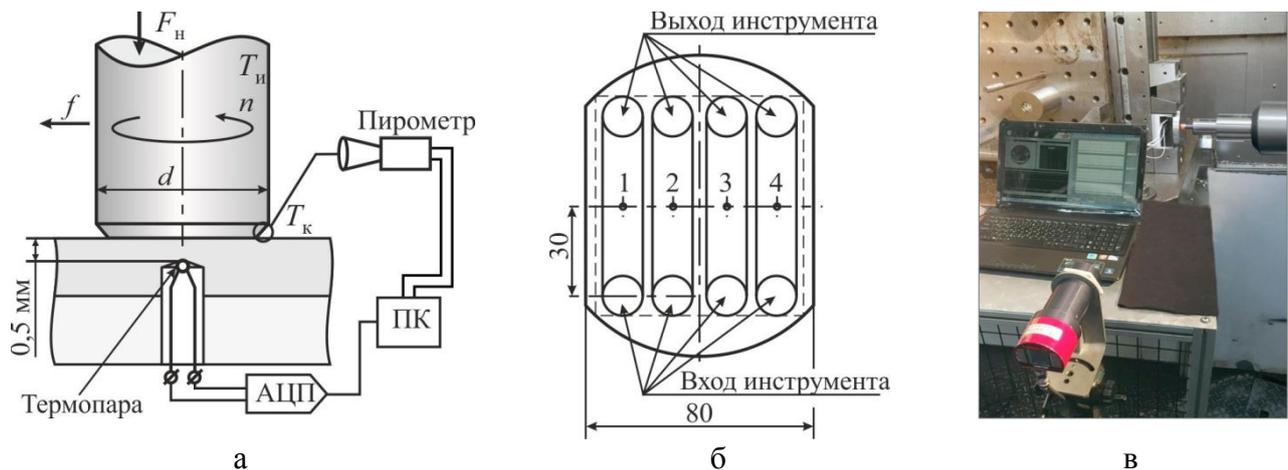


Рисунок 12 –Схема измерения температуры в поверхностном слое термопарами и пирометром в контактной зоне инструмента (а), расположение термопар под упрочняемыми дорожками (б) и общий вид измерительного комплекса на станке (в)

Поверхность образцов предварительно обрабатывалась чистовым фрезерованием до достижения шероховатости $Ra = 0,8$ мкм. Координаты отверстий соответствовали серединам обрабатываемых дорожек. Сигнал с термопар поступал через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) L-Card E20-10 на персональный компьютер (ПК), где в программном обеспечении L-Graph II в режиме реального времени производилась запись и синхронизация во времени полученных данных. Контактная температура T_k измерялась пирометром LANDSPOT 5 и также синхронно записывалась на ПК. Пирометр был настроен на измерение максимальной температуры в пределах анализируемого пятна диаметром 5 мм.

Пример динамики изменения температуры в контакте T_k и на глубине 0,5 мм от поверхности $T_{0,5}$, а также времени выдержки t_γ при подачах $f_n = 100$ и 150 мм/мин приведен на рисунке 13. Для подач f_n от 25 до 175 мм/мин результаты измерения температур T_k и $T_{0,5}$, а также времени выдержки t_γ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения температур и экспериментальные данные времени выдержки

f_n , мм/мин	25	50	75	100	125	150	175
T_k , °С	1412	1352	1214	1167	1104	1058	1033
$T_{0,5}$, °С	1293	1191	1117	1064	1051	1006	991
t_γ , с	27,5	10	6,2	4,7	4,1	3,5	3,1

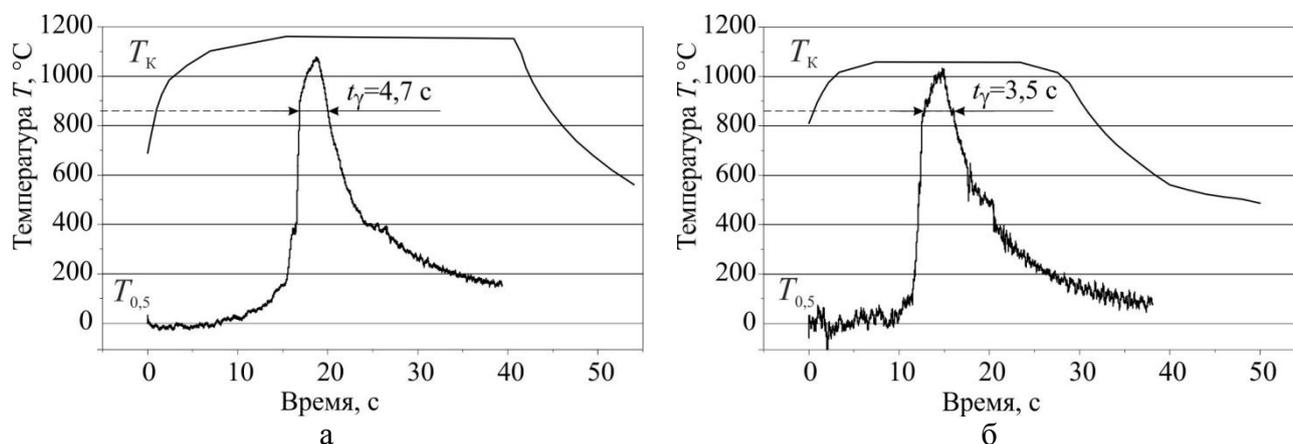


Рисунок 13 – Динамика изменения температуры в контактной зоне инструмента и на глубине 0,5 мм от поверхности при подачах $f_{и} = 100$ мм/мин (а) и $f_{и} = 150$ мм/мин (б)

На основе анализа экспериментальных данных параметров термического цикла построена диаграмма охлаждения стали 20X13 для ОТП при подачах инструмента в пределах от 25 до 175 мм/мин (рисунок 14).

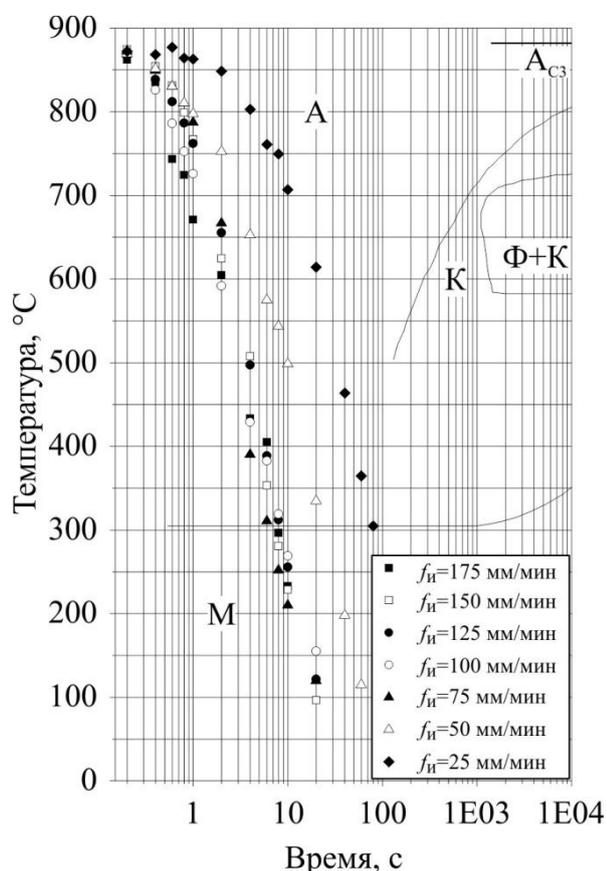


Таблица 2. Сравнительные данные скорости охлаждения стали 20X13

Подача $f_{и}$, мм/мин	Скорость охлаждения, °C/c		δ , %
	ANSYS $\mu = 0,3$	Эксперимент	
50	63,2	54,1	3,51
100	101,1	123,8	14,73
150	140,5	136,6	11,58

Рисунок 14 – Диаграмма охлаждения стали 20X13 в процессе ОТП с различными подачами инструмента (экспериментальные данные)

Установлено, что скорости охлаждения, полученные в результате КЭМ процесса при $\mu = 0,22$ и при экспериментальных исследованиях для подач $f_{и} = 50, 100$ и 150 мм/мин отличаются не более чем на 14,7 %. Сравнительные данные приведены в таблице 2.

Подготовлены образцы с косым шлифом и выполнены исследования микротвердости $HV_{0,05}$ по глубине от поверхности для однопроходной обработки с подачами 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 и 200 мм/мин в условиях оптимального механического нагружения ($F_{н} = 3500$ Н и $n = 4000$ об/мин).

На рисунке 15 приведены экспериментальные зависимости микротвердости $HV_{0,05}$ от подачи по глубине поверхностного слоя в поперечном сечении дорожек трения для $f_{и} = 50, 75, 100, 125$ и 150 мм/мин. На основе данных о глубине от поверхности по линии микротвердости $500 HV_{0,05}$, представленных на рисунке 15, построена зависимость 1 на рисунке 16. Кроме того, на рисунке 16 приведены расчетные зависимости глубины диффузии углерода h_D от подачи для следующих значений коэффициента трения: $\mu=0,22$ (кривая 2), $\mu=0,24$ (кривая 3), $\mu=0,26$ (кривая 4). Установлено, что глубина слоя с микротвердостью $500 HV_{0,05}$ для различных подач в полной мере соответствует диффузионному фронту углерода при $\mu=0,24$.

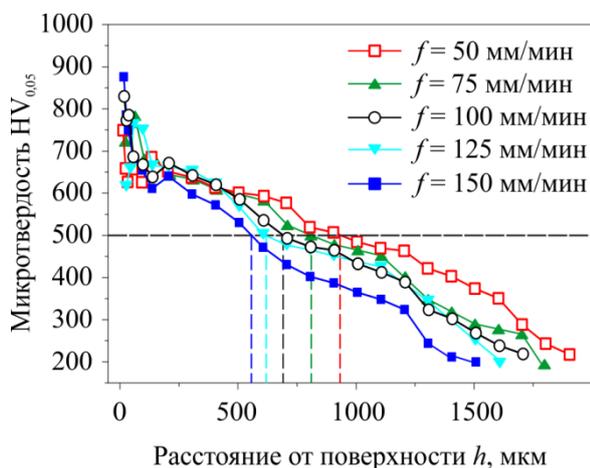


Рисунок 15 – Изменение микротвердости $HV_{0,05}$ по глубине поверхностного слоя h в зависимости от подачи $f_{и}$

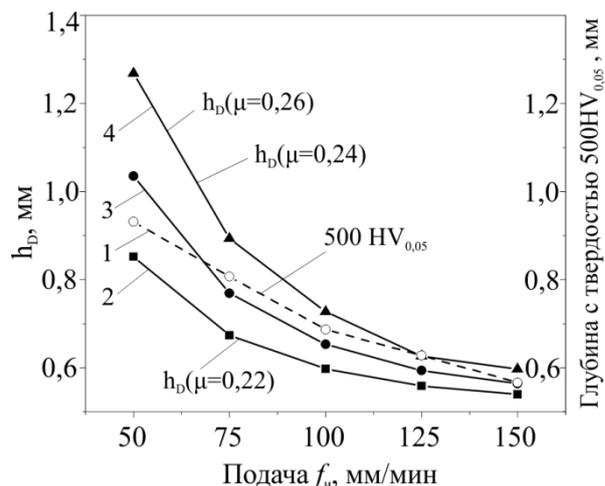


Рисунок 16 – Экспериментальная зависимость глубины упрочненного слоя с микротвердостью $500 HV_{0,05}$ (1) и расчетные зависимости глубины диффузии углерода (2, 3, 4) от подачи при различных коэффициентах трения

На рисунке 17, а приведена оптическая микроскопия поверхностного слоя в поперечном сечении дорожки трения после ОТП с подачей 100 мм/мин.

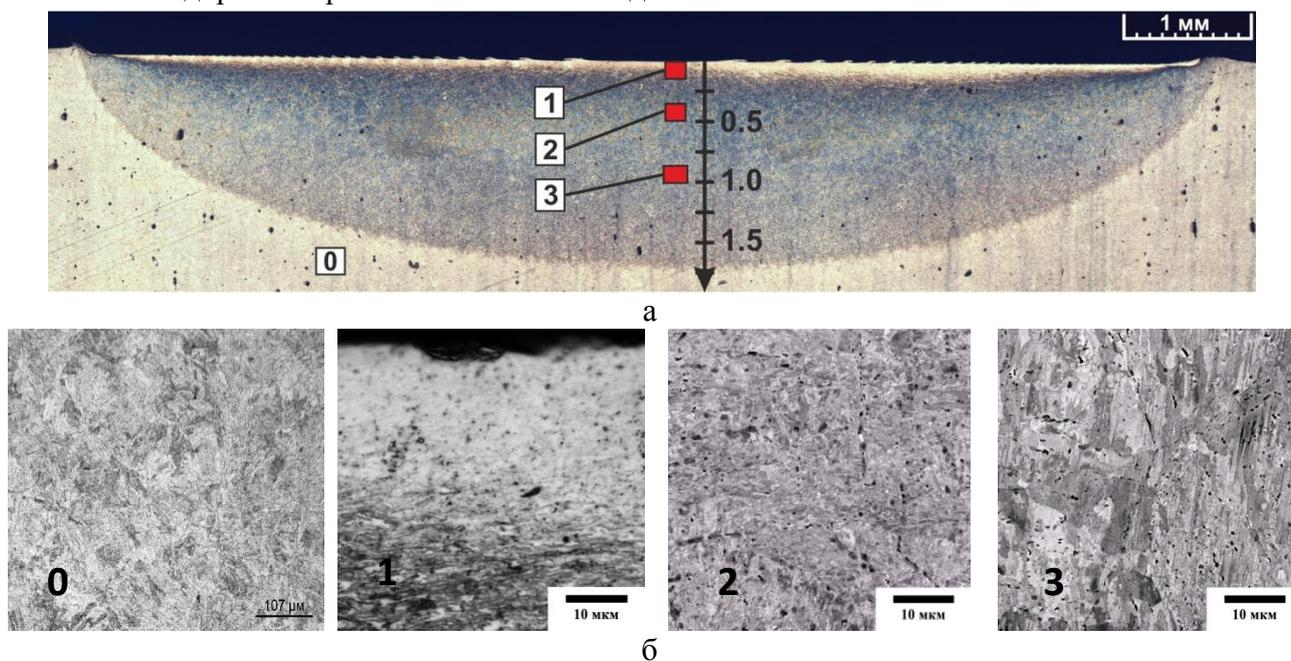


Рисунок 17 – Оптическая (а) и сканирующая (б) микроскопия структуры в поперечном сечении фрикционной дорожки после однопроходной обработки: 0 – матрица; 1 – на глубине до 50 мкм; 2 – на глубине от $0,45$ до $0,5$ мм; 3 – на глубине от $0,9$ до 1 мм

В состоянии поставки сталь 20X13 имеет ферритно-перлитную структуру с многочисленными включениями карбидов (рисунок 17, б, зона 0). На глубине до 50 мкм от поверхности формируется сильнодеформированная структура, обусловленная комплексным воздействием фрикционной закалки и перемешиванием стали 20X13 инструментом. Анализ микроструктуры в зоне 2 на глубине 0,45...0,5 мм показал, наличие однородной мартенситной структуры (рисунок 17, б). На глубине 0,9...1 мм от поверхности в зоне 3 при подаче 100 мм/мин формируется смешанная мартенситно-перлитная структура с дисперсными включениями карбидов (рисунок 17, б).

В пятом разделе представлены результаты экспериментальных исследований ОТП широкого кольцевого участка ($l_{\text{кв}} > 4R_{\text{и}}$) в условиях движения инструмента по трем concentрическим окружностям с перекрытием 50% дорожек трения и верной траектории с применением жидкостного охлаждения тыльной стороны плоского образца. Оценка изменения микротвердости по ширине и глубине кольцевой поверхности, подвергнутой ОТП с траекторией движения инструмента по трем concentрическим окружностям, выполнена с применением индекса равномерности твердости CU G. Самрана. Оценка индекса равномерности твердости CU осуществлялась для различных величин пороговой (требуемой) микротвердости H_{th} и глубины от поверхности по формуле

$$CU = 1 - \frac{W_t + W_{HAZ}}{W_{tot}} \quad (8)$$

На рисунке 18 показан пример оценки параметра CU применительно к пороговой микротвердости $H_{th}=500 \text{ HV}_{0,05}$ на глубине 200 мкм вдоль линии $I-I$ образца.

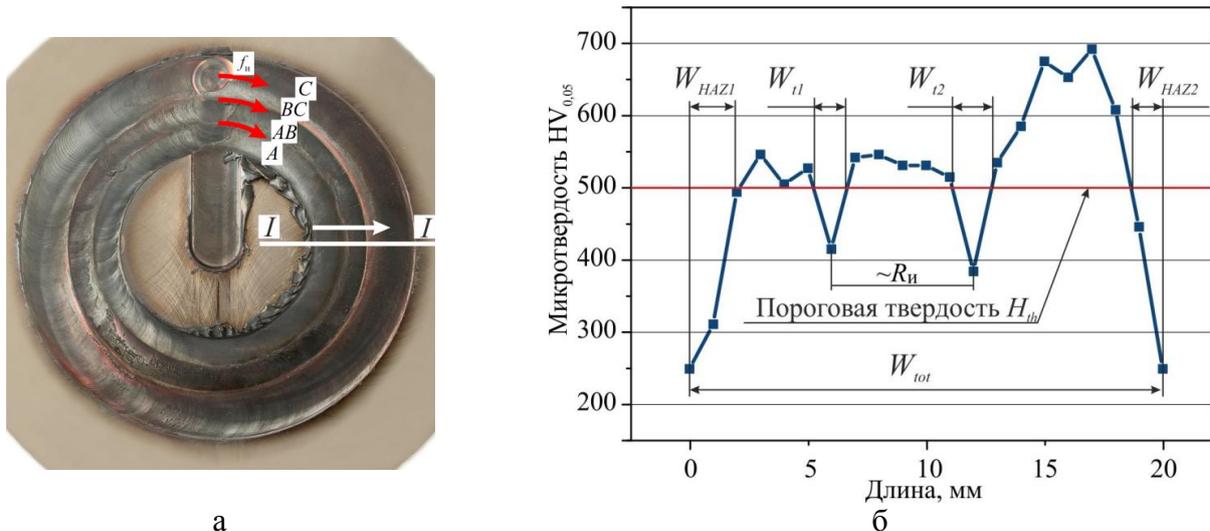


Рисунок 18 – Общий вид образца (а) и схема к оценке равномерности микротвердости по методу G. Самрана при пороговой величине $H_{th} = 500 \text{ HV}_{0,05}$ на глубине 200 мкм

Изменение теплового воздействия инструмента формирует вдоль линии $I-I$ длиной $W_{tot} = 20$ мм два участка $W_{t1} = 1,42$ мм и $W_{t2} = 1,65$ мм с провалами твердости на расстоянии, равном примерно $R_{\text{и}}$, которые соответствуют зонам отпуска, установленным при КЭМ. Общая длина данных участков $W_{t1} + W_{t2} = 3,07$ мм. Суммарная длина $W_{HAZ} = 3,45$ мм складывается из длин участков $W_{HAZ1} = 2,12$ мм и $W_{HAZ2} = 1,33$ мм, которые соответствуют зонам с низкой твердостью на верхней и нижней границе кольцевого участка. Таким образом, при пороговой твердости $H_{th} = 500 \text{ HV}_{0,05}$ на глубине 200 мкм индекс равномерности твердости $CU = 0,67$,

что показывает невозможность применения данной траектории движения инструмента при ОТП кольцевых участков.

Заготовка со сформированной по верной траектории кольцевой дорожкой и схемой вырезки образцов с участков А, В, С показана на рисунке 19, а.

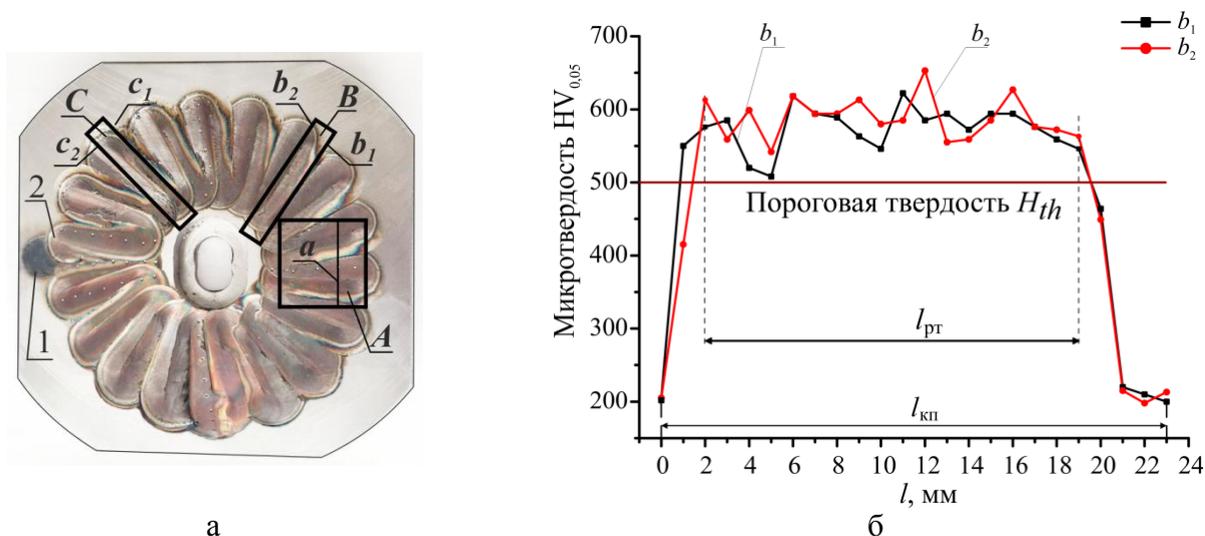


Рисунок 19 – Схема вырезания образцов (а) и график изменения микротвердости по ширине кольцевой поверхности на глубине 200 мкм (б) после ОТП при движении инструмента по верной траектории и охлаждении жидкостью тыльной стороны

На обработанной поверхности видны следы входа 1 и выхода 2 инструмента. Образец А разрезался по линии *a* для исследования микротвердости и микроструктуры по глубине поверхностного слоя. Образцы В и С вырезались для определения равномерности твердости в радиальном направлении по граням b_1 , b_2 , c_1 и c_2 . Результаты измерений по граням b_1 и b_2 показаны на рисунке 19, б. Установлено, что индекс равномерности твердости CU для заданной пороговой величины $500 HV_{0,05}$, соответствующей границе мартенситного превращения, при верной траектории движения инструмента и поддержании температуры заготовки 27 ± 2 °С жидкостным охлаждением с тыльной стороны образца в пределах ширины $l_{кп} = 24,5$ мм составляет $CU = 0,70 \dots 0,81$ и в пределах $l_{пр} = 17$ мм индекс равномерности $CU = 0,88 \dots 0,99$.

На образце А были проведены сканирующая, просвечивающая электронная микроскопия и рентгено-структурный анализ поверхностного слоя. На рисунке 20 показана SEM с микроанализом химического состава в тонком слое до 20 мкм, выделенном красным прямоугольником.

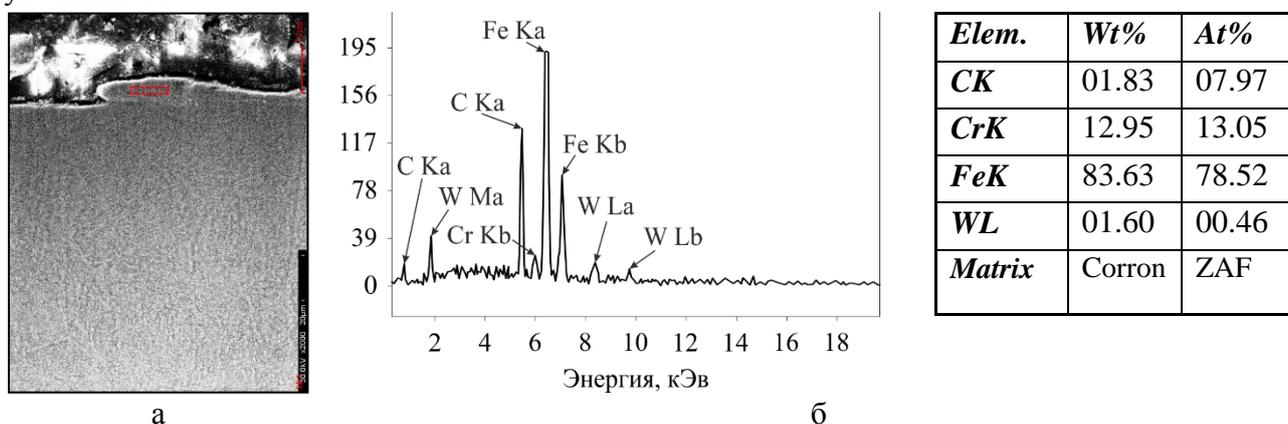


Рисунок 20 – Микроструктура (а) и химический состав (б) тонкого поверхностного слоя

Наблюдается переход в поверхность на глубину до 10 мкм 0,46 % вольфрама от нагретого инструмента, что связано с достижением температуры краснотойкости 1050...1100 °С и пластической деформацией кобальтовой связи.

Просвечивающая электронная микроскопия была выполнена на микроскопе JEOL JEM 200СХ. Фольги толщиной ~300 нм были отобраны непосредственно с обработанной поверхности а также на глубине 620 мкм и 5 мм от неё. Фольги, отобранные непосредственно с обработанной поверхности были подвергнуты одностороннему механическому и электрохимическому утонению в ортофосфорной кислоте с обратной стороны. Фольги, отобранные на глубине 620 мкм, утонялись аналогичным образом с двух сторон.

На снимках фольг, отобранных с поверхностного слоя, после фрикционной закалки образца с жидкостным охлаждением наблюдается дисперсная мартенситная структура с признаками высокой деформации (рисунок 21). По сравнению со структурой исходного материала, обработанный материал поверхности имеет более мелкие зерна, форма которых существенно изменяется. Межзеренные границы становятся изогнутыми и менее протяженными. Картины микродифракции приобретают кольцевой вид, что характерно для поликристаллических материалов.

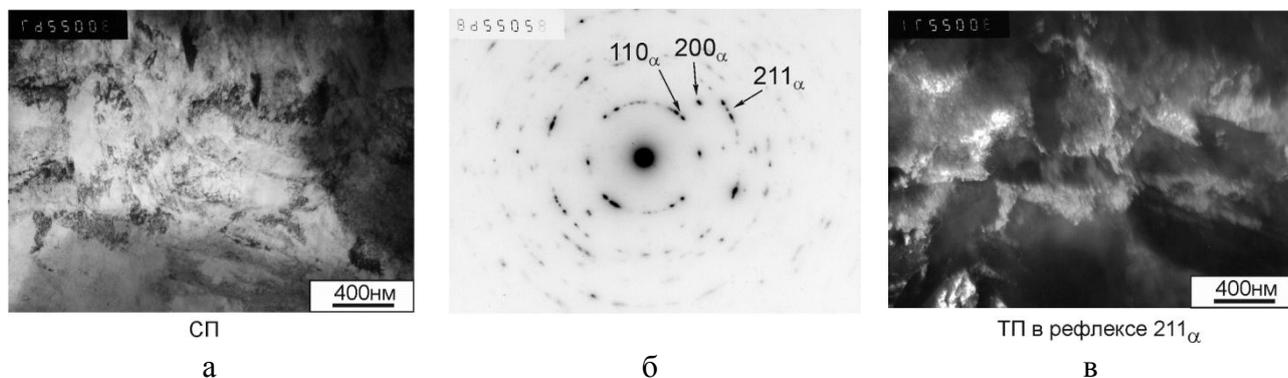


Рисунок 21 – Микроструктура материала после ОТП по верной траектории с применением ОЖ. Просвечивающая микроскопия поверхности

Рентгенографические исследования закалённого слоя на глубине ~450 мкм от поверхности после ОТП при движении инструмента по верной траектории и с жидкостным охлаждением были выполнены на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000. На характерном спектре, снятом в излучении Сг, ярко выражены пики, соответствующие линиям $(110)\alpha$, $(200)\alpha$ и $(211)\alpha$, что позволяет сделать вывод о том, что на данной глубине происходит формирование мартенсита различной степени тетрагональности (рисунок 22, таблица 3).

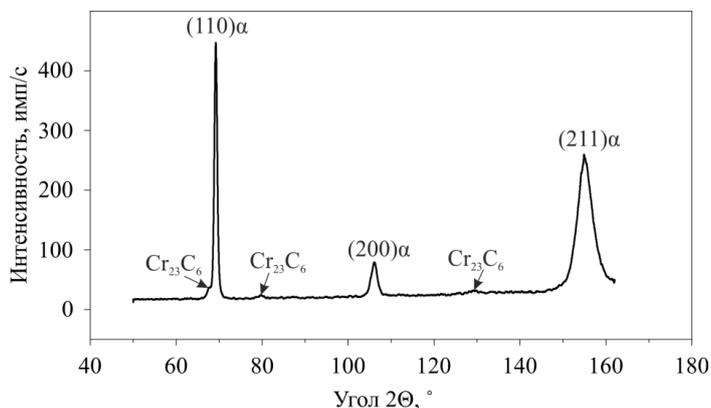


Рисунок 22 – Характерный спектр закалённого слоя на глубине 400 мкм в излучении Сг

Таблица 3. Параметры решетки закалённого слоя на глубине 400 мкм

Линия	$2\theta, ^\circ$	$B, ^\circ$	$d, \text{Å}$	$a, \text{Å}$
(110) α	69,1741	0,6435	2,0168	2,8522
(200) α	106,2045	0,5106	1,43158	2,8632
(211) α	156,5930	0,9982	1,16916	2,8638
$2\theta, ^\circ$ – положение максимума, град.; $B, ^\circ$ – интегральная ширина линии, град.; d – межплоскостное расстояние, Å; a – параметр решетки, Å.				

Кроме того, на характерном спектре прослеживаются относительно малые пики, соответствующие неметаллическим включениям Cr_{23}C_6 . Это говорит о том, что в процессе ОТП с веерной траекторией движения инструмента температуры нагрева и времени выдержки было недостаточно для того, чтобы карбиды хрома полностью растворились в образовавшемся аустените.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Разработаны обобщенная модель и алгоритм решения многофакторной задачи управления термическим циклом поверхностной закалки стали в процессе однопроходной ОТП и при упрочнении кольцевых участков шириной более двух диаметров инструмента с движением инструмента по концентрическим окружностям и веерной траектории.

2 Разработан комплекс конечно-элементных моделей процесса ОТП в пакете ANSYS Mechanical 2019 R3, позволивший установить оптимальные величины параметров нормальной силы $F_n=3500$ Н и частоты вращения инструмента $n=4000$ об/мин по критерию температуры нагрева стали 20X13 до 1000...1100 °С и величину подачи $f_n=100$ мм/мин, обеспечивающие при коэффициенте трения твердосплавного WC-Co инструмента с поверхностью $\mu=0,3...0,22$ скорость охлаждения 101,1 °С/с, время аустенизации 4,1 с и формирование мартенситной структуры на глубине от поверхности до 1 мм.

3 Разработан экспериментальный метод исследования температуры в контактной зоне и на глубине 0,5 мм в процессе ОТП образцов стали 20X13 и установлена взаимосвязь времени аустенизации и скорости охлаждения стали с подачами инструмента от 25 до 200 мм/мин при оптимальном механическом нагружении $F_n=3500$ Н, $n=4000$ об/мин. Установлено, что при подаче инструмента 100 мм/мин температура нагрева стали на глубине 0,5 мм достигает 1064 °С, время аустенизации 4,7 с и скорость охлаждения 123,8 °С/с и подтверждается формирование мартенситной структуры.

4 Установлено, что в процессе ОТП кольцевых участков с движением инструмента от центра к периферии последовательно по трем концентрическим окружностям с 50% перекрытием дорожек трения, в поверхностном слое возникают циклы трехкратного нагрева материала, приводящие на первой дорожке к среднему (~500 °С) и на второй к высокому (~620 °С) отпуску, что исключает формирование равномерной твердости.

5 Предложена и исследована веерная траектория движения инструмента, применение которой обеспечивает формирование стабильного теплового пятна с температурой в диапазоне от A_{C3} до 1000 °С, что позволяет исключить самоотпуск и обеспечить равномерное упрочнение по глубине поверхностного слоя и ширине участка с достижением индекса равномерности твердости $CU=0,78...0,99$.

6 Выявлено, что после ОТП с веерной траекторией движения инструмента на оптимальном режиме механического нагружения ($F_n=3500$ Н, $n=4000$ об/мин) при подаче $f_n=500$ мм/мин и в условиях поддержания температуры тыльной стороны образца ~27 °С за счет

применения теплоотводящей системы в поверхностном слое до глубины 400 мкм образуется мартенситная структура с различной степенью тетрагональности.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и

Аттестационным советом УрФУ:

1. Kuznetsov V.P. Effect of adhesion transfer on the surface pattern regularity in nanostructuring burnishing / V.P. Kuznetsov, S.Y. Tarasov, A.Y. Nikonov, **V.V. Voropaev**, A.I. Dmitriev // AIP Conference Proceedings 1783, 020128. – 2016. (0,38 п.л./ 0,1 п.л.) (Scopus)
2. Kuznetsov V.P. Finishing and Hardening of a Flat Surface Ring Area of a Workpiece by Rotary Burnishing / V.P. Kuznetsov, **V.V. Voropaev**, A.S. Skorobogatov // Key Engineering Materials. – Vol.743. – 2017. – pp. 245-247. (0,19 п.л./ 0,06 п.л.) (Scopus)
3. **Воропаев В.В.** Финишная технология обработки плоской поверхности фрикционным упрочнением и тонким фрезерованием на обрабатывающем центре / **В.В. Воропаев**, В.П. Кузнецов, А.А. Попов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – № 2 (41). – 2017. – С.165–169. (0,32 п.л./ 0,16 п.л.)
4. Кузнецов В.П. Исследование твердого течения наплавленной поверхности инструментом с замкнутой системой теплоотвода от сменной пластины / В.П. Кузнецов, А.С. Skorobogatov, **В.В. Воропаев**, А.А. Петунин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – № 2 (41). – 2017. – С.169–174. (0,38 п.л./ 0,1 п.л.)
5. Kuznetsov V.P. Research into Dry Turning of Welded Surface by Replaceable Cutting Insert with Closed Loop Heat Removal / V.P. Kuznetsov, A.S. Skorobogatov, A.A. Petunin, **V.V. Voropaev** // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1045: 012024. – 2018. (0,38 п.л./ 0,1 п.л.) (Scopus)

Патенты:

6. Инструмент для фрикционной поверхностной закалки детали : патент 197733 Рос. Федерация : МПК В24В 39/00 / Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Skorobogatov A.C., **Воропаев В.В.**, Кузнецов С.В. ; заявл. 26.02.2020 ; опублик. 25.05.2020, Бюл. № 15 – 4 с.
7. Способ упрочнения поверхности деталей обработкой трением с перемешиванием вращающимся инструментом : пат. 2595191 Рос. Федерация: МПК В24В 39/06 / Кузнецов В.П., Попов А.А., Горгоц В.Г., **Воропаев В.В.** ; заявл. 10.12.2014 ; опублик. 20.08.2016, Бюл. № 23 – 5 с.

Другие публикации:

8. Кузнецов В.П. Отделочно-упрочняющая обработка плоской кольцевой поверхности ротационным выглаживанием / В.П. Кузнецов, **В.В. Воропаев**, А.С. Skorobogatov // Высокие технологии в современной науке и технике. V Международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, Сборник трудов. – Томск : ТПУ. – 2016. – С.424–425. (0,13 п.л./ 0,05 п.л.)
9. Kuznetsov V.P. About hard turning of welded surface using tool with closed system of heat sink from replaceable flat / V.P. Kuznetsov, A.S. Skorobogatov, **V.V. Voropaev**, A.A. Petunin // Science and Technology publishing. Vol. 1. Issue 6. – 2017. P. 82–84. (0,38 п.л./ 0,1 п.л.)
10. Кузнецов В.П. Упрочнение поверхности скользящим индентором с различными схемами движения инструмента на обрабатывающем центре / В.П. Кузнецов, **В.В. Воропаев** // Высокие технологии в современной науке и технике. Сборник научных трудов VI

Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Томск : ТПУ. – 2017. С. 317–318. (0,13 п.л./ 0,1 п.л.)

11. **Voropaev V.V.** Impact of Friction Stir Processing Parameters on Forming the Structure and Properties in AISI 420 Steel Surface Layer / **Voropaev V.V.**, Kuznetsov V.P., Scorobogatov A.S., Barashova A.A. // XIX International scientific-technical conference “The Ural school-seminar of metal scientists-young researchers”. – KnE Engineering. – 2019. P. 158–162. (0,38 п.л./ 0,15 п.л.)

12. **Воропаев В.В.** Фрикционная поверхностная закалка хромистых сталей вращающимся инструментом / **В.В. Воропаев**, В.П. Кузнецов // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов : сборник тезисов докладов XXV Уральской школы металловедов-термистов. – Екатеринбург : УрФУ. – 2020. – С. 175–179. (0,38 п.л./ 0,2 п.л.)

13. **Воропаев В.В.** Влияние параметров фрикционной термомеханической обработки на формирование структуры и свойств поверхностного слоя стали 20X13 / **В.В. Воропаев**, А.С. Скоробогатов, А.А. Барабашова // Уральская школа молодых металловедов: сборник материалов XIX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых. – Екатеринбург : УрФУ. – 2018. – С. 51–56. (0,38 п.л./ 0,2 п.л.)