

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт новых материалов и технологий
Кафедра термообработки и физики металлов

На правах рукописи

ВОРОПАЕВ Владимир Валерьевич

**УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКОЙ
КОЛЬЦЕВЫХ УЧАСТКОВ СТАЛИ 20Х13 ПРИ ОБРАБОТКЕ
ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ**

05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Кузнецов Виктор Павлович

Екатеринбург – 2021

Содержание

Введение.....	5
1 Литературный анализ исследований поверхностной закалки конструкционных материалов методами локализованного теплового воздействия	12
1.1 Обзор исследований процессов однопроходной лазерной и плазменной поверхностной закалки	13
1.2 Проблемы поверхностной закалки при многопроходной обработке и выбор метода оценки равномерности твердости	20
1.3 Анализ возможностей поверхностной закалки сталей в процессе обработки трением с перемешиванием	28
Выводы по первому разделу	36
2 Обоснование выбора материала и обобщенной модели управления поверхностной закалкой в процессе однопроходной обработки трением с перемешиванием и при упрочнении кольцевых участков.....	37
2.1 Обобщенная модель и алгоритм решения многофакторной задачи управления термическим циклом поверхностной закалки в процессе однопроходной ОТП.....	39
2.2 Обоснование поверхностной закалки кольцевых участков в процессе ОТП при движении инструмента по концентрическим окружностям и веерной траектории.....	45
2.3 Обоснование охлаждения заготовки в процессе ОТП кольцевого участка при веерной траектории движения инструмента.....	49
Выводы по второму разделу	53
3 Конечно-элементное моделирование поверхностной закалки в процессе однопроходной ОТП и упрочнении кольцевого участка стали 20X13.....	55

3.1	Динамическая конечно-элементная тепловая модель поверхностной закалки и теплофизические данные обрабатываемого и инструментального материалов	55
3.2	Моделирование процесса ОТП на этапе предварительного разогрева материала.....	60
3.3	Конечно-элементное моделирование поверхностной закалки при однопроходной ОТП с прямолинейным движением инструмента.....	64
3.4	Конечно-элементное моделирование поверхностной закалки кольцевого участка стали 20X13 при движении инструмента по концентрическим окружностям.....	70
3.5	Конечно-элементное моделирование поверхностной закалки кольцевого участка стали 20X13 при движении инструмента по концентрическим окружностям.....	73
	Выводы по третьему разделу	80
4	Экспериментальные исследования термического цикла поверхностной закалки, микротвердости и структуры поверхностного слоя в процессе однопроходной обработки трением с перемешиванием....	82
4.1	Исследование закономерностей изменения коэффициента трения и состояния контактной поверхности на этапе разогрева материала.....	82
4.2	Исследование закономерностей изменения параметров термического цикла в зависимости от подачи инструмента при однопроходной ОТП.....	89
4.3	Исследование влияния подачи на микротвердость и микроструктуру поверхностного слоя при однопроходной ОТП	92
	Выводы по четвертому разделу	98
5	Экспериментальные исследования формирования микротвердости и структуры в кольцевых участках поверхностного слоя после ОТП. Внедрение технологии поверхностной закалки.....	100

5.1 Оценка равномерности микротвердости в кольцевом участке поверхностного слоя.....	100
5.2 Исследование микроструктуры в кольцевых участках стали 20X13 после ОТП с движением инструмента по веерной траектории.....	108
5.3 Внедрение технологии поверхностной закалки при изготовлении клиньев задвижек на обрабатывающем центре	112
Выводы по пятому разделу	116
Заключение	118
Список литературы	121
Приложение А	128
Приложение Б	129
Приложение В.....	131
Приложение Г	159
Приложение Д.....	161
Приложение Е.....	165

Введение

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 шибберных 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 Ajayi 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 вверной траектории.

5 Определить влияние охлаждения заготовки в процессе ОТП кольцевого участка стали 20X13 по вверной 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 верной траектории, которая обеспечивает стабильный нагрев обрабатываемого материала с температурой от АС3 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 верной 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 20Х13.

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 работ, из них 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 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.

1 Литературный анализ исследований поверхностной закалки конструкционных материалов методами локализованного теплового воздействия

В литературном обзоре проведен анализ теплофизических и материаловедческих основ управления процессами локализованной лазерной и плазменной поверхностной закалки и возможностей ее развития при обработке трением с перемешиванием (ОТП).

Рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования следующих основополагающих вопросов поверхностной закалки различных конструкционных материалов и, прежде всего, сталей типа 20Х13:

- влияние параметров и режимов локализованного теплового воздействия на термический цикл закалки и изменение микротвердости и структуры сталей и сплавов при обработке одиночными треками (проходами);
- определение требуемой плотности теплового потока, поглощенного материалом, для формирования мартенситной структуры;
- влияние диффузии углерода и скоростей нагрева, охлаждения, времени выдержки материала при температуре более A_{C3} ;
- влияние толщины изделий, теплопроводности материала и применение дополнительного охлаждения для обеспечения стабильного теплового состояния изделия в процессе движения источника тепла;
- обеспечение равномерности твердости на протяженных участках при различных траекториях движения теплового пятна и степени перекрытия предшествующих проходов в процессе многопроходной закалки;
- выбор способа оценки равномерности твердости после многопроходной поверхностной закалки;
- конечно-элементное моделирование процессов поверхностной закалки.

1.1 Обзор исследований процессов однопроходной лазерной и плазменной поверхностной закалки

Вопросам теории и конечно-элементного моделирования локальной поверхностной закалки с применением лазеров и плазмы посвящены работы – Григорьянца А.С., Mazumder J., Mahmoudi B., Hyungson Ki, Sangwoo So, Kovacevic R., Campana G., Короткова В.А., Сафонова Е.Н и др., в которых подробно исследована взаимосвязь технологических параметров процессов и траектории сканирования теплового пятна с термическим циклом и формированием структуры и свойств упрочняемых сталей и сплавов.

Методы лазерной и плазменной поверхностной закалки предполагают высокоскоростное термическое воздействие на материал с поддержанием температуры выше критической точки A_{C3} , а также высокой скорости охлаждения, обеспечивающие формирование мартенситной фазы [1].

Управление процессом однопроходной лазерной закалки осуществляется, прежде всего, такими технологическими параметрами, как мощность лазера, ширина импульса и скорость движения луча. В работе [2] исследовано влияние мощности, длительности воздействия и скорости движения луча импульсного лазера Nd:YAG на изменение твердости по глубине поверхностного слоя. Установлено, что при средней мощности лазера 300 Вт, ширине импульса 20 мс, диаметре теплового пятна 12 мм и скорости перемещения лазера 1,5 мм/с микротвердость в тонком поверхностном слое стали AISI 420В с исходной $200\text{ HV}_{0,1}$ увеличивается до $441\text{ HV}_{0,1}$. При этом плотность поглощенного теплового потока $q \cong 2,6\text{ Вт/мм}^2$. Толщина упрочненного слоя может составлять до 0,25 мм. Уменьшение диаметра лазерного пятна до 3 мм увеличивает плотность теплового потока до $q \cong 10,6\text{ Вт/мм}^2$. Влияние скорости сканирования на изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя приведено на рисунке 1.1. При уменьшении скорости сканирования лазера с 4 до 1 мм/с, наблюдается повышение микротвердости от 410 до $490\text{ HV}_{0,1}$ и увеличение глубины упрочненного слоя от 180 до 250 мкм.

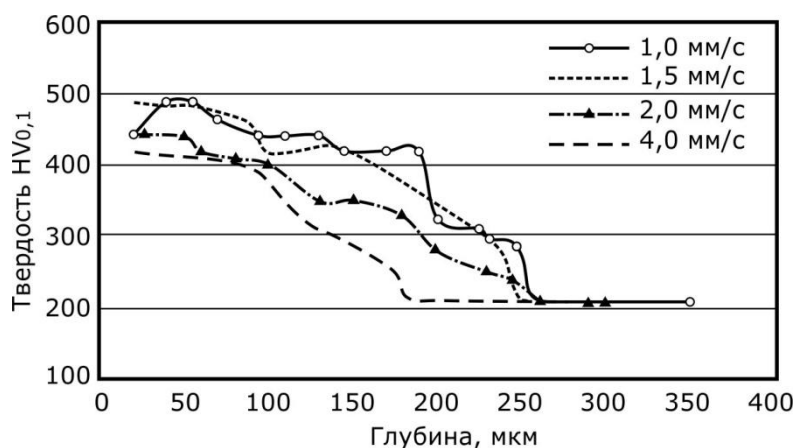


Рисунок 1.1 – Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя стали AISI 420В от скорости перемещения лазерного пятна

В работе [3] установлено, что при лазерной закалке образцов из стали 20ХЗНЗМФБА с уменьшением скорости движения лазера увеличивается толщина упрочненного слоя. При диаметре теплового пятна 3 мм, подаче 7 мм/с и мощности лазера 1100 Вт толщина упрочненного слоя на образцах достигает 0,38 мм. Установленный факт подтверждает результаты ранее выполненных работ А. Г. Григорьянца [4]. Действительно, уменьшение скорости движения луча лазера и увеличение мощности излучения приводят к росту геометрических размеров зон лазерного воздействия и уменьшению скорости охлаждения. Следствием этого является увеличение размеров зерен кристаллизовавшегося расплава и снижение микротвердости.

В работе [5] показано, что при лазерной закалке стали AISI 420 с мощностью лазера 350 Вт и скорости сканирования (подачи) 30 мм/с микротвердость на поверхности достигает величины 700 HV, вблизи поверхности формируется мартенситная структура и общая глубина упрочненного слоя составляет около 300 мкм. Однако снижение подачи до 15 мм/с приводит к расплавлению металла.

В работе [6] установлено, что при поверхностной закалке образца стали AISI 1020 толщиной 5 мм с использованием диодного лазера мощностью 3кВт температура материала поверхности между A_{C3} и плавления достигается при обеспечении интенсивности поглощенного образцом теплового потока от 7 до

52 Вт/мм². Также показано, что мощность теплового потока (удельная поглощенная мощность) и микротвердость обрабатываемого материала изменяются от времени воздействия (выдержки). Так, при времени воздействия 1 с она может составлять от 10 до 18 Вт/мм², и при 4 с, соответственно, от 5 до 10 Вт/мм² (рисунок 1.2).

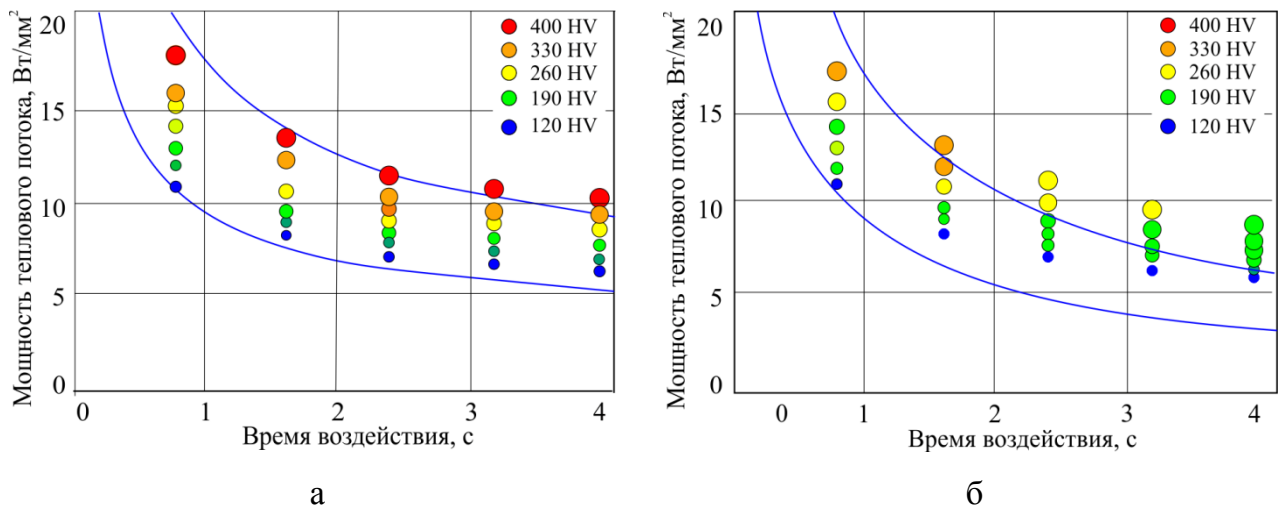


Рисунок 1.2 – Взаимосвязь удельной поглощенной мощности с микротвердостью стали AISI 1020, временем воздействия и толщиной заготовки 20 мм (а) и 5 мм(б).

Показано, что уменьшение толщины образца с 20 мм до 5 мм значительно снижает упрочнение из-за перегрева заготовки и ухудшения скорости охлаждения.

В работе [6] показано влияние мощности лазера на изменение микроструктуры в поверхностном слое образца стали AISI 1020 размером 150 мм x 80 мм x 35 мм. При мощности лазера 1,09 кВт и времени взаимодействия 2,3 секунды закалка не происходит. После термического воздействия фазовый состав поверхностного слоя состоит из феррита и перлита (рисунок 1.3). В то же время, при мощности лазера 1,68 кВт и аналогичном времени взаимодействия 2,3 секунды формируется мартенсит (рисунок 1.4, б). На рисунке 1.4 приведены микрофотографии структуры образца стали AISI 1020 и показаны увеличенные виды закаленной зоны А (а), переходной зоны В (в) и базовой зоны С исходной структуры стали (г).

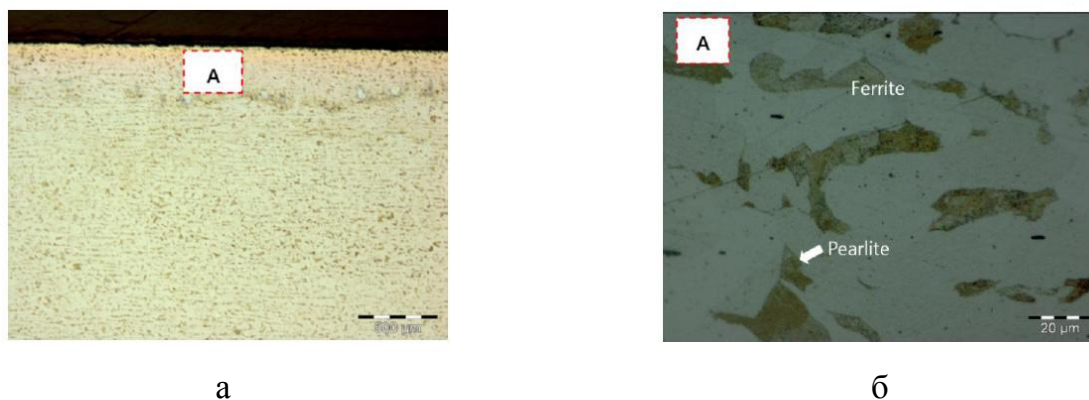


Рисунок 1.3 – Микрофотографии структуры образца AISI 1020 после поверхностной закалки лазером мощностью 1,09 кВт при времени взаимодействия 2,3 секунды (а) и увеличенный вид области А с феррит-перлитной структурой (б)

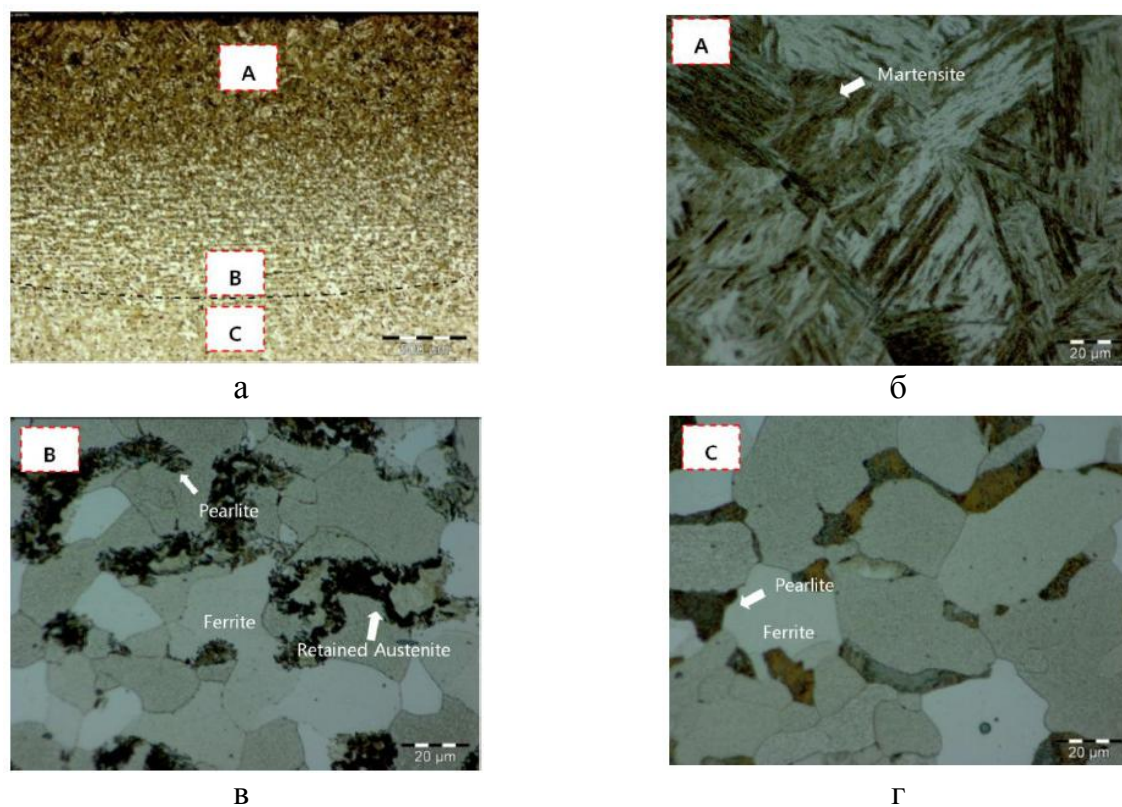


Рисунок 1.4 – Микрофотография структуры образца AISI 1020 после поверхностной закалки лазером мощностью 1,68 кВт при времени взаимодействия 2,3 секунды (а) и увеличенные виды закаленной зоны А (б), переходной зоны В (в) и базовой зоны С с исходной структурой (г)

Для упрочнения и повышения износостойкости деталей широко применяется плазменная закалка. Управление процессом плазменной закалки осуществляется силой тока дуги и скоростью перемещения плазмотрона. В

работе [7] показано увеличение твердости поверхностного слоя стали 70 до 877 HV и повышение износостойкости в несколько раз.

В работе [8] при упрочнении стали 20X13 плазменной закалкой ток дуги составлял 200 А, напряжение 49 В и скорость перемещения плазматрона 2,5 см/с. Микротвердость поверхностного слоя при этом достигает 650...700 HV на поверхности и 350...450 HV на глубине 0,8 мм. На глубине 1 мм металл имеет исходную микротвердость 250 HV.

Hyungson Ki и Sangwoo So в работе [9] представили аналитическую модель изменения температуры материала от мощности лазерного источника и времени нагрева и охлаждения (модель термического цикла). Принято допущение, что распределение интенсивности нагрева по тепловому пятну равномерно. Авторами для управления циклом нагрева и охлаждения в процессе лазерной закалки предложены параметры ECDT и ECT названные, соответственно эффективным временем диффузии углерода и эффективным временем охлаждения. Однако применение предложенных параметров взамен скорости нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения не представляется достаточно обоснованным. Установлено, что кроме интенсивности теплового воздействия и времени выдержки, важнейшими факторами поверхностной закалки являются диффузия углерода и скорость охлаждения. Для определения изменения коэффициента диффузии углерода от температуры в данной работе использовалась зависимость Агрена [10]:

$$D_c(T) = 4,53 \times 10^{-7} \left(1 + y_c (1 - y_c) \frac{8339,9}{T} \right) \times \exp \left[- \left(\frac{1}{T} - 2,221 \times 10^{-4} \right) (17767 - 26436 y_c) \right], \quad (1.1)$$

где $y_c = \frac{x_c}{1 - x_c}$, а x_c – мольная фракция углерода.

Однако зависимость (1) не позволяет рассчитывать величину коэффициента диффузии углерода в аустените для высоколегированных сталей. Коэффициент диффузии углерода в сталях с содержанием хрома $\leq 7\%$ может быть определен из табличных данных, приведенных в работе М.М. Криштала [11]. В качестве модели коэффициента диффузии углерода в железе и стали в

диапазоне температур от 975 до 1075 °С и концентрации углерода до 1,3 % в работе G.G. Tibbets [12] предложена эмпирическая зависимость $D = 0,47 \exp(1,6C) \cdot \exp[-(37000 - 6600C)/RT]$ см²/с. Показано, что значения коэффициента диффузии, определяемые по этой модели, имеют погрешность ±10 %. Основным источником погрешности является низкая скорость закалки. Анализ литературных источников показал, что для определения коэффициента диффузии углерода в сталях с высоким содержанием хрома наиболее подходит зависимость предложенная М.И. Гольдштейном и В.В. Поповым в работе [13]:

$$D_C = \exp[V_0 + \sum V_j C_j] \exp[-(Q_0 + \sum Q_j C_j)/(RT)], \quad (1.2)$$

где C_j – содержание j -ого элемента в стали, масс. %; коэффициенты $V_0 = -12,511$ м²/с; $Q_0 = 12560$ Дж/моль; $V_j = 0,17$ м²/с; $Q_j = 2710$ Дж/моль.

Коэффициенты в зависимости (2) определены в результате обработки многочисленных экспериментальных данных.

В работе [14] описан способ лазерной закалки поверхностного слоя пластин углеродистой стали DP 590 с использованием теплоотвода в виде радиатора, который установлен под упрочняемой пластиной толщиной 2 мм (рисунок 1.5).

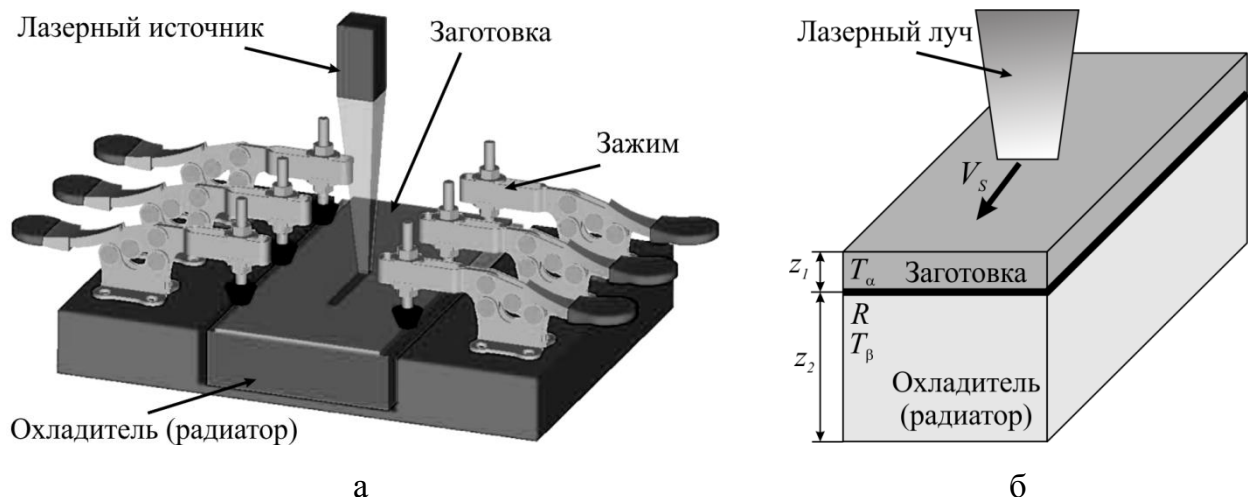


Рисунок 1.5 – Устройство лазерной закалки поверхностного слоя пластины с теплоотводом в виде радиатора (а) и схема для расчета теплового потока в радиатор (б)

Было исследовано влияние трех материалов радиатора: медь, нержавеющая сталь AISI 316, сталь. Тепловой поток в радиатор от закаливаемой пластины может быть определен по следующей зависимости:

$$Q = (T_{\alpha} - T_{\beta}) / \left(\frac{Z_1}{\lambda_1 A} + R + \frac{Z_2}{\lambda_2 A} \right), \quad (1.3)$$

где: T_{α} – температура заготовки, T_{β} – температура радиатора, Z_1 – толщина заготовки, Z_2 – толщина радиатора, R – сопротивление в контакте заготовки и радиатора, λ_1 и λ_2 – теплопроводности материала заготовки и радиатора, A – площадь в контакте заготовки и радиатора (рисунок 1.5, б).

Как видно из формулы (1.3), для увеличения теплового потока в радиатор необходимо уменьшить контактное сопротивление R и объемное сопротивление радиатора $R_p = \frac{\Delta Z_1}{\lambda_2 A}$ или уменьшить температуру радиатора T_{β} .

В работе представлены температурные истории лазерной закалки, которые приведены на рисунке 1.6 для трех типовых значений контактного сопротивления: 1) $R_1 = 5 \times 10^{-6}$; 2) $R_2 = 5 \times 10^{-5}$ и 3) $R_3 = 5 \times 10^{-4}$, $\text{м}^2\text{К/Вт}$, а также для поверхностной закалки пластин DP590 толщиной 5 и 20 мм без радиатора.

При увеличении контактного сопротивления R температурный профиль приближается к случаю отсутствия радиатора. При использовании медного радиатора температурный профиль может опуститься ниже случая толстой пластины, при этом скорость охлаждения выше, чем при обработке толстой пластины, даже если сопротивление теплового контакта существует.

Таким образом, если радиатор имеет более высокую теплопроводность (медь), чем обрабатываемый образец, а сопротивление теплового контакта невелико, можно обеспечить охлаждающую способность выше, чем при обработке толстой пластины.

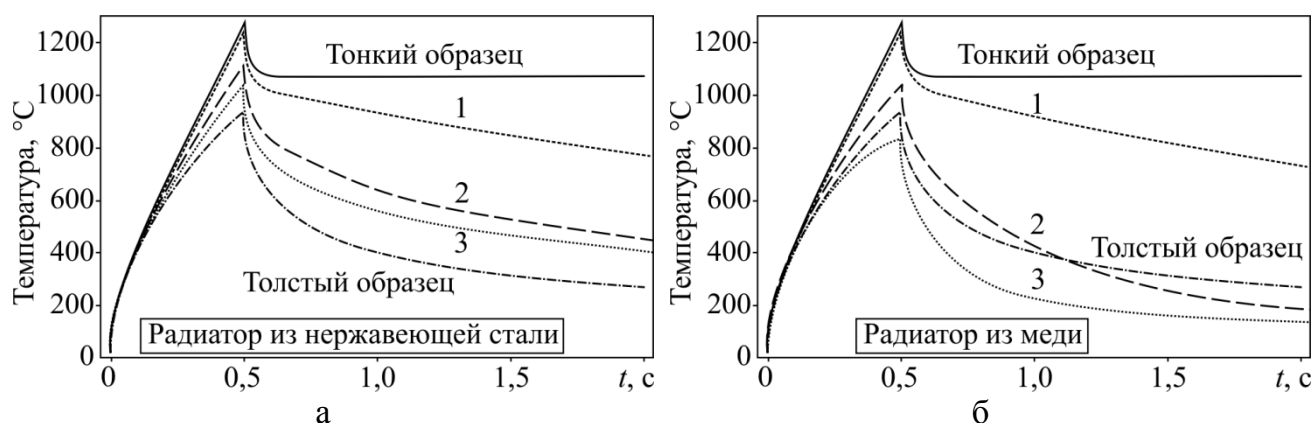


Рисунок 1.6 – Моделирование температурных истории в образце при лазерной закалке для контактных сопротивлений 1, 2, 3 и пластин толщиной 5 мм и 20 мм

Выявлено, что при использовании медного радиатора характеристики охлаждения и диффузии углерода находятся примерно на одном уровне с характеристиками при закалке пластин толщиной 20 мм. Использование теплоотвода в радиатор способствует повышению прокаливаемости стальных пластин.

В работе [15] выполнено, конечно-элементное моделирование лазерной закалки стали AISI 1045 при изменении параметров. Было определено влияние параметров лазерного воздействия, таких как мощность, скорость перемещения и размер лазерного пятна, на распределение температуры по поверхности и изменение глубины закалки при однократной обработке. Результаты показали, что мощность лазера и скорость перемещения являются основными параметрами, влияющими на упрочнение материала.

1.2 Проблемы поверхностной закалки при многопроходной обработке и выбор метода оценки равномерности твердости

Многопроходная лазерная закалка исследовалась методами конечно-элементного моделирования и экспериментально в работах [16 – 20]. Исследование поверхностной многопроходной лазерной закалки (MPLHT) прямоугольного участка поверхности для сплава AISI S-7 на основе моделирования в программном пакете ANSYS проведено в работе [16].

Исследовано изменение температуры в цикле нагрева и охлаждения с параметрами обработки: мощность лазера 1400...1800 Вт и скорость сканирования 15...25 мм/с. Лазерный луч принят как движущийся источник тепла прямоугольной формы (12 мм × 1 мм) с равномерным распределением поглощенной энергии. Исследовалась возвратно-поступательная траектория перемещения источника в прямоугольниках шириной 30 мм и высотой 10 мм, 20 мм, и 30 мм (рисунок 1.7).

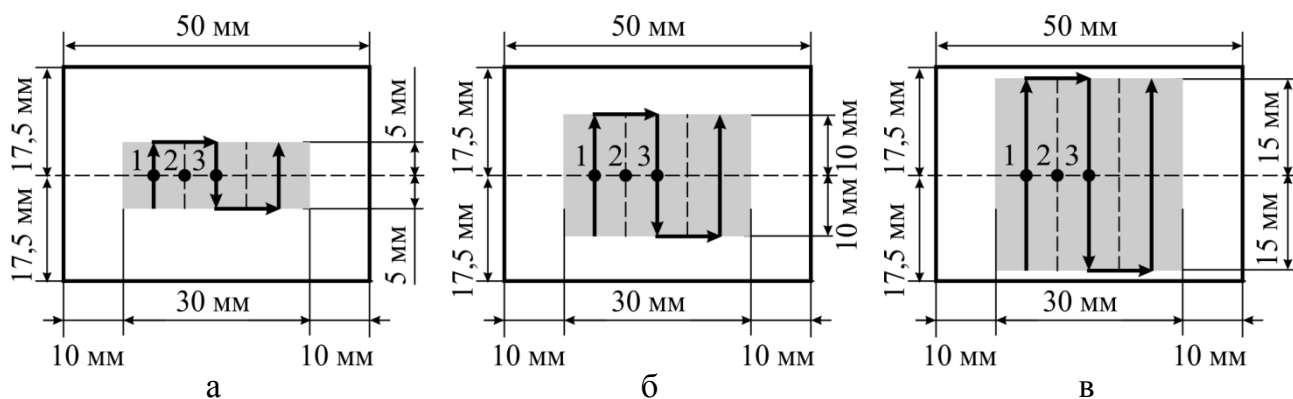


Рисунок 1.7 – Схемы траектории движения лазера с различными высотами зоны обработки: 10 мм (а); 20 мм (б); 30 мм (в)

Установлено, что если материал нагревается до температуры выше A_{C3} и выдерживается в течение нескольких секунд, то он полностью аустенизируется и в цикле охлаждения может быть преобразован в мартенсит. Для температур нагрева между A_{C1} и A_{C3} , достигается частичная аустенизация, а для температуры меньше A_{C1} аустенизации не происходит (рисунок 1.8).

Идея выбора траектории многопроходной лазерной закалки состояла в том, чтобы поддерживать температуру в областях перекрытия между A_{C1} и A_{C3} за счет тепла накопленного от предыдущего сканирования, что и позволяет обеспечить равномерную твердость материала (ΔH_{\min}). Накопленное тепло от предыдущего прохода использовано для того, чтобы завершить диффузию углерода и минимизировать влияние отпуска. В результате может быть достигнуто равномерное распределение твердости по всей обработанной зоне.

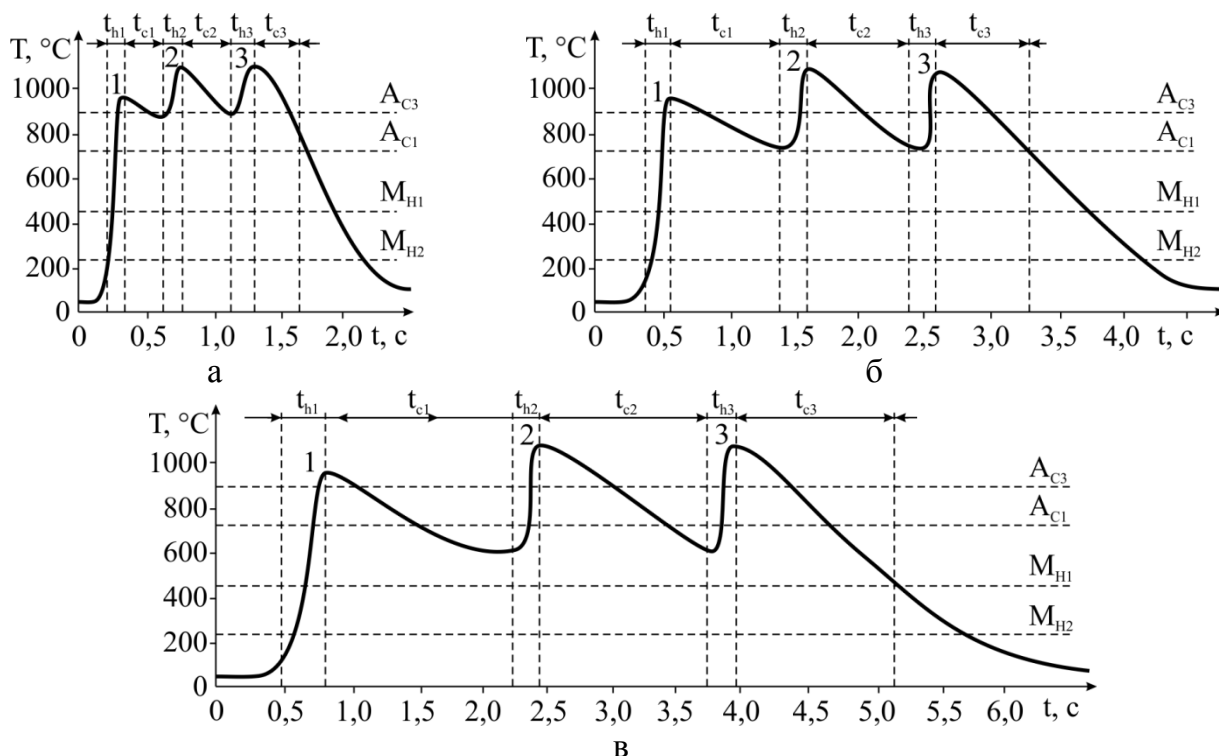


Рисунок 1.8 – Изменение температуры в точках 1, 2, 3 при движении лазерного источника в зоне обработки с высотой 10 мм (а); 20 мм (б); 30 мм (в)

Установлено, что температура в области перекрытия и температура отпуска линейно убывают с увеличением длины сканирования. Показано, что длительность цикла закалки, равная сумме времени многократного нагрева и охлаждения ($t_z = \sum t_{hi} + \sum t_{ci}$), увеличивается с увеличением длины перемещения источника нагрева. Это ставит вопрос о поиске оптимальной траектории перемещения теплового пятна.

Экспериментальное исследование температуры для подтверждения результатов моделирования термического цикла выполнено с помощью термопар на глубине 0,5 мм. Установлено, что расхождение результатов эксперимента и моделирования составило 3,59 %. Выявлено, что минимальное изменение микротвердости ΔHV по глубине зоны термической обработки достигается при длине сканирования 20 мм. (рисунок 1.9)

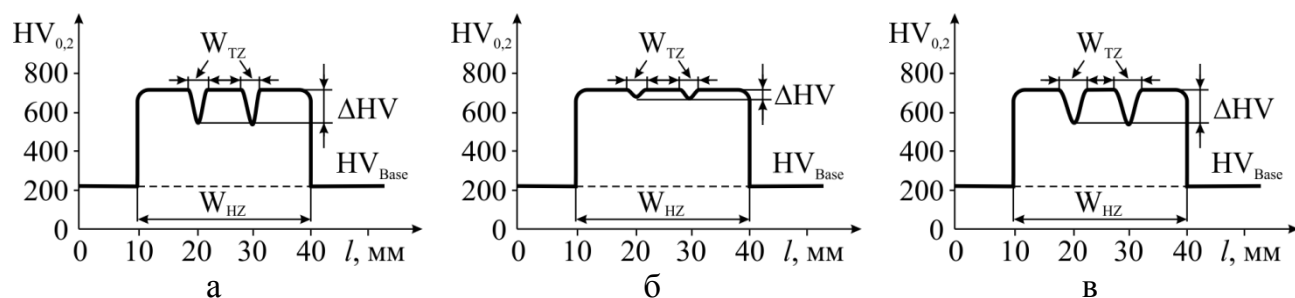


Рисунок 1.9 – Изменение микротвердости ΔHV в зонах отпуска W_{TZ} , расположенные по ширине упрочненной зоны W_{HZ} для траектории движения лазерного источника с высотой обработки 10 мм (а); 20 мм (б); 30 мм (в)

Таким образом, при поверхностной закалке могут быть найдены оптимальные параметры обработки, в том числе поглощенная мощность, скорость сканирования, размер перекрытия, и длина сканирования которые обеспечивают достижение равномерной твердости и глубины термически упрочненной зоны.

В работе [17] рассмотрены различные варианты траекторий для обработки лазером поверхности стали AISI 4140. Установлено, что наиболее равномерное упрочнение обеспечивает обработка по траектории с последовательными короткими отрезками.

В работе [18] отмечается, что повторный отпуск является одной из самых важных проблем лазерного упрочнения протяженных поверхностей. При закалке широкой поверхности несколькими лазерными треками дорожки перекрываются и получить равномерную упрочненную поверхность очень сложно. Из-за перекрывающихся закаленных зон при двухпроходной обработке на поверхности формируются области с неравномерной твердостью (рисунок 1.10). В этом случае неизбежно возникает тепловое взаимодействие между предыдущей и текущей зоной воздействия лазерного луча, которое приводит к отпуску и размягчению ранее закаленного участка. Это явление вызывает нежелательную неравномерность твердости поверхности.

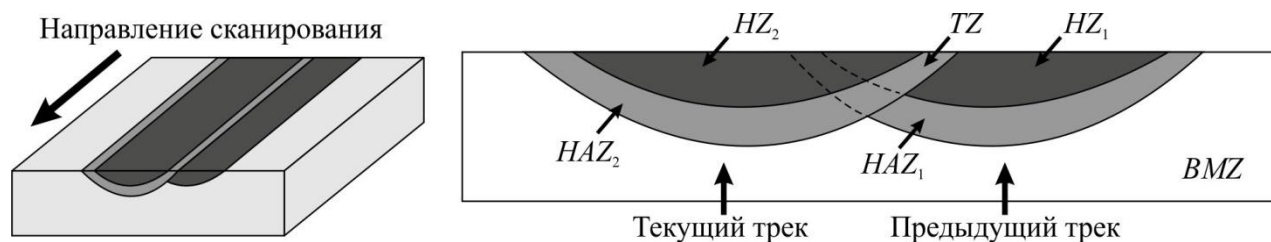


Рисунок 1.10 – Зоны микроструктурного состояния материала при двухпроходной лазерной закалке: HZ – закаленная зона (мартенситная микроструктура); HAZ – зона термического воздействия (максимальная температура нагрева ниже A_{C3}); TZ – зона отпущенного мартенсита (микроструктура с пониженной твердостью); BMZ – зона исходного материала

В работе [19] рассмотрен метод оценки равномерности твердости обрабатываемого материала при многопроходной лазерной закалке больших поверхностей, когда необходимо выполнить несколько смежных или перекрывающихся друг друга траекторий сканирования луча G. Самрана предложил промышленно применимый параметр – индекс равномерности твердости CU . В основе определения индекса CU лежит назначение порогового значения твердости H_{th} материала широкой закаливаемой поверхности, которое задается из различных технологических соображений. Например, величину H_{th} для случая закалки углеродистых сталей можно связать с процентным содержанием углерода.

В качестве порога твердости может быть принята величина микротвердости, соответствующая границе однородной мартенситной микроструктуры. После того, как пороговая величина H_{th} установлена, ее представляют в виде линии на графике изменения микротвердости по глубине в поперечном сечении упрочненной поверхности (рисунок 1.11).

Далее относительно линии H_{th} выделяются объемы высокой твердости (выше порогового значения) и низкой твердости (ниже порогового значения). В соответствии с предложенным подходом, индекс равномерной твердости определен следующим уравнением:

$$CU = 1 - \frac{W_t + W_{HAZ}}{W_{tot}}, \quad (1.4)$$

где W_t – ширина зоны отпуска, мм; $W_{HAZ}=W_{HAZ1}+W_{HAZ2}$ – суммарная ширина участков периферических зон термического влияния, мм; W_{tot} – ширина участка многопроходной закалки, мм.

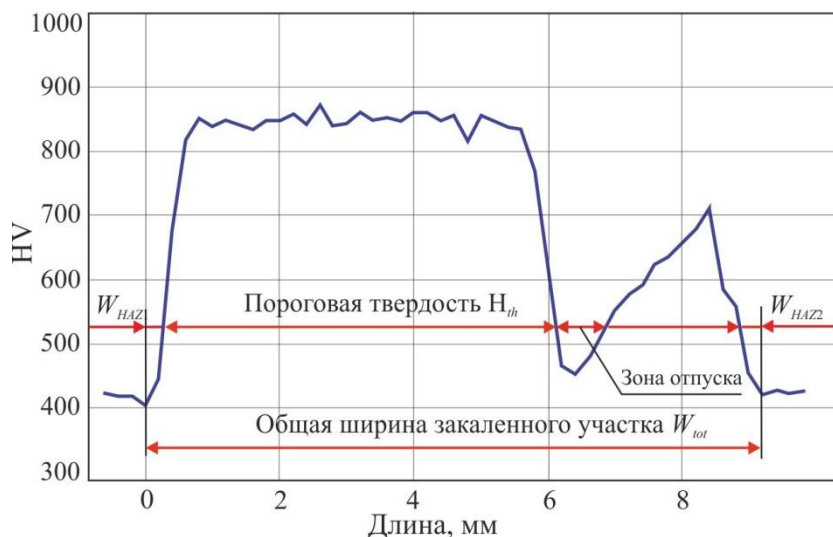


Рисунок 1.11 – Пример назначения пороговой твердости H_{th} и зон термического влияния при расчете индекса равномерной твердости CU на участке закалки шириной W_{tot} .

Отмечается, что величина CU напрямую связана со степенью отпуска, характерной для многопроходной лазерной закалки, и зависит от таких параметров процесса, как мощность лазер, скорость луча, размеры теплового пятна, степени поглощения и излучения теплом обрабатываемым материалом и его химическими и физическими характеристиками, а также стратегией сканирования (количество и последовательность переходов). Предполагается, что индекс равномерности твердости CU необходимо определять для нескольких пороговых значений H_{th} . Максимальное пороговое значение твердости может быть установлено при вычислении CU вблизи к обрабатываемой поверхности, а минимальное – для требуемой глубины упрочнения.

На рисунке 1.12 представлены профиль изменения микротвердости стали AISI 420B (30X13) для двухпроходной лазерной закалки с перекрытием 50%. Мощность лазера $P=1200$ Вт, скорость сканирования на первом проходе

0,5 м/мин и на втором 0,7 м/мин. Заданы два порога H_{th} , соответственно 600 HV_{0,1} и 500 HV_{0,1}, для которых $CU_{600}=0,62$ и $CU_{500}=0,84$.

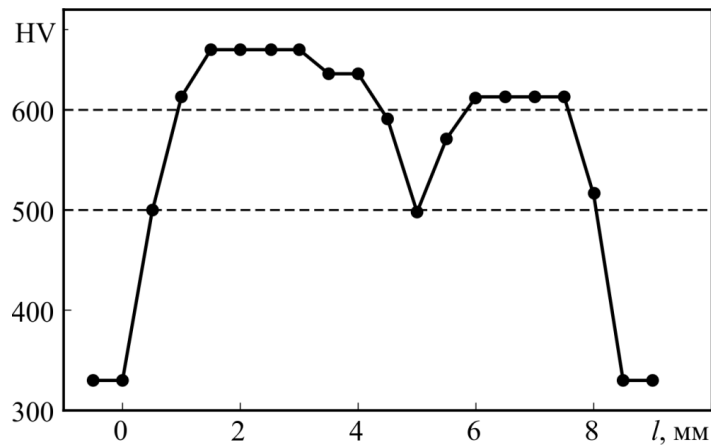


Рисунок 1.12 – Профиль изменения микротвердости стали AISI 420В для двухпроходной лазерной заправки с перекрытием 50 %.

В работе [20] исследована поверхностная заправка участка инструментальной стали ASSAB DF3 плазменной дугой при трех последовательных проходах с перекрытием 20% и без перекрытия (рисунок 1.13). Изменение микротвердости по глубине слоя и по ширине закаленного участка приведено на рисунке 1.14 (а) и (б).

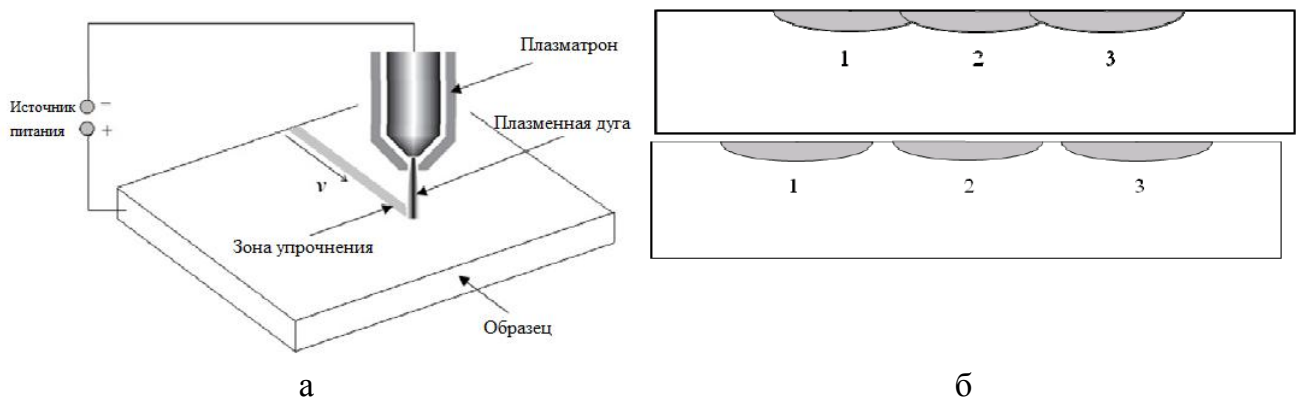


Рисунок 1.13 – Схема трехпроходной плазменной заправки участка инструментальной стали

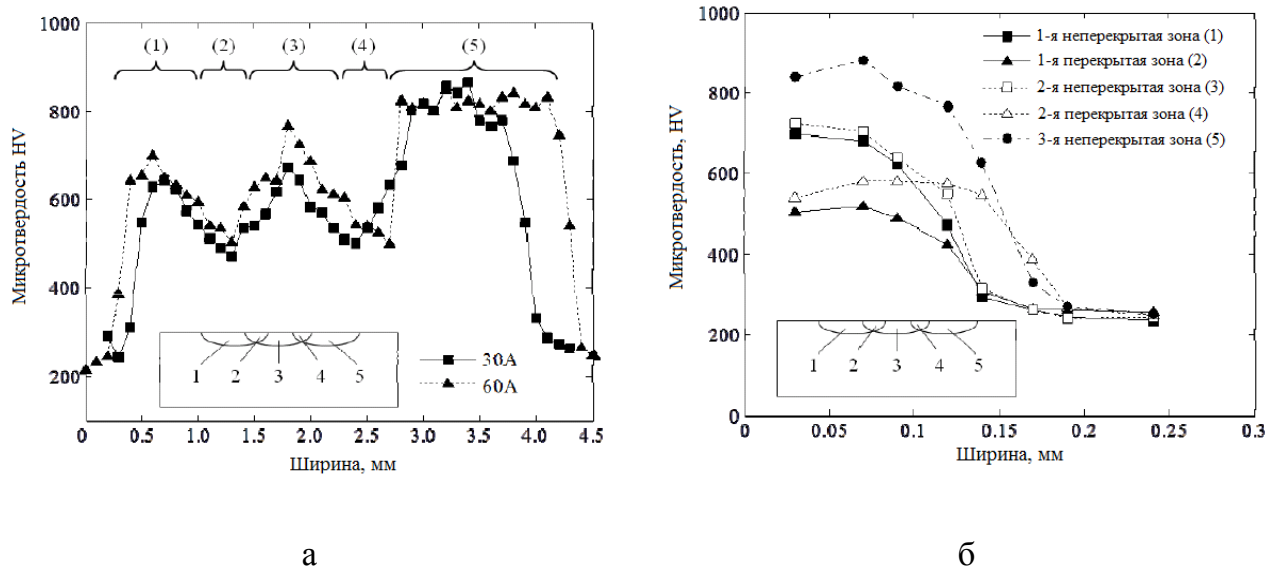


Рисунок 1.14 – Изменение микротвердости по ширине (а) и глубине (б) поверхностного слоя для двух режимов (30А и 60А) трехпроходной плазменной закалки с 20% перекрытием

Измерение микротвердости по ширине образца, закаленного с перекрытием 20 % при токе дуги 30 А и скорости сканирования 0,3 м/с, показало, что твердость материала в перекрытых участках, как правило, ниже. Так в центре зон 2 и 4 (рисунок 1.14, а) микротвердость ниже, чем в зонах 1 и 3 примерно на 250 HV. Это связано с тем, что на втором и последующих проходах образованная предыдущим проходом мартенситная структура в зоне перекрытия испытывает дополнительный нагрев. В результате нагрева мартенситная структура преобразуется в перлитную, твердость которой существенно меньше. Однако твердость неперекрывающихся областей увеличилась с более низкого значения ~700 HV в первом проходе к более высокому значению ~900 HV в последнем проходе. Это связано с повышенной температурой аустенизации в результате эффекта предварительного нагрева от более ранних проходов. Можно также отметить, что глубина упрочнения для заключительного прохода является наибольшим и на 0,05 мм выше по сравнению с первым проходом (рисунок 1.14, б).

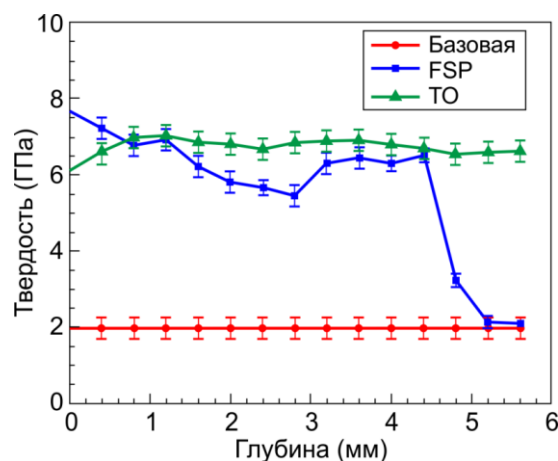
1.3 Анализ возможностей поверхностной закалки сталей в процессе обработки трением с перемешиванием

R.S. Mishra и др. в 2000 году разработали метод обработки трением с перемешиванием – friction stir processing (FSP) – для упрочнения поверхностей путем модификации микроструктуры. FSP является частным случаем технологии сварки трением с перемешиванием – friction stir welding (FSW). S. Dodds и др. в процессе FSP стали AISI 420 выявили эффект закаливания поверхностного слоя. В работе [21] выделены основные факторы, влияющие на формирование структуры и прочностных свойств поверхностного слоя: скорость вращения инструмента, подача и нормальная сила. Обработка трением с перемешиванием реализуется при упрочнении поверхностей медных, титановых и магниевых сплавов, углеродистых сталей, металлокомпозитов и др. [21]. Свойства формируемого поверхностного слоя после FSP зависят от конструкции и материала инструмента. В качестве материала инструментов для FSP часто используются инструментальные сплавы и композиты на основе вольфрама с добавлением рения (Re) [22], лантана (La) [23], карбидов вольфрама (WC) [24] и циркония (ZrC) [25], а также поликристаллического кубического нитрида бора (PCBN) [26], который имеет высокотемпературную прочность и твердость. Установлено, что погонный срок службы инструмента может достигать до 4 м [23]. Однако стоимость сплавов W-Re очень высока, а PCBN очень хрупок и сложен в обработке. На практике используются более надежные и доступные по цене инструментальные материалы, такие как WC и ZrC. К преимуществу твердосплавных инструментов относят высокую температурную прочность, высокую твердость, а к минусам износ в результате окисления при высоких температурах [27]. Наконечники инструмента, как правило, имеют коническую форму, форму пирамиды с различными впадинами и резьбовыми выступами [28]. Однако применение инструментов с наконечниками может привести к появлению внутренних дефектов, поэтому используют инструменты в виде плоскости с фаской [29] и полусферы [30].

В работе [31] представлено экспериментальное исследование использования технологии обработки трением с перемешиванием (ОТП/FSP) в качестве средства для закалки поверхностного слоя стали AISI 4140. По сравнению с обычной термообработкой ОТП обеспечила такой же уровень упрочнения и превосходные трибологические характеристики, используя только 10% энергии и не прибегая закалочным работам. При использовании ОТП в поверхностном слое толщиной до 1,0 мм была достигнута твердость 6,9 ГПа, в то время как после традиционной термической закалки на воду средняя твердость составила 6,1 ГПа (рисунок 1.15, б). Микроструктурный анализ показал, что как при ОТП, так и при обычной термической обработке в закаленном слое образуется мартенсит. Обработка производилась инструментом с радиусом инструмента 25 мм и высотой индентора 5 мм из РСВН (рисунок 1.15, а), при скорости вращения 275 об/мин, подаче 2 мм/с и усилии 45 кН. Для предотвращения окисления инструмента использовалась инертная среда аргона. Температура инструмента во время обработки составляла 940°C. Таким образом, ОТП можно рассматривать как один из методов поверхностной закалки стали AISI 4140.



а



б

Рисунок 1.15 – Фотографическое изображение торца инструмента (а) и твердость образцов AISI 4140 по глубине при различных вариантах упрочнения (б)

Важным критерием для оценки возможности применения метода поверхностной закалки является шероховатость полученной поверхности. В

работе [30] предложен частный случай реализации метода FSP – выглаживание трением с перемешиванием – friction stir burnishing (FSB). При обработке углеродистой стали 45 сферическими твердосплавными инструментами с радиусами 3, 5, 10, 30 мм, со скоростью подачи 200 мм/мин, нормальной силой 750 Н и скоростью вращения 10000 об/мин, шероховатость составила Ra 10...20 мкм. Нормальная сила задавалась при помощи специальной державки (рисунок 1.16). Данная державка способна обеспечивать задание сил не более 750 Н, что достаточно только для реализации процесса FSB. Поэтому для реализации процесса ОТП необходимо спроектировать державку, способную обеспечить нормальную силу до 3000 Н и более.

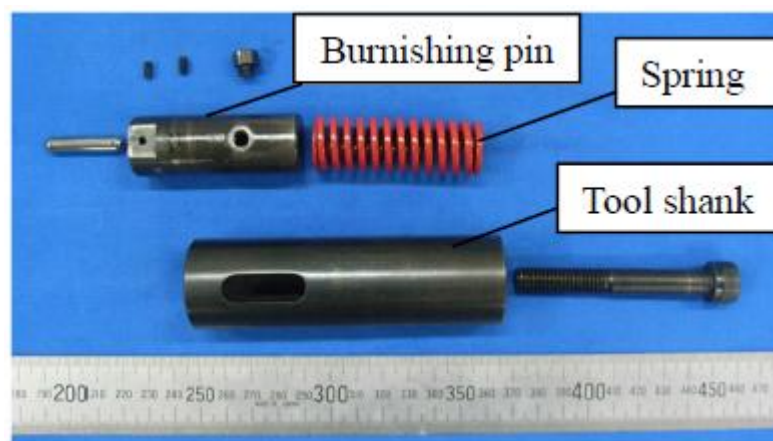


Рисунок 1.16. Специальная державка инструмента для задания нормальной силы в процессе FSB

Показано, что максимальная толщина упрочненного слоя может быть достигнута при минимальном радиусе инструмента. Микротвердость на глубине 400 мкм от поверхности достигла 600 HV, а на глубине 600 мкм микротвердость составила 300 HV, как и значения исходного материала. Установлено, что при уменьшении радиуса сферы шероховатость увеличивается.

В работе [32] показана обработка поверхности алюминиевых сплавов AA7022-T6 и AA5083-O несколькими проходами с различными коэффициентами перекрытия (рисунок 1.17). Установлено, что формирование структуры поверхностного слоя при FSP определяется траекторией и

направлением движения последовательных проходов инструмента, а также коэффициентом перекрытия. В данной работе рассматривались только алюминиевые сплавы, которые имеют высокую теплопроводность и поэтому эффект отпуска при повторном нагреве практически не происходит.

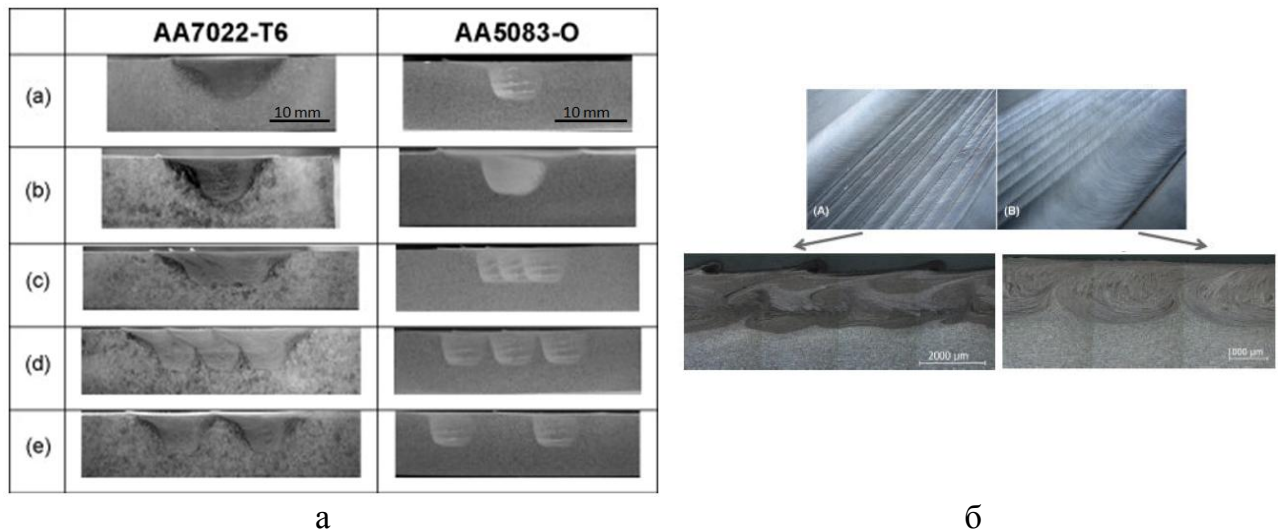


Рисунок 1.17 – Микро и макроструктура при многопроходной обработке алюминиевого сплава

В работе [33] применительно к ОТП поверхности углеродистой стали установлена взаимосвязь скорости вращения, подачи и нормальной силы с температурой в контактной зоне. Для определения температуры в зоне контакта используют инфракрасные пирометры [34], термопары [35] и конечно-элементное моделирование [36].

Результаты исследований ОТП стали AISI 420 (40X13) приведены в работе [37]. Установлено, что упрочнение поверхностного слоя достигается за счет формирования мартенситной структуры. Вокруг зоны перемешивания обнаружена зона термического воздействия, которая подвергается термическому циклу закалки, но не подвергается механической деформации во время FSP, микроструктура зоны термического воздействия приведена на рисунке 1.18. Однако в данном исследовании не установлена взаимосвязь структурных изменений с параметрами процесса и прежде всего, с изменением температуры в зоне обработки.

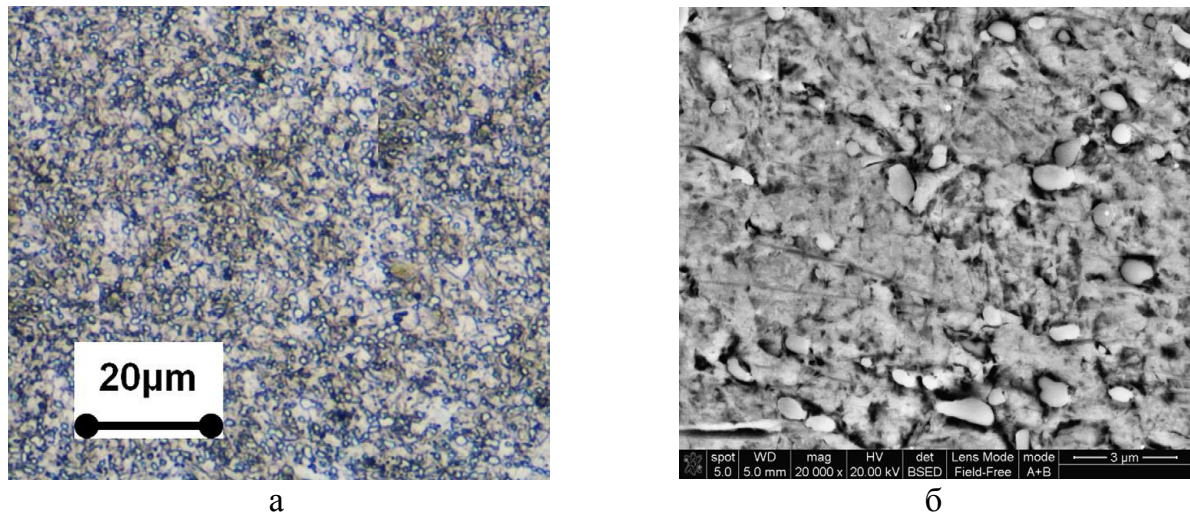


Рисунок 1.18. Оптическая (а) и электронная (б) микроскопия зоны термического воздействия стали AISI 420.

В работе [38] исследована микроструктура, микротвердость и коррозионная стойкость после ОТП нержавеющей стали AISI 420 (40X13) при различных подачах 150, 200 и 250 мм/мин. Установлено, что глубина и ширина закаленной зоны уменьшаются по мере увеличения подачи за счет снижения температуры. Наибольшая микротвердость $697 \text{ HV}_{1,0}$ получена на поверхности по центру дорожки при режимах обработки: $n=2000$ об/мин; $F_n=20$ кН и $f=150$ мм/мин. Также установлено, что коррозионная стойкость в растворе NaCl 3,5 мас. % при 25 °С у образцов, обработанных трением с перемешиванием, выше, чем у образцов, закаленных традиционным способом.

Конечно-элементное моделирование процессов FSP/W инструментом с плоским торцом для прогнозирования тепловых реакций материала рассмотрено в работах [39, 33].

В работе [39] контакт между инструментом PCBN (поликристаллического кубического нитрида бора) диаметром 15,24 мм и листами из нержавеющей стали 304L толщиной 3,18 мм, шириной 31,75 мм и длиной 76,2 мм в процессе FSW смоделирован в пакете ANSYS® с использованием контактной пары CONTA174 (заготовка) и TARG170 (инструмент). При моделировании тепловыделения коэффициент трения изменялся в диапазоне от 0,4 до 0,2. Константа FHTG принималась равной 1, что соответствовало преобразованию

всей энергии трения в тепло. Константе FWGT, учитывающей распределение тепла, присваивалось значение 0,95. Столь высокое значение FWGT подразумевает, что большая часть вырабатываемой тепловой энергии трения (95 %) поглощается заготовкой и только 5 % – инструментом. Моделирование изменение температуры инструмента и заготовки в процессе сварки представлена на рисунке 1.19.

Для создания геометрической модели заготовки и инструмента использовался элемент Solid 226 для сопряженных расчетов (couple-field) с конструктивно-термической опцией. Выбиралась гексаэдрическая сетка, имеющая в общей сложности 22257 узлов и 6765 элементов.

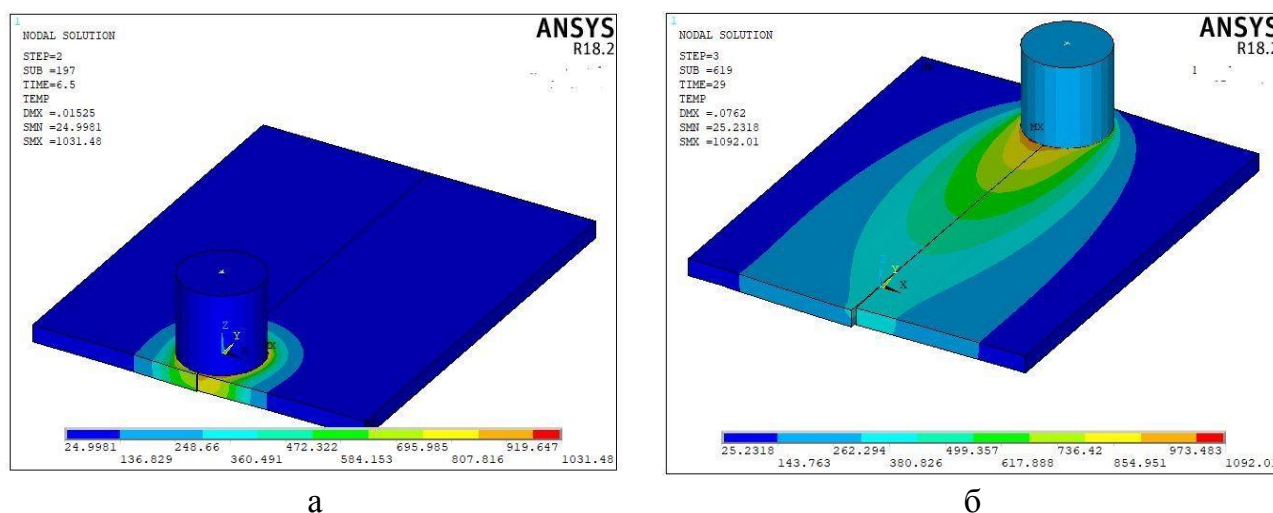


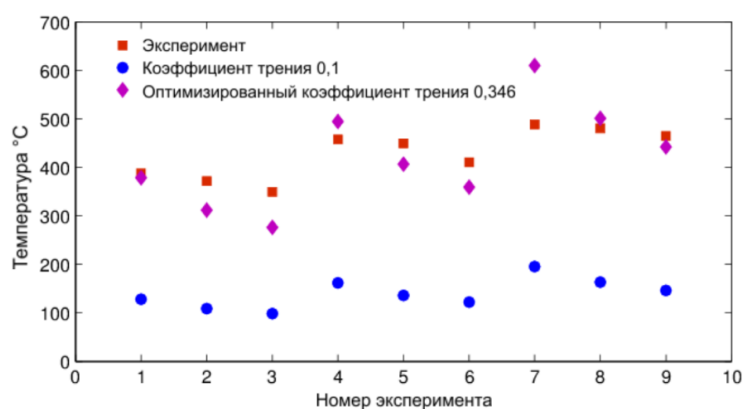
Рисунок 1.19. Изменение температуры инструмента и заготовки при разогреве 6,5 с (а) и 29 с (б).

В работе Folea M. [33] представлена трехмерная модель теплообмена в процессе FSP стали AISI 1045 следующего состава (масс. %): 0,45 C; 0,75 Mn; 0,04 P; 0,05 S и Fe. Образец заготовки представлял собой плиты размером 160 x 60 x 10 мм. Использовался бесштифтовый инструмент цилиндрической формы с диаметром 8 мм. Разработан численный обратный метод оценки кулоновского коэффициента трения μ , сочетающий в себе экспериментальные испытания, моделирование методом конечных элементов и оптимизацию. Исследовано влияние скоростей перемещения, вращения и нормальной силы инструмента на время обработки и распределение температуры, которая

контролировалась инфракрасной камерой за движущимся инструментом. На рисунке 1.20, а представлены расчетные значения температуры при различных режимах обработки, и на рисунке 1.20, б представлено сравнение значений температуры, полученные экспериментальным методом и расчетным при двух коэффициентах трения 0,1 и 0,346.

№ эксперимента	Нормальная сила, кН	Подача, мм/мин	Время обработки, с	Температура, °С
1	900	30	160	388
2		50	96	372
3		70	68,6	350
4	120	30	160	458
5		50	96	450
6		70	68,6	411
7	150	30	160	489
8		50	96	481
9		70	68,6	465

а



б

Рисунок 1.20 – Расчетные значения температуры при различных режимах (а) и сравнение значений температуры (б).

В работе используется подход, при котором система координат фиксируется на оси инструмента. После выполнения преобразования координат задача теплопередачи становится стационарной задачей конвекции и проводимости, которую далее моделировали в программном пакете COMSOL multiphysics. Однако это предположение не учитывает при моделировании влияние теплообмена в зоне контакта и заготовки. Сравнительный анализ результатов численного моделирования и экспериментальных исследований температуры позволили выявить величину кулоновского коэффициента трения μ для различных сочетаний технологических параметров процесса FSP. Изменение коэффициента трения μ в контакте твердосплавного индентора из материала K10 (BK6) и поверхностного слоя стали AISI 1045 при моделировании процесса задавалось в пределах 0,1...0,45. В результате

сравнения температурных историй в материале, полученных при экспериментальных исследованиях, и КЭМ процесса методом обратного отсчета определено, что для подачи 30 мм/мин, силы $F=1500$ Н и частоты вращения инструмента 2000 об/мин коэффициент трения $\mu \approx 0,346$.

Kumar Thimmaraju Pavan и др. [40] представили трёхмерную конечно-элементную термомеханическую модель сварки трением с перемешиванием, построенную в ANSYS с использованием APDL. В качестве основного тезиса авторы выдвигают то, что для точного расчёта температурно-деформированного состояния необходимо совместно учитывать влияние разогрева на деформационное поведение материала и наоборот влияние тепловыделения при деформировании материала на общее температурное поле. Для этого авторами был выполнен нелинейный анализ взаимосвязи теплового и механического поведения материала. Описанная модель позволила авторам провести анализ влияния различных технологических параметров процесса на распределение температуры и остаточных напряжения в заготовке. К сожалению, данная нелинейная модель требует высокие вычислительные мощности для обеспечения хорошей сходимости в процессе симуляции.

Фрикционная закалка при обработке трением с перемешиванием вращающимся инструментом с плоским или полусферическим торцом имеет общую схему нагрева материала тепловым пятном с методами лазерного и плазменного упрочнения. Эффект упрочнения перемешиванием при этом остается, но имеет место только в тонком подповерхностном слое.

В настоящее время научного обоснования поверхностной закалки в процессе ОТП практически не существует. Отсутствуют сведения о совокупном влиянии технологических параметров (нормальной силы, коэффициента трения, скоростей вращения и подачи инструмента) и траектории движения инструмента на термический цикл закалки материала поверхностного слоя. Реализация закалки в процессе ОТП на обрабатывающих центрах позволит упрочнять сложные локализованные поверхности, например кольцевые.

В результате обзора литературных источников была сформулирована цель диссертационного исследования: научное обоснование закалки и формирования равномерной твердости кольцевых поверхностей при ОТП изделий из стали 20X13 цилиндрическим твердосплавным инструментом с плоским торцом на основе КЭМ, экспериментальных исследований процесса, эволюции коэффициента трения, микроструктуры и микротвердости упрочняемого слоя.

Выводы по первому разделу

Литературный обзор показал, что для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1 Разработать теоретический подход к управлению термическим циклом поверхностной закалки в процессе однопроходной ОТП и упрочнения кольцевых участков стали 20X13 твердосплавным инструментом с плоским торцом на основе установления взаимосвязи температуры нагрева, времени аустенизации и скорости охлаждения материала с технологическими параметрами процесса и коэффициентом трения.

2 Установить закономерности изменения температурно-временных параметров термического цикла поверхностной закалки в процессе однопроходной ОТП и при движении твердосплавного инструмента по концентрическим окружностям и веерной траектории при упрочнении кольцевых участков стали 20X13.

3 Выявить закономерности изменения микротвердости и микроструктуры в поверхностном слое кольцевых участков в процессе ОТП.

4 Исследовать эволюцию микроструктуры и равномерности микротвердости в пределах кольцевого участка в процессе ОТП образцов из стали 20X13 в состоянии поставки при движении инструмента по веерной траектории с поддержанием стабильной объемной температуры путем охлаждения тыльной стороны образца.

2 Обоснование выбора материала и обобщенной модели управления поверхностной закалкой в процессе однократной обработки трением с перемешиванием и при упрочнении кольцевых участков

Во втором разделе обоснованы выбор обрабатываемого и инструментального материалов и теоретический подход к управлению термическим циклом поверхностной закалки в процессе ОТП одиночных и широких кольцевых дорожек. Обрабатываемым материалом при исследованиях фрикционной поверхностной закалки была выбрана мартенситная нержавеющая сталь 20X13, которая является аналогом стали AISI 420. Последняя применялась ранее в исследованиях трансформационной поверхностной лазерной закалки, а также при упрочнении методом FSP и 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 задвижек. Пример клиновой задвижки с условным проходом DN 50 мм и номинальным давлением PN 6,3 МПа приведен на рисунке 2.1, а. Упрочняемые кольцевые поверхности клина 1 и контактные поверхности седла 2 показаны на рисунках 2.1, б, в.

Требования к поверхностному упрочнению клина приведены на рисунке х. Образцы для экспериментальных исследований в виде дисков диаметром 100 мм и толщиной 15 мм были получены из круглого прутка стали 20X13 в состоянии поставки. Химический состав определялся с помощью эмиссионного МСАП V5 и приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Химический состав стали 20X13 в состоянии поставки

C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
0,2	0,4	0,28	12,2	0,53	0,1	0,027	0,003

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.

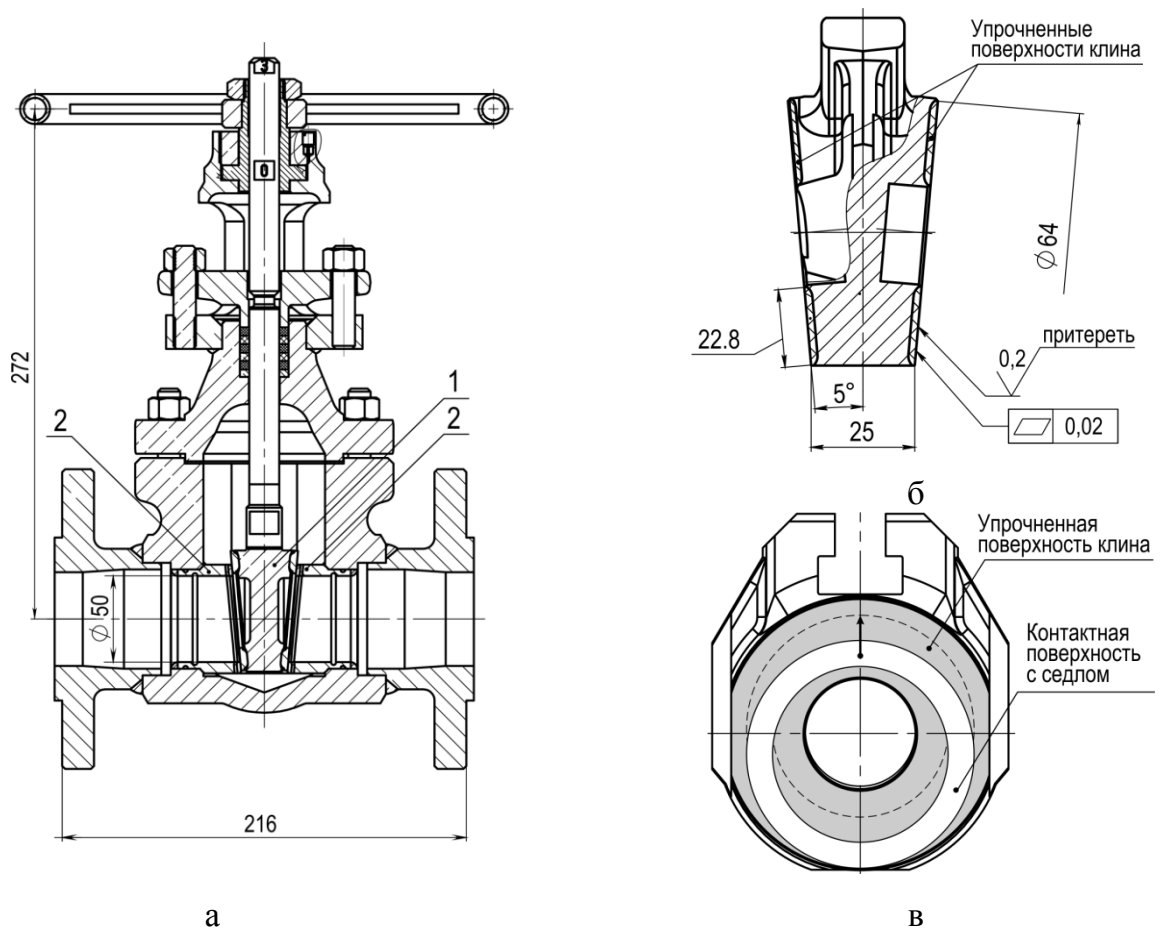


Рисунок 2.1 – Задвижка с проходом DN 50 мм и номинальным давлением PN 6,3 МПа с клином 1 и седлами 2 (а) и упрочняемые кольцевые поверхности клина (б) и контактная поверхность с седлом (в)

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 20Х13 использовался твердосплавный инструмент из мелкозернистого сплава KMG303 фирмы ZCC СТ (Китай) типа WC-Co диаметром 10 мм с плоским торцом и фаской 0,5 x 45° с кратковременной тепловой стойкостью 1050 °С.

Для задания нормальной силы F_n при ОТП плоской поверхности заготовки на обрабатывающем центре была разработана и запатентована [41]

специальная инструментальная державка (рисунок 2.2), позволяющая осуществлять плавную настройку в диапазоне от 2 до 4 кН. Инструмент 1 закрепляется в державке 2 двумя винтами 3. Сила F_H задается путем сжатия пружины 4 винтом 5 и фиксируется винтом 6.

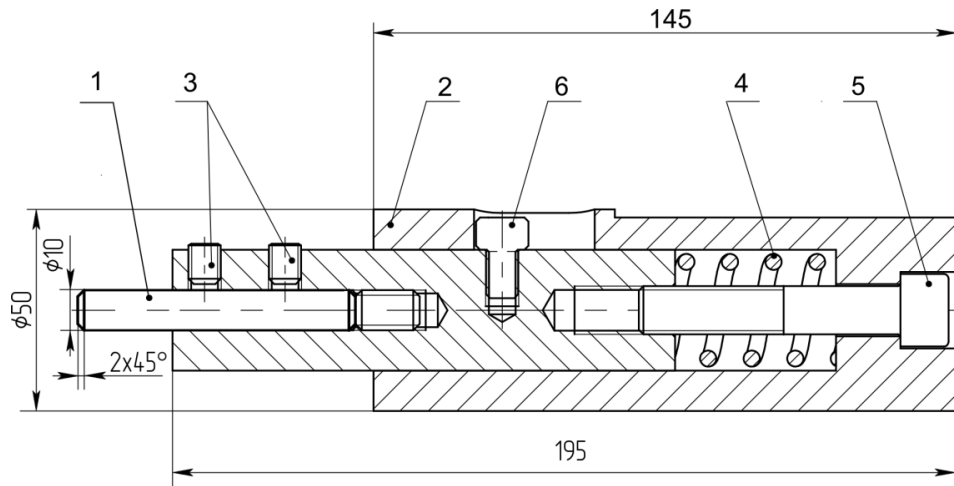


Рисунок 2.2 – Державка цилиндрического инструмента для реализации поверхностной заковки в процессе обработки трением с перемешиванием на станках с ЧПУ

2.1 Обобщенная модель и алгоритм решения многофакторной задачи управления термическим циклом поверхностной заковки в процессе однопроводной ОТП

В основу управления поверхностной заковкой в процессе ОТП инструментом с плоским торцом положен теоретический подход, основанный на составлении и поэтапном решении многофакторной задачи установления взаимосвязи параметров процесса и термического цикла:

1) определение требуемой мощности фрикционного тепловыделения P_{μ} , плотности теплового потока q_m и времени t_p , необходимых для разогрева материала до температуры $T_m > A_{C3}$ в зависимости от комбинации величин нормальной силы F_H , частоты вращения n и коэффициента трения μ в контакте инструмента (этап управления тепловыделением и разогревом);

2) выявление взаимосвязи температуры T_m и скорости нагрева $v_H = dT_m/dt$ материала, а также температурной выдержки t_y при $T_m > A_{C3}$ и глубины диффузии углерода h_D в поверхностный слой со скоростью подачи инструмента

$f_{ин}$, при которой происходит полная аустенизация и не допускается расплавление материала в контактной зоне (этап управления аустенизацией);

3) установление зависимости скорости охлаждения материала $v_{ох}$ от подачи инструмента $f_{ин}$, обеспечивающей при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении формирование мартенситной фазы на заданной глубине от поверхности (этап управления охлаждением).

Схема технологических и тепловых параметров процесса ОТП [42] и обобщенная модель управления термическим циклом поверхностной закалки во взаимосвязи параметров приведена на рисунке 2.3.

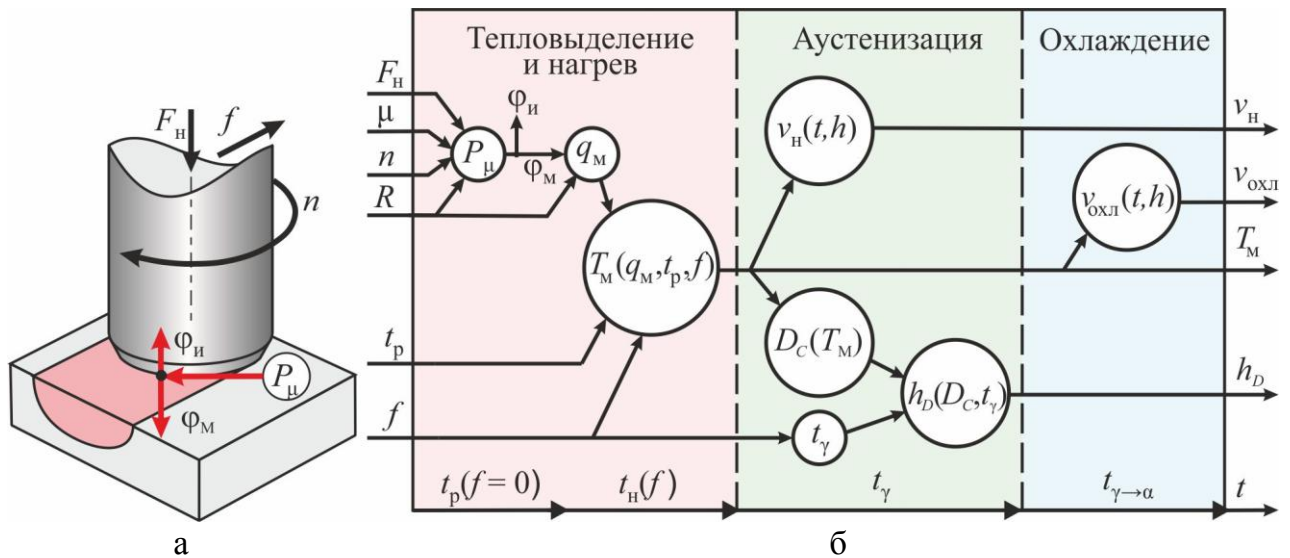


Рисунок 2.3 – Схема технологических и тепловых параметров процесса ОТП (а) и обобщенная модель управления термическим циклом поверхностной закалки (б)

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_H , 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 ($T_{ин}$) как при отсутствии подачи инструмента ($f_{ин}=0$), так и при движении с линейной скоростью f .

Мощность фрикционного тепловыделения P_μ в контакте цилиндрического инструмента с плоским торцом радиусом $R_{и}$ может быть определена по зависимости, предложенной в работе Ø. Frigaard [43]:

$$P_\mu = \frac{4}{3} \pi \mu F_n n R_{и}, \quad (2.1)$$

где μ – коэффициент трения, F_n – нормальная сила, Н; n – частота вращения инструмента, об/мин.

Плотность фрикционного теплового потока в обрабатываемый материал в случае равномерного распределения по пятну контакта площадью S_c может быть вычислена по зависимости

$$q_m = \frac{\eta_m P_\mu}{S_c} = \frac{\eta_m P_\mu}{\pi R_{и}^2}, \quad (2.2)$$

где η_m – коэффициент разветвления (доля) выделяемого тепла в заготовку;

Коэффициент разветвления теплового потока применялся в работах Х.Тian [44] и J.Rech [45] при исследовании скольжения торца цилиндрического пальца по поверхности диска. Коэффициент η_m с учетом теплового потока в инструмент и мощности тепловыделения может быть вычислен по следующей зависимости:

$$\eta_m = \frac{\Phi_m}{P_\mu} = 1 - \frac{\Phi_{и}}{P_\mu}, \quad (2.3)$$

где Φ_m и $\Phi_{и}$ – тепловые потоки, поглощаемые материалом и инструментом, соответственно.

Коэффициент η_m показывает долю тепловой мощности, отводимой в обрабатываемый материал, и также может быть определен при конечно-элементном моделировании процесса ОТП.

Время разогрева упрочняемого материала t_p определяется по достижению температурой нагрева T_m диапазона $A_{C3} \leq T_m < T_{си}$. Для выполнения этого условия возможно изменять три технологических параметра процесса (F_n , n и μ). Однако одновременно с поверхностной закалкой необходимо решать проблемы обеспечения красностойкости инструмента $T_m < T_{си}$ в формируемых дорожках трения, минимальной шероховатости, а также исключения отвалов разогретого

материала в процессе вращения инструмента. На основе результатов исследований, представленных в работе [30], для получения поверхности с минимальной шероховатостью в процессе ОТП инструментом с плоским торцом частоту вращения необходимо принимать максимально возможной, исходя из возможностей применяемого оборудования и поддержания температуры нагрева в указанном выше диапазоне изменения.

Выявить закономерности изменения температуры нагрева материала от частоты вращения инструмента n , нормальной силы F_n , коэффициента трения μ и подачи f_n по глубине поверхностного слоя можно методом конечно-элементного моделирования при установленных зависимостях теплопроводности инструментального и обрабатываемого материала от температуры. На основе проведенного литературного обзора установлено, что коэффициент трения μ в контакте твердосплавного инструмента WC-Co с конструкционной сталью следует принимать в диапазоне 0,2...0,3 [45]. Установление фактического значения коэффициента трения в зависимости от нормальной силы F_n и частоты вращения шпинделя n является весьма трудной задачей и требует применения специального оборудования.

Второй этап реализации обобщенной модели управления поверхностной закалкой предполагает определение температуры T_m и скорости нагрева v_n , времени аустенизации (выдержки) t_γ и глубины диффузии углерода h_D в зависимости от подачи инструмента f_n и коэффициента трения μ . Данные зависимости могут быть получены на основе анализа температурных вспышек $T_m = f(t, f_n, \mu)$ по глубине поверхностного слоя методом конечно-элементного моделирования и путем экспериментальных исследований процесса. Типовой характер температурной вспышки при ОТП, приведен на рисунке 2.4.

Основные параметры термического цикла (температурной истории) поверхностной закалки – время t_n и скорость нагрева $v_n = \operatorname{tg} \alpha_n = \frac{T_{\max} - T_{\text{исх}}}{t_n}$, время выдержки t_γ , а также время $t_{\text{охл}}$ и скорость охлаждения

$v_{\text{охл}} = \text{tg} \alpha_{\text{охл}} = \frac{T_{A_{R3}} - T_{MН}}{t_{\text{охл}}}$ – могут быть определены на основе графического

представления изменения температуры в обрабатываемом материале на этапах аустенизации и охлаждения (рисунок 2.4).

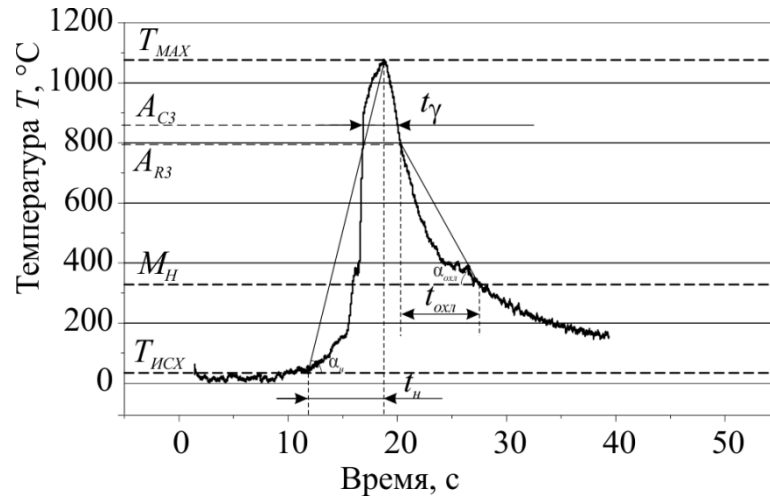


Рисунок 2.4 – Температурно-временные параметры термического цикла поверхностной закалки в процессе ОТП

Для решения многофакторной задачи управления процессом поверхностной закалки предложен алгоритм теоретического определения параметров термического цикла во взаимосвязи с технологическими параметрами ОТП (рисунок 2.5).

Предлагаемый алгоритм рассматривает три основных этапа поверхностной закалки, имеющих место в процессе обработки: 1 – предварительный разогрев при выстое инструмента для выхода на необходимый температурный режим, 2 – нагрев и выдержка обрабатываемого материала, в процессе которого происходит аустенизация и 3 – охлаждение материала, обеспечивающего мартенситное превращение. Предложенный алгоритм позволяет оценить возможность формирования закаленного поверхностного слоя с мартенситной структурой требуемой глубины при заданных технологических параметрах процесса ОТП.

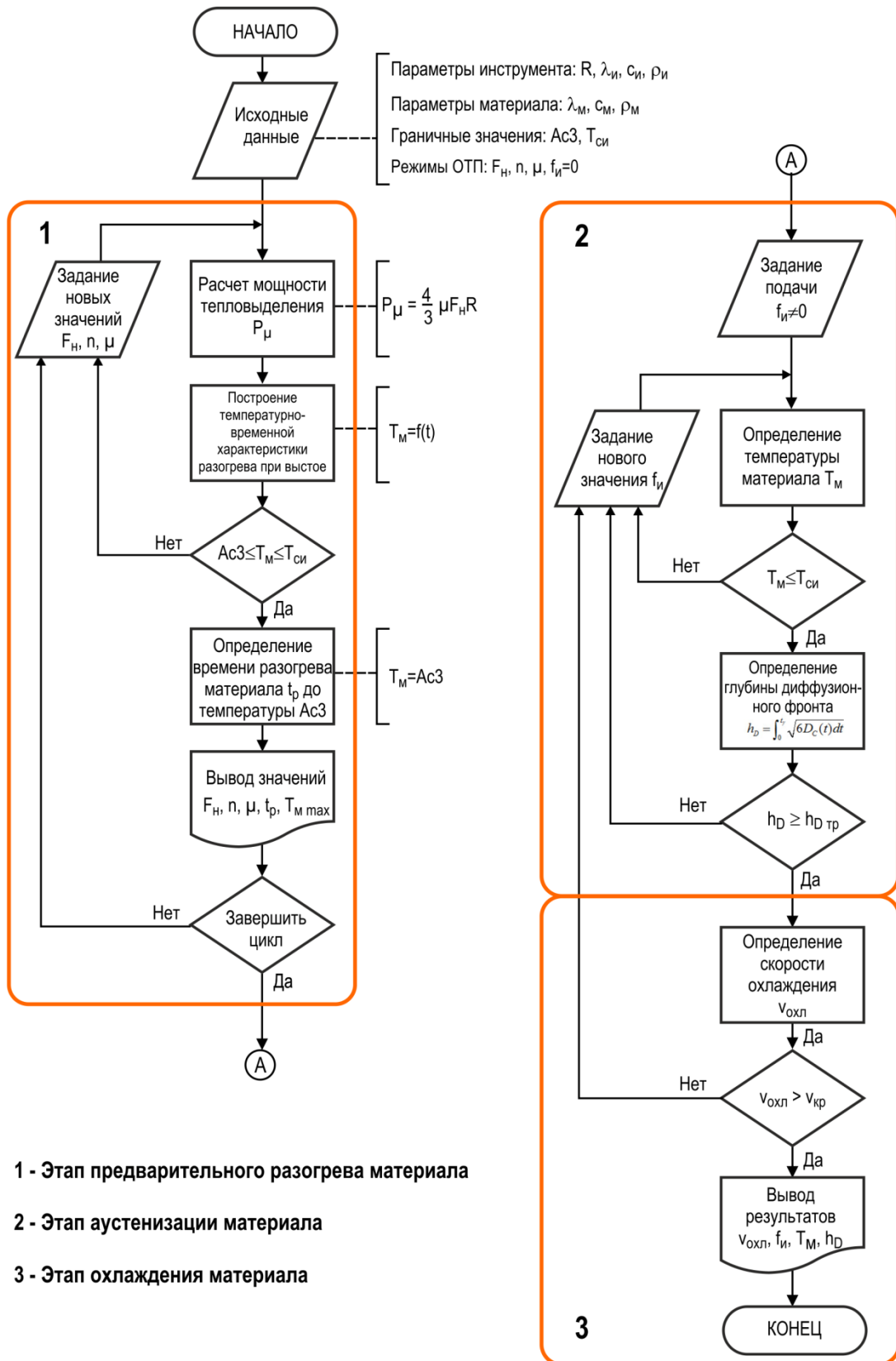


Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритма решения многофакторной задачи управления термическим циклом во взаимосвязи с технологическими параметрами процесса ОТП

На первом этапе основываясь на расчёте мощности фрикционного тепловыделения в контактной зоне устанавливается возможность достижения необходимой температуры нагрева во время предварительного выстоя инструмента без подачи. В этом случае анализируемое сочетание технологических параметров нормальной силы F_n , частоты вращения инструмента n и коэффициента трения μ считается подходящим, если контактная температура в течение первых 20 секунд процесса удовлетворяет условиям $T_{\text{си}} \geq T_k \geq A_{\text{СЗ}}$.

На втором этапе управления аустенизацией выполняется оценка степени прогрева материала поверхностного слоя на основе анализа коэффициента диффузии углерода с использованием параметра положения диффузионного фронта h_D . Выбираемое сочетание технологических параметров F_n , n , μ и подачи f считается подходящим, если положение диффузионного фронта превышает требуемую глубину закаливаемого слоя. На третьем этапе управления поверхностной закалки происходит оценка скорости охлаждения материала поверхностного слоя. Для обеспечения мартенситного превращения необходимо чтобы скорость охлаждения была выше критической, в противном случае, закалка не будет произведена. Таким образом, на третьем этапе окончательное сочетание технологических параметров считается подходящим, если скорость охлаждения обрабатываемого материала превышает критическую скорость закалки для данной стали.

2.2 Обоснование поверхностной закалки кольцевых участков в процессе ОТП при движении инструмента по концентрическим окружностям и вверной траектории

Закалка кольцевого участка поверхности, ширина которого превышает диаметр вращающегося инструмента, является нетривиальной задачей. Для решения такой задачи необходимо обосновать оптимальную траекторию движения и выбрать режим ОТП, обеспечивающий формирование равномерно упроченного поверхностного слоя требуемой толщины.

Для обеспечения равномерной твердости широкой плоской поверхности методом закалки в процессе ОТП инструментом с плоским торцом предложены два вида траектории его движения: 1) по concentрическим окружностям с 50% перекрытием дорожек трения, рекомендуемым в работе G. Campana для многопроходной лазерной закалки [19]; 2) веерная.

При ОТП по concentрическим окружностям 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-м дорожкам трения А, В, С (рисунок 2.6).

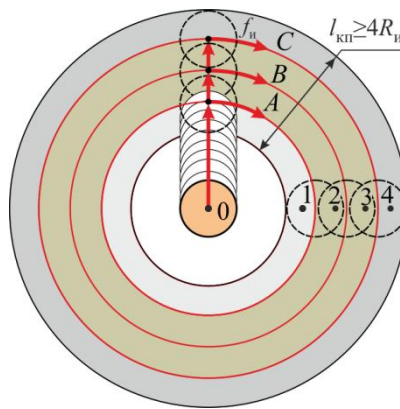


Рисунок 2.6 – Схема обработки кольцевого участка при движении инструмента по concentрическим окружностям

Однако формирование равномерного упроченного поверхностного слоя при ОТП с движением инструмента по concentрическим окружностям проблематично из-за повторного нагрева материала при формировании соседней дорожки трения. Повторный нагрев материала до температуры среднего отпуска ($\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) может привести к снижению твердости на первой дорожке А (точка 1) и в зонах перекрытия (точки 2 и 3) дорожек В и С. Таким образом, на предыдущей дорожке, где повторный нагрев будет осуществляться до температуры, превышающей критическую точку A_{C3} , произойдет повторная аустенизация с последующей закалкой при охлаждении. Если температура повторного нагрева будет ниже A_{C3} , произойдет отпуск закаленного материала, рекристаллизация образованного мартенсита и снижение твердости в локальной зоне формируемой поверхности.

Исследовать закономерности нагрева и охлаждения стали в процессе ОТП при движении инструмента по концентрическим окружностям с перекрытием дорожек трения по глубине возможно методом конечно-элементного моделирования. При этом необходимо учитывать изменение теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материала при нагреве. Применительно к ОТП стали 20Х13 в состоянии поставки и для сплава КМГ303 фирмы ZCC СТ (Китай) должны быть данные об изменении температуро- и теплопроводности при температуре до 1100 °С.

Для более равномерного упрочнения материала в процессе ОТП широкой кольцевой поверхности ($l_{\text{кп}} \geq 5R_{\text{и}}$) впервые предложена веерная траектория непрерывного движения инструмента, которая в пределах участка $l_{\text{рт}} \approx \frac{2}{3}l_{\text{кп}}$ 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 $A_{\text{С3}}$ и исключается отпуск.

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

$$f_{\text{тп}} = \frac{(R_1 + R_2) \cdot \alpha \cdot f_{\text{и}}}{2(R_2 - R_1) + \pi(r_1 + r_2)}, \quad (2.4)$$

где R_1, R_2 – радиусы верхней и нижней границы участка $l_{\text{рт}}$; 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 $l_{\text{рт}}$ (рисунок 2.7, а).

В отличие от траектории движения инструмента по концентрическим окружностям, при веерной траектории пересечение соседних разнонаправленных дорожек трения непостоянно. Так, при обеспечении 50% перекрытия на средней линии обрабатываемого кольцевого участка вблизи

внутренней его границы перекрытия составляют 75% а около наружной – 25% (рисунок 2.7, б).

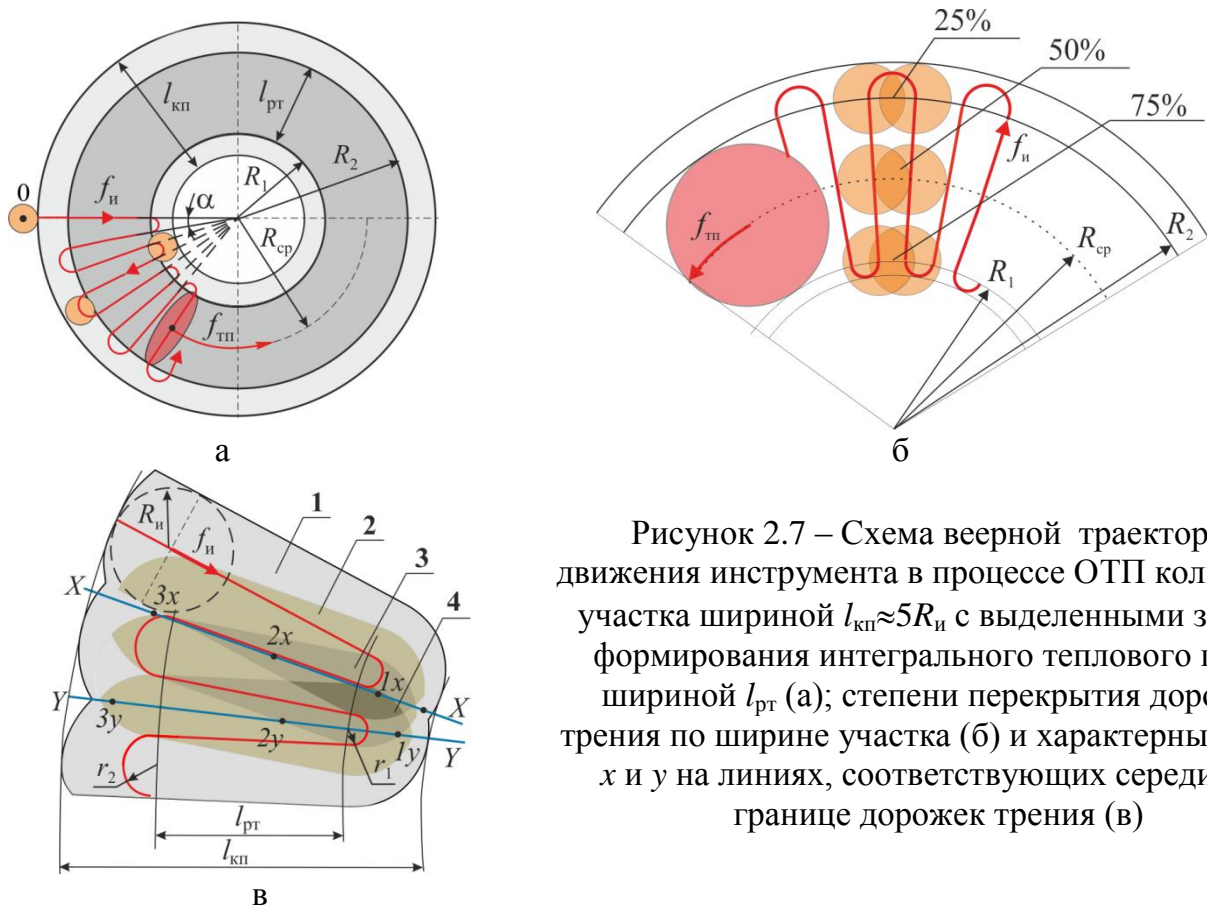


Рисунок 2.7 – Схема веерной траектории движения инструмента в процессе ОТП кольцевого участка шириной $l_{кп} \approx 5R_{и}$ с выделенными зонами формирования интегрального теплового пятна шириной $l_{пт}$ (а); степени перекрытия дорожек трения по ширине участка (б) и характерных точек x и y на линиях, соответствующих середине и границе дорожек трения (в)

При применении веерной траектории движения в ограниченной кольцевой поверхности шириной $l_{пт} = \frac{2}{3}l_{кп}$ на различных участках от периферии к центру возникает от двух до четырех перекрытий дорожек трения (выделены цифрами и цветом на рисунке 2.7, 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. Из этого следует, что обрабатываемый материал в точках с различным количеством перекрытий будет испытывать соответствующее количество последовательных импульсных нагревов. Однако, в отличие от траектории движения вдоль concentric окружностей, когда между соседними импульсными нагревами материал успевает остыть до температуры ниже точки мартенситного превращения, при веерной траектории движения время между последовательными импульсными нагревами

составляет 1...2 секунды. В этом случае материал не успевает остыть и постоянно находится в нагретом состоянии до момента, когда выйдет из зоны нахождения теплового пятна. Таким образом, при веерной траектории движения инструмента не происходит эффекта самоотпуска, поскольку все циклы повторного нагрева материал испытывает до его закалки.

Подробный анализ температурных полей, возникающих в процессе ОТП при движении инструмента по веерной траектории, также может быть выполнен методом конечно-элементного моделирования.

На основании проведенного анализа можно утверждать, что в процессе ОТП широкого кольцевого участка поверхности веерная траектория движения инструмента, в отличие от движения по концентрическим окружностям, может обеспечить формирование равномерно упрочённого поверхностного слоя.

2.3 Обоснование охлаждения заготовки в процессе ОТП кольцевого участка при веерной траектории движения инструмента

Основопологающим вопросом управления ОТП является поддержание температуры стали 20X13 и инструмента в контактной зоне в пределах от A_{C3} до 1100 °С. В процессе ОТП кольцевой поверхности происходит накопление тепла в заготовке и, в зависимости от времени обработки и толщины заготовки, будет повышаться ее объемная температура.

Повышение объемной температуры окажет существенное влияние на скорость охлаждения обрабатываемого материала и негативно отразится на процессе поверхностной закалки и формируемой твердости слоя. Для некоторых сталей объемный нагрев может снизить скорость охлаждения до такой степени, что она станет быть ниже критической, в результате чего распад аустенита будет происходить с образованием перлитной структуры. Подобный фазовый переход характерен для отжига и, в отличие от закалки, приводит к формированию поверхностного слоя с существенно более низкой твердостью.

Помимо снижения скорости охлаждения объемный нагрев заготовки может вызвать значительные термические напряжения и деформации. В частности, при нагреве стали 20X13 на 100 С термическая деформация изгиба

достигает 0,56 мм. Для обеспечения стабильного контакта инструмента с поверхностью заготовки величина деформации должна быть минимальной (не более 0,2 мм). Это возможно при повышении объемной температуры только в пределах 15...20 °С от начальной, равной, как правило, комнатной температуре ~22...25 °С. Кроме того, объемный нагрев заготовки может привести к дополнительному нагреву инструмента и повышению температуры выше величины красностойкости $T_{си}$.

На рисунке 2.8 представлена схема нагрева кольцевого участка заготовки в процессе ОТП и прогнозируемая зависимость изменения объемной температуры от времени обработки.

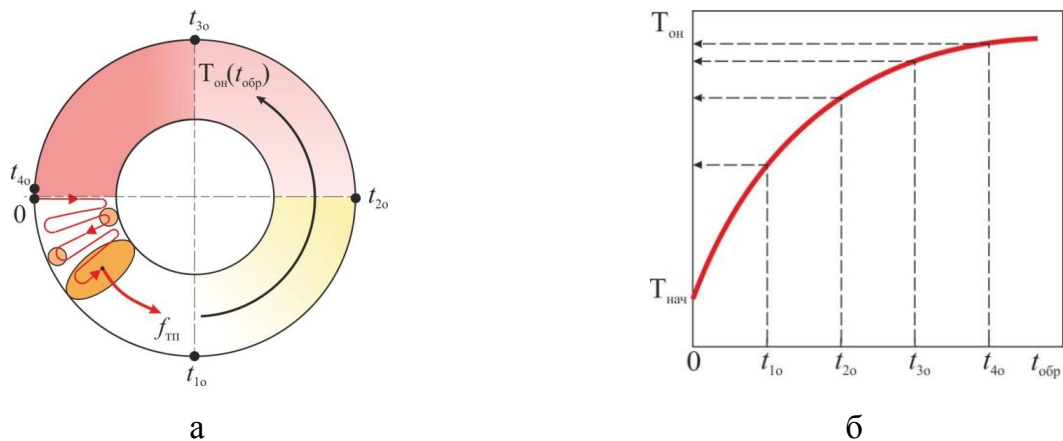


Рисунок 2.8 – Схема постепенного нагрева кольцевого участка заготовки (а) и зависимость изменения объемной температуры $T_{он}$ от времени обработки поверхности по верной траектории (б)

Температура объемного нагрева заготовки $T_{он}$ может быть вычислена по формуле:

$$T_{он} = \frac{Q_M}{C_M m}, \quad (2.5)$$

где Q_M – поглощенное тепло, Дж;

m – масса заготовки, кг;

C_M – теплоемкость материала, Дж/(кг·К).

Поглощенное в заготовку тепло с учетом потерь на конвекцию и излучение в воздух ϕ_v определяется следующим образом:

$$Q_m = \varphi_m t_{\text{обр}} = \eta_m P_\mu - \varphi_v, \quad (2.6)$$

где φ_m – тепловой поток в материал, Вт;

η_m – коэффициент разветвления (доля) выделяемой фрикционной тепловой мощности P_μ в материал заготовки;

Тепловой поток φ_v от поверхности в окружающую воздушную среду излучением $\varphi_{\text{изл}}$ и конвекцией φ_k согласно [46] может быть определен по формуле

$$\varphi_v = \alpha \cdot A \cdot \Delta T, \quad (2.7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи на границе «поверхность заготовки – воздух», Вт/(м²·К);

A – площадь поверхности, отводящей тепло конвекцией и излучением, м²;

ΔT – разность температур поверхности и воздушной среды, К;

Коэффициент теплоотдачи может быть представлен суммой

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{\text{ри}}, \quad (2.8)$$

где α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности в воздух;

$\alpha_{\text{ри}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением.

Согласно [47], коэффициент конвекционной теплоотдачи α_k в случае охлаждения нагретой заготовки в спокойном воздухе в интервале температур от 1000 °С до 800 °С составляет 133,7 Вт/(м² К).

Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{ри}}$ может быть вычислен по формуле, приведенной в [48]:

$$\alpha_{\text{ри}} = \varepsilon \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \left((T_{\text{п}} + 273,15)^4 - (T_{\text{в}} + 273,15)^4 \right) / (T_{\text{п}} - T_{\text{в}}), \quad (2.9)$$

где ε – степень черноты заготовки,

$T_{\text{п}}$ и $T_{\text{в}}$ – температура поверхности и воздуха, соответственно, °С;

Согласно [49], для поверхности нержавеющей стали величину ε можно принять равной 0,85.

Температура объемного нагрева заготовки типа «диск» в процессе ОТП может быть определена по следующей зависимости:

$$T_{\text{он}} = \frac{4(\eta_{\text{м}} P_{\text{μ}} - \varphi_{\text{в}}) t_{\text{обр}}}{C_{\text{м}} \pi D^2 h \rho}, \quad (2.10)$$

где D – диаметр заготовки, м;

h – толщина заготовки, м;

ρ – плотность материала заготовки, кг/м³;

$C_{\text{м}}$ – теплоемкость материала заготовки, Дж/(кг·К);

$t_{\text{обр}}$ – время обработки, с.

Применительно к ОТП поверхности заготовки из стали 20Х13 диаметром 100 мм по предложенной формуле (2.10) построены зависимости изменения объемной температуры $T_{\text{он}}$ для различной толщины заготовки h при выделяемой фрикционной мощности $P_{\text{μ}} = 1000$ Вт с учетом коэффициента разветвления теплового потока в материал $\eta_{\text{м}}$ (рисунок 2.9). Коэффициент разветвления теплового потока в материал заготовки $\eta_{\text{м}}$ задавался равным 0,6; 0,7; 0,8. Время обработки кольцевого участка инструментом с радиусом $R_{\text{и}}=4,5$ мм принималось равным 60 с.

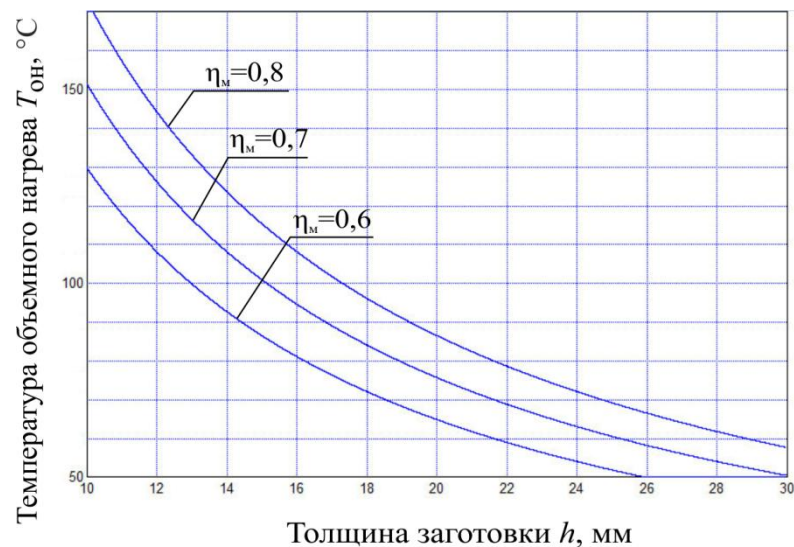


Рисунок 2.9 – Расчетные зависимости изменения температуры объемного нагрева заготовки от ее толщины и коэффициента разветвления (доли) фрикционного тепла, выделяемого в обрабатываемый материал

Таким образом, минимизация влияния объемного нагрева на поддержание требуемой температуры нагрева стали 20Х13 при поверхностной закалке в процессе ОТП является важнейшим условием получения равномерной твердости в кольцевом участке поверхности.

Для решения задачи термостабилизации материала в процессе поверхностной закалки кольцевого участка необходимо проводить непрерывное охлаждение заготовки в течение всего времени упрочняющей обработки. Непрерывное охлаждение может быть организовано тремя основными способами: 1 – наружным воздушным обдувом обрабатываемой поверхности; 2 – внутренним жидкостным охлаждением тыльной стороны заготовки; 3 – комбинированным воздушным и жидкостным охлаждением.

Применение наружного воздушного охлаждения может быть затруднено ввиду низкой стойкости инструмента из твердых сплавов, например, карбида вольфрама, к резким перепадам температур. В результате наружного охлаждения создаваемый поток воздуха будет неизбежно попадать на инструмент и могут вызвать значительные термические напряжения, которые приведут к его хрупкому разрушению.

Таким образом, наиболее целесообразным способом температурной стабилизации обрабатываемого материала в процессе ОТП кольцевых поверхностей может быть жидкостное охлаждение тыльной стороны заготовки.

Выводы по второму разделу

1 Обоснован выбор обрабатываемого и инструментального материала для реализации технологии поверхностной закалки в процессе ОТП на обрабатывающем центре.

2 Разработан алгоритм решения многофакторной задачи управления предварительным разогревом и термическим циклом поверхностной закалки сталей при одно- и многопроходной ОТП твердосплавным инструментом с плоским торцом во взаимосвязи с технологическими параметрами и коэффициентом трения.

3 Предложена верная траектория движения инструмента в процессе ОТП широкого кольцевого участка поверхности и показаны ее преимущества при

обеспечении равномерной твердости слоя по сравнению с обработкой по концентрическим окружностям.

4 Научно обоснован подход к снижению влияния объемного нагрева заготовки в процессе ОТП при движении инструмента по веерной траектории для обеспечения равномерной твердости кольцевых участков упрочненного поверхностного слоя за счет отвода накопленного тепла охлаждающей жидкостью с тыльной стороны заготовки.

3 Конечно-элементное моделирование поверхностной закалки в процессе однопроходной ОТП и упрочнении кольцевого участка стали 20X13

В третьем разделе теоретически исследована взаимосвязь температурно-временных параметров термического цикла поверхностной закалки с технологическими параметрами процесса ОТП и коэффициентом трения методом конечно-элементного моделирования на этапе разогрева материала, а также при движении инструмента по концентрическим окружностям и предложенной веерной траектории в процессе упрочнения кольцевых участков стали 20X13. Показаны преимущества обеспечения равномерной твердости в кольцевых участках при веерной траектории движения инструмента.

3.1 Динамическая конечно-элементная тепловая модель поверхностной закалки и теплофизические данные обрабатываемого и инструментального материалов

Для исследования изменения параметров термического цикла во взаимосвязи с временем, технологическими параметрами процесса и коэффициентом трения была построена динамическая конечно-элементная модель типа transient thermal в программном пакете ANSYS Mechanical Workbench 2019 R3 с использованием APDL (ANSYS Parametric Design Language). В рамках тепловой модели переходные зависимости температуры от времени в декартовой системе координат определялись на основе трёхмерного нелинейного уравнения теплопередачи (3.1):

$$\frac{\partial(\rho(T)C_p(T)T)}{\partial t} = \frac{\partial^2(k(T)T)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(k(T)T)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(k(T)T)}{\partial z^2} + Q_{\text{int}}, \quad (3.1)$$

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

В общем случае геометрическая модель процесса ОТП представляет собой цилиндрический инструмент (pin) диаметром 10 мм с фаской 0,5 мм, вращающийся и соприкасающийся с плоской поверхностью. Для

моделирования неразрывного и асимметричного контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью использованы элементы типа CONTA174 и TARGE170.

В контактной зоне инструмента и поверхности материала располагался источник тепловыделения с постоянной мощностью P_{μ} , которая задавалась по формуле Ø. Frigaard (2.1). Рассеяние тепла с поверхностей инструмента и образца осуществлялось с использованием элементов типа SURF152. Начальные температурные условия для обоих тел задавались в виде $T(x, y, z=0)=+22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Геометрическая модель при моделировании процесса ОТП на этапе предварительного разогрева материала задавалась в виде образца 50x50x25 мм с расположением инструмента в центре (рисунок 3.1). На геометрическую модель наносилась сетка тетрагональных конечных элементов типа SOLID84. На краях образца, максимально удаленных от контактной зоны (более 25 мм), размеры конечных элементов составляли 5 мм. В контактной зоне инструмента, ограниченной сферической областью диаметром 24 мм, сетка конечных элементов сгущалась до достижения размеров 0,5 мм.

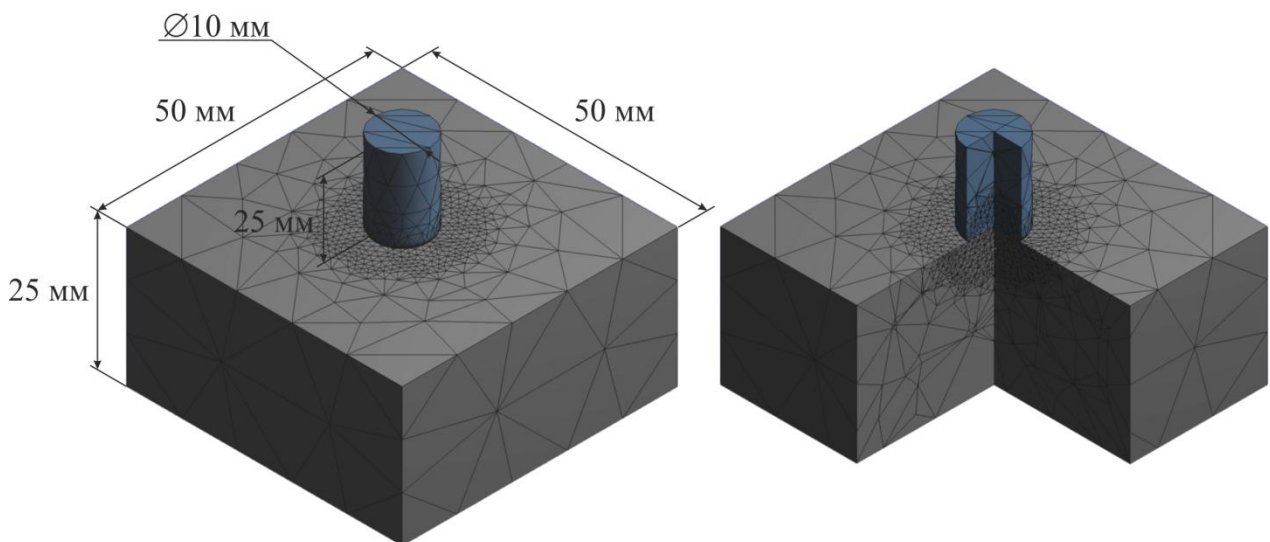


Рисунок 3.1 – Геометрические параметры и сетка тетрагональных конечных элементов тепловой модели предварительного разогрева

Геометрическая модель процесса при исследовании однопроходной ОТП задавалась в виде бруска шириной 50 мм, высотой 25 мм и длиной 100 мм с прямолинейно движущимся инструментом со скоростью подачи $f_{и}$. Для сокращения времени моделирования образец (брусок) был разделен вдоль на две равные части с применением граничного условия *symmetric* к границе раздела. На контактирующие тела был наложена гексаэдрическая сетка конечных элементов типа SOLID226 (рисунок 3.2). Для обеспечения высокой точности расчета параметров термического цикла поверхностной закалки без существенного увеличения времени моделирования сетка конечных элементов на контактирующих телах была разделена на две зоны. Первая, с размером конечных элементов 1 мм, располагалась вблизи контакта. Вторая зона находилась на расстоянии более 12 мм от контакта и имела размер конечных элементов 5 мм.

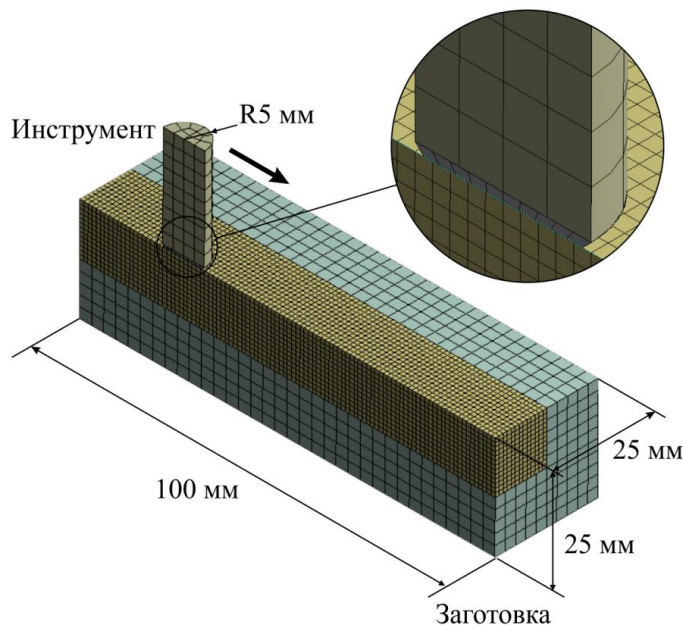


Рисунок 3.2 – Геометрическая модель процесса ОТП с наложенной сеткой конечных элементов

Геометрические модели для исследования температурных полей при КЭМ процесса ОТП кольцевого участка поверхности при движении инструмента по трем концентрическим окружностям и по верной траектории представлены на рисунке 3.3, а, б.

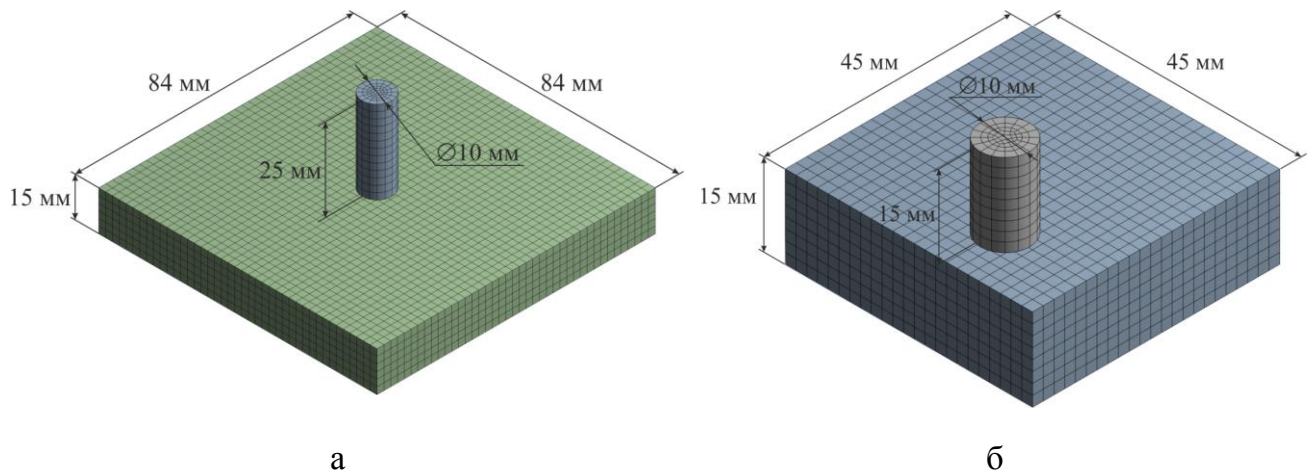
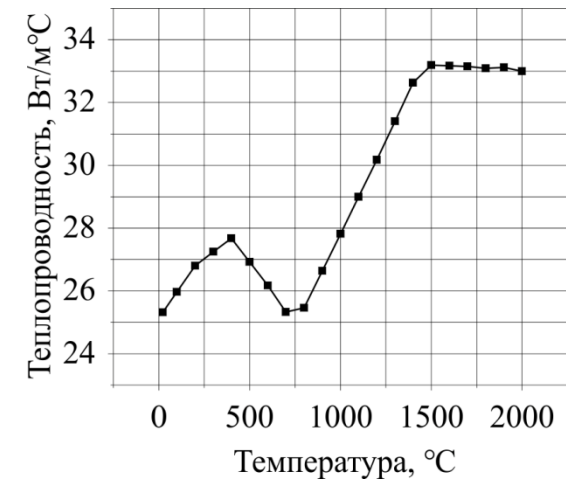


Рисунок 3.3 – Геометрическая модель ОТП кольцевой поверхности при движении инструмента по концентрическим окружностям (а) и верной траектории (б) с наложенной сеткой конечных элементов

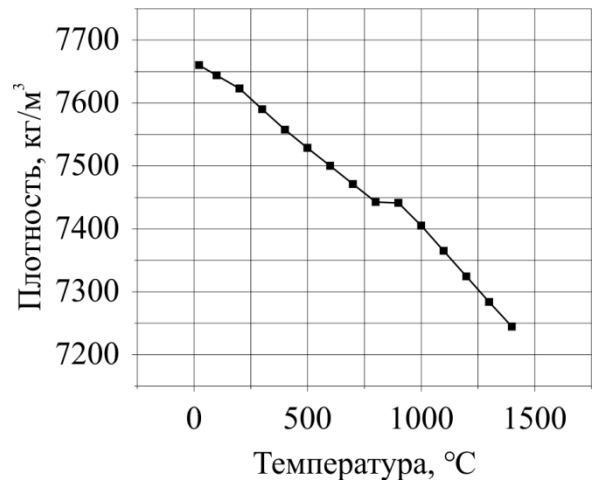
На геометрические модели ОТП кольцевых участков поверхностей стали 20X13 методом Multizone наносилась также гексаэдрическая сетка конечных элементов типа SOLID225 размером 2 мм. Размеры элементов на инструменте составляли 1 мм.

В контактной зоне инструмента при КЭМ ОТП кольцевых участков задавалось тепловыделение мощностью $P_{\mu}=1000$ Вт, что соответствует механическому воздействию с нормальной силой $F_{н}=3500$ Н, частотой вращения $n=4000$ об/мин и коэффициенту трения $\mu=0,22$.

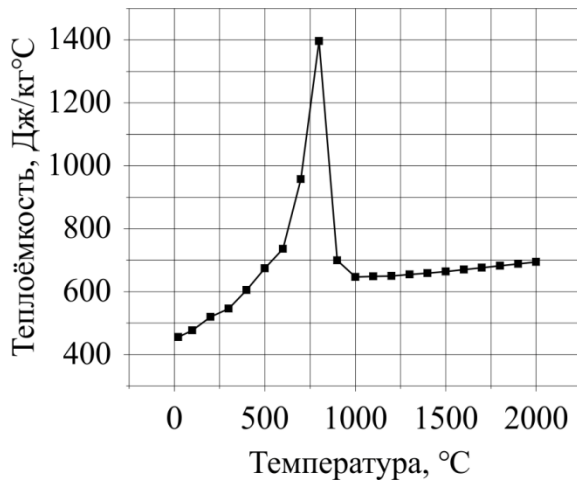
Для наиболее точной симуляции поведения обрабатываемого материала – стали 20X13 при нагреве и охлаждении в модели были использованы зависимости коэффициента теплопроводности, удельной теплоёмкости и плотности стали AISI 420 от температуры, экспериментально установленные в работе [50] в широком диапазоне температур нагрева (рисунок 3.4).



а



в



б

Рисунок 3.4 – Зависимости изменения коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоёмкости (б) и плотности (в) стали 20X13 от температуры

С целью повышения точности расчётов при КЭМ было проведено экспериментальное исследование зависимости коэффициента температуропроводности инструментального материала от температуры нагрева. Из стержней инструментального материала KMG303 фирмы ZCC (Китай) диаметром 10 мм на электроэрозионном станке АЖ были изготовлены плоские образцы толщиной 2 мм. Температуропроводность инструментального материала определялась в диапазоне изменения температур от 25 до 1050 °C методом лазерной вспышки на приборе Netzch LCA-457 MicroFlash и приведена на рисунке 3.5, а.

Плотность инструментального материала принималась равной 14700 кг/м³ а удельная теплоёмкость 400 Дж/кг°C. На основе установленной зависимости температуропроводности инструментального материала от температуры (рисунок 3.5, а) и приведенных выше теплофизических

параметров удельной теплоёмкости и плотности твердого сплава WC-Co коэффициент теплопроводности λ может быть рассчитан как

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot C_p, \quad (3.3)$$

где α – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_p – удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/\text{кг}^\circ\text{С}$.

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры приведена на рисунке 3.5, б.

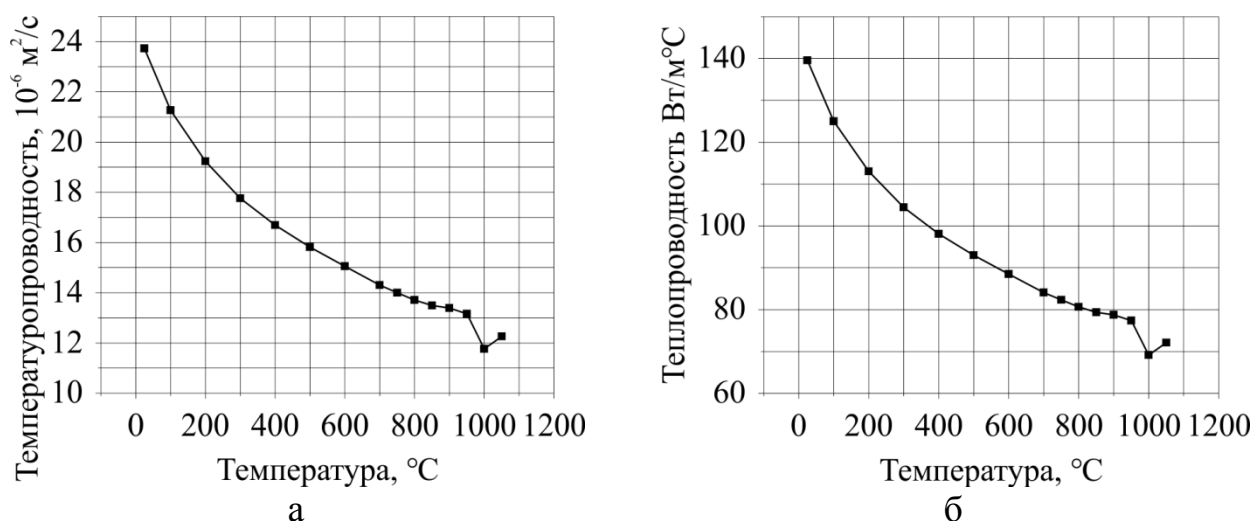


Рисунок 3.5 – Зависимости коэффициента температуропроводности (а) и коэффициента теплопроводности (б) инструментального материала от температуры

3.2 Моделирование процесса ОТП на этапе предварительного разогрева материала

Для моделирования неразрывного и асимметрического контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью использованы элементы типа CONTA174 и TARGE170. Рассеивание тепла с поверхности инструмента и заготовки осуществляется с использованием элементов типа SURF152.

КЭМ ОТП на этапе предварительного разогрева материала проводилось без подачи инструмента продолжительностью 20 с. Симуляция выполнена для следующих сочетаний величин трёх технологических параметров: нормальной силы $F_n = 2500, 3000$ и 3500 Н; частоты вращения инструмента $n = 2000, 3000, 4000, 5000$ и 6000 об/мин и двух значений коэффициента трения $\mu = 0,2$ и $0,3$.

Выбор величины коэффициента трения сделан на основе работ J. Rech и др. [45], 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 $\mu=0,2...0,3$.

Численное исследование процесса показало, что наибольший нагрев материала поверхностного слоя происходит под инструментом в области, прилежащей к краю контактной зоны (рисунок 3.6). При этом температура в центральной области пятна контакта на ~19% ниже, чем на периферии. Численная модель также позволила установить, что в поверхностном слое на глубине ~1 мм материал нагревается до температуры, которая на ~22% ниже средней температуры в контактной зоне. Таким образом, можно предположить, что для прогрева материала на глубину 1 мм от поверхности до температуры выше критической точки A_{C3} необходимо, чтобы контактная зона была нагрета до температуры не менее 1090 °С.

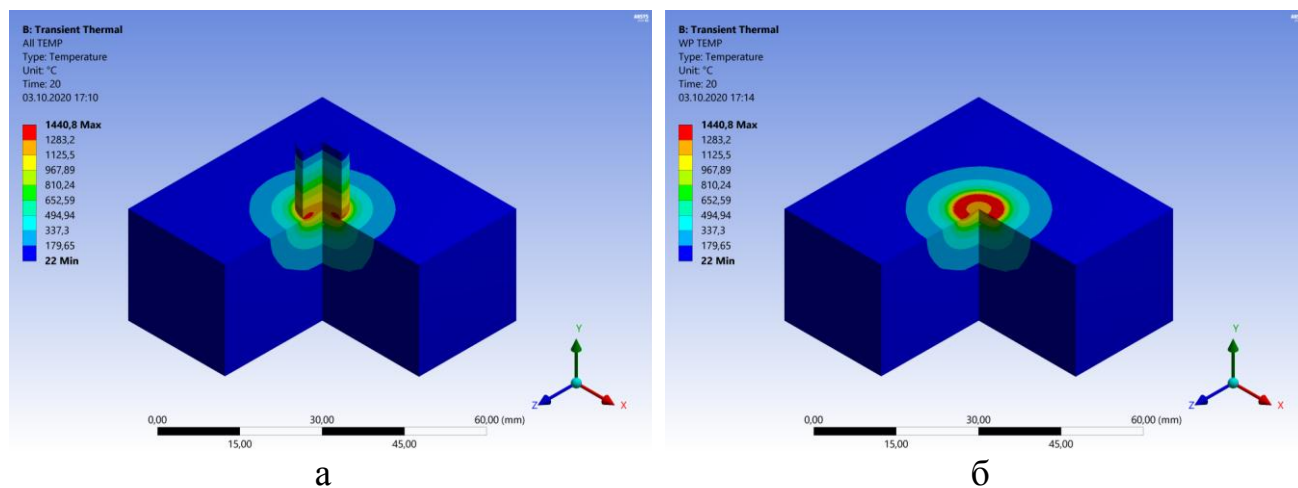


Рисунок 3.6 – Пример распределения температуры в системе инструмент-обрабатываемый материал (а) и в обрабатываемом материале (б) при предварительном разогреве в процессе ОТП с параметрами ($F_B=3500$; $n=4000$; $\mu=0,3$)

В результате моделирования процесса ОТП на этапе предварительного разогрева материала установлено, что каждый из переменных технологических параметров оказывает существенное влияние на изменение контактной температуры во времени (рисунок 3.7).

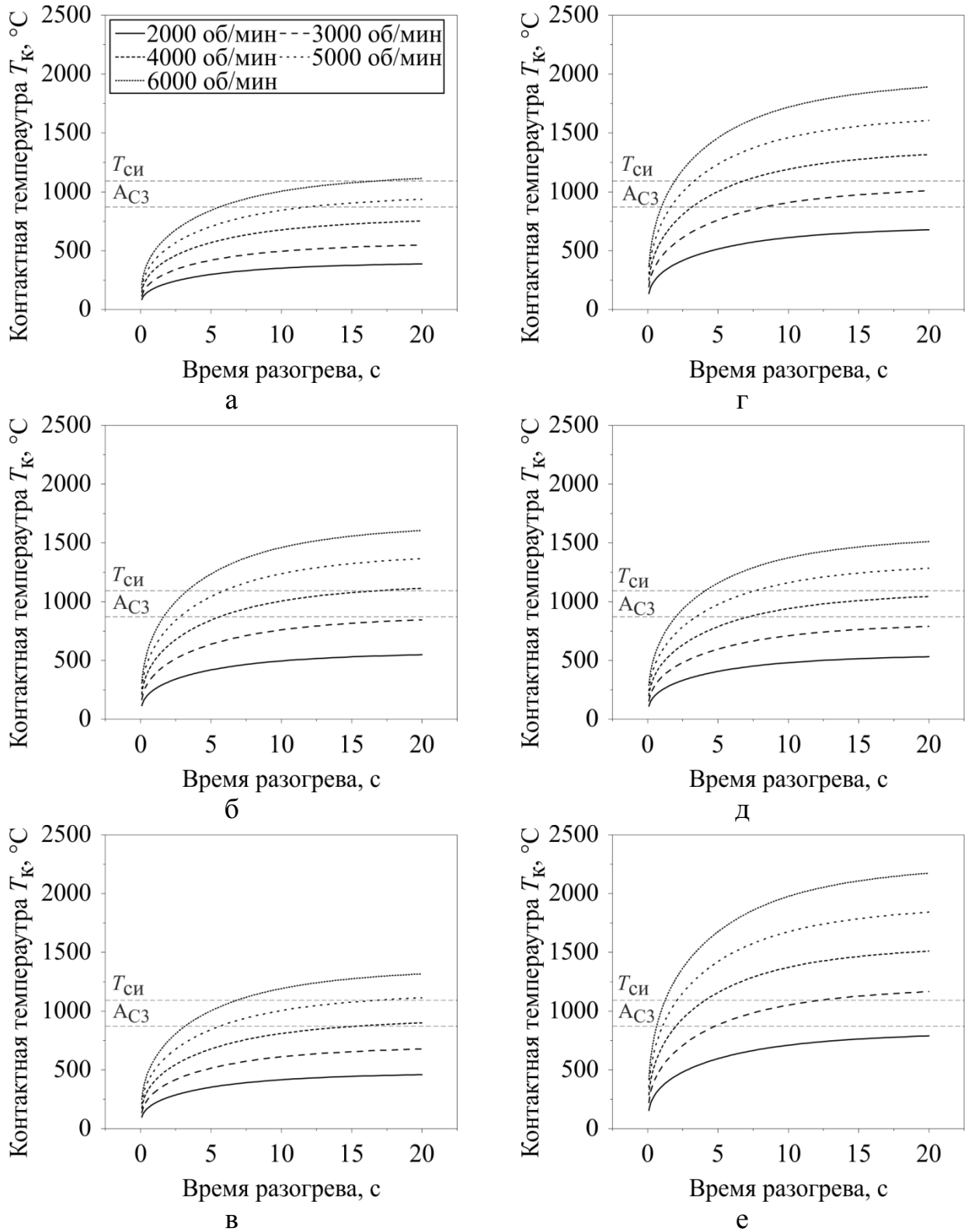


Рисунок 3.7 – Изменение контактной температуры T_k на этапе предварительного разогрева материала при коэффициенте трения $\mu=0,2$ (а-в) и $\mu=0,3$ (г-е) и нормальной силе 2500 Н (а, г), 3000 Н (б, д) и 3500 Н (в, е)

Так, при коэффициенте трения 0,2 и нормальной силе 2500 Н минимально необходимого разогрева до $T_k=1090$ °С возможно добиться только при скорости вращения 6000 об/мин и выстое в течение 16,5 секунд (таблица 3.1). Повышение нормальной силы до 3000 и 3500 Н обеспечивает необходимый нагрев контактной зоны при скорости вращения инструмента 5000...6000 об/мин за 4,1...16,5 с.

Таблица 3.1. Зависимость мощность тепловыделения P_μ и времени разогрева t_p до температур A_{C3} и 1090 °С

№	F_n , Н	n , об/мин	μ	P_μ , Вт	Время разогрева, с	
					до 1090 °С	до 870 °С
1	2500	2000	0,2	331,6	--	--
2			0,3	497,4	--	--
3		3000	0,2	497,4	--	--
4			0,3	746,1	--	--
5		4000	0,2	663,2	--	--
6			0,3	994,8	16,5	5,6
7		5000	0,2	829	--	11,8
8			0,3	1243,5	5,9	2,8
9		6000	0,2	994,8	16,5	5,6
10			0,3	1492,3	3,3	1,6
11	3000	2000	0,2	397,9	--	--
12			0,3	596,9	--	--
13		3000	0,2	596,9	--	--
14			0,3	895,4	--	8,2
15		4000	0,2	795,9	--	15,1
16			0,3	1193,8	6,8	3,1
17		5000	0,2	994,8	16,5	5,6
18			0,3	1492,3	3,3	1,6
19		6000	0,2	1193,8	6,8	3,1
20			0,3	1790,7	1,9	1,0
21	3500	2000	0,2	464,3	--	--
22			0,3	696,4	--	--
23		3000	0,2	696,4	--	--
24			0,3	1044,6	12,1	4,8
25		4000	0,2	928,5	--	7,2
26			0,3	1392,8	4,1	2,0
27		5000	0,2	1160,6	7,5	3,4
28			0,3	1741	2,1	1,1
29		6000	0,2	1392,8	4,1	2,0
30			0,3	2089,2	1,1	0,6

Температурно-временные характеристики $T_k(t)$ на этапе разогрева существенно изменяются при повышении коэффициента трения до 0,3. Так, предварительный разогрев контактной зоны до 1090 °С при механической

нагрузке 2500 и 3000 Н обеспечивается при частоте вращения инструмента от 4000 до 6000 об/мин и коэффициенте трения $\mu=0,2$ за время 6,8...16,5 с. Повышение нормальной силы до 3500 Н позволяет уменьшить частоту вращения инструмента до 3000...4000 об/мин, что при коэффициенте трения $\mu=0,3$ снизит время предварительного разогрева до 4,1...6,8 с.

На основе полученных данных можно заключить, что нагрев контактной зоны до температуры 1090 °С, ограниченной также краснотойкостью инструмента, возможен только при мощности фрикционного тепловыделения не менее 1000 Вт. Однако при $P_{\mu}=1000$ Вт предварительный разогрев занимает значительное время 16,5 с. Повышение мощности тепловыделения до 1500 Вт сокращает время разогрева до ~3 с. Однако такой уровень тепловыделения приводит к чрезмерному росту контактной температуры и может вызвать расплавление материала поверхностного слоя. Оптимальным с точки зрения скорости разогрева и недопущения расплавления поверхности может быть режим, обеспечивающий мощность тепловыделения не более 1400 Вт.

3.3 Конечно-элементное моделирование поверхностной закалки при однопроходной ОТП с прямолинейным движением инструмента

В рамках моделирования температурных полей при ОТП с прямолинейным движением инструмента на расстояние 50 мм при постоянной скорости подачи осуществлялся предварительный разогрев материала. Численное исследование выполнено для скоростей подачи $f=50, 75, 100, 125$ и 150 мм/мин и коэффициента трения $\mu=0,2, 0,22, 0,24, 0,26, 0,28$ и 0,3.

Согласно полученным результатам при отсутствии подачи нагрев контактной зоны до температуры 65...80% от установившейся величины происходит в течение первых пяти секунд процесса (рисунок 3.8). При включении линейной подачи инструмента стабилизация температурного режима в контактной зоне наступает спустя 10...15 секунд. После этого контактная температура изменяется не более чем на 10%.

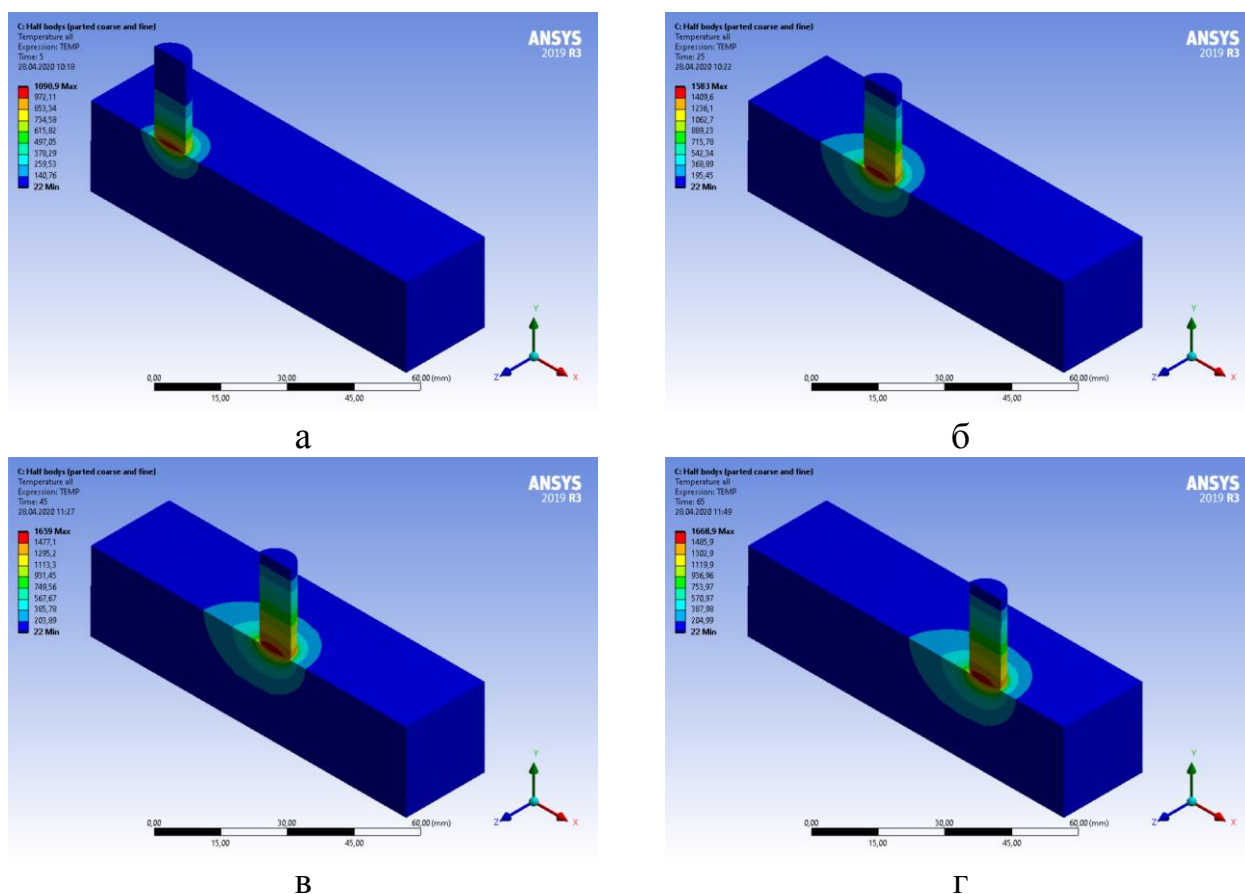


Рисунок 3.8 – Температурные поля в системе инструмент-обрабатываемый материал спустя 5 секунд (а), 25 секунд (б), 45 секунд (в) и 65 секунд (г) симуляции ОТП при $f=50$ мм/мин и $\mu=0,28$

Для оценки влияния подачи инструмента на нагрев поверхностного слоя стали 20X13 определены параметры термических циклов в середине дорожки трения на глубине 0,5 мм для различных коэффициентов трения. Из полученных температурно-временных характеристик следует, что величина подачи и коэффициент трения оказывают наибольшее влияние на нагрев материала обрабатываемой поверхности. Сравнивая полученные характеристики с необходимой температурой нагрева стали 20X13 под закалку (1000...1050 °С) установлено, что при установленном режиме механического нагружения поверхности ($F_n=3500$ Н, $n=4000$ об/мин и $\mu=0,2$) необходимый уровень нагрева для закалки на мартенсит может быть обеспечен только при подаче не более 75 м/мин (рисунок 3.9, а). В случае если коэффициент трения будет составлять $\mu=0,22$, необходимый уровень нагрева может быть обеспечен при более высоких подачах от 100 до 125 мм/мин (рисунок 3.9, б).

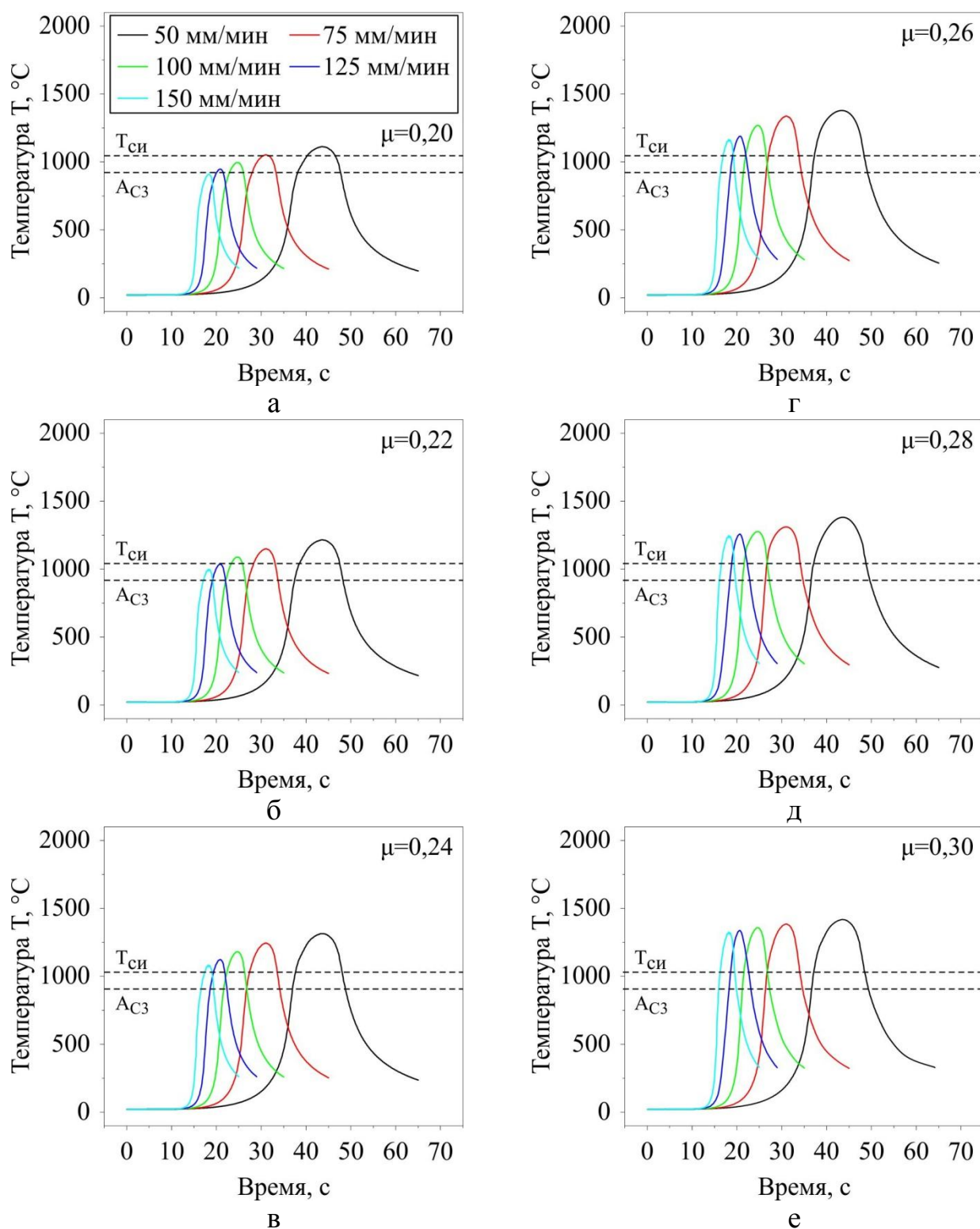


Рисунок 3.9 – Термические циклы закалки поверхностного слоя стали 20X13 на глубине 0,5 мм при различных коэффициентах трения инструмента в процессе ОТП

Однако при подачах 125 мм/мин и выше поверхность прогревается не более чем на 0,5 мм. При коэффициенте трения $\mu=0,24$ необходимый для закалки нагрев обеспечивается во всём диапазоне исследуемых подач. Однако подача 150 мм/мин не обеспечивает прогрев на глубину более 0,5 мм (рисунок

3.9, в). Когда коэффициент трения в контактной зоне составляет 0,26 при подачах 50 и 75 мм/мин происходит чрезмерный нагрев стали 20X13 до температуры плавления $T_{пл}=1440$ °С (рисунок 3.9, г). Аналогичная ситуация установлена при моделировании процесса ОТП с коэффициентом трения 0,28, когда перегрев поверхности наблюдается уже при $f_{и}=75$ мм/мин (рисунок 3.9, д). В случае, когда коэффициент трения составляет 0,3, существенный перегрев поверхностного слоя может иметь место в диапазоне подач от 50 до 100 мм/мин (рисунок 3.9, е). Для обеспечения поверхностной закалки в процессе ОТП и недопущения разрушения поверхностного слоя посредством переноса обрабатываемого материала на инструмент необходимо избегать режимов обработки, при которых либо не обеспечивается необходимый нагрев стали, либо происходит повышение температуры до $T_{пл}$.

Температурно-временные параметры термического цикла поверхностной закалки в процессе ОТП с механической нагрузкой на поверхность $F_{н}=3500$ Н и $n=4000$ об/мин при однопроходном линейном движении инструмента, установленные методом КЭМ, приведены в приложении А.

В качестве критерия эффективности нагрева поверхностного слоя при ОТП определялась глубина диффузионного фронта углерода h_D . Для расчёта глубины диффузионного фронта может быть использована зависимость Г. Готтштайна [51]

$$h_D = \sqrt{6D_C t_B}, \quad (3.4)$$

где D_C – коэффициент диффузии углерода; t_B – время выдержки материала при температуре выше критической точки A_{C3} . Коэффициент диффузии углерода определялся по зависимости (1.2). Положение диффузионного фронта в общем случае характеризует толщину поверхностного слоя, в котором в результате теплового воздействия произошло фазовое превращение с образованием аустенита. Однако для расчёта глубины диффузионного фронта в условиях переменной температуры нагрева материала, а, следовательно, и переменной величины коэффициента диффузии углерода, зависимость (3.4) не может быть

применена напрямую. Для расчёта фактического положения диффузионного фронта по глубине поверхностного слоя, сформированного в условиях импульсного нагрева обрабатываемого материала, зависимость (3.4) преобразована к виду:

$$h_D = \int_{t_n}^{t_k} \sqrt{6D_c(T_M(t))} dt, \quad (3.5)$$

где $T_M(t)$ – температурно-временная характеристика обрабатываемого материала, t_n и t_k – начальная и конечная временные границы нахождения обрабатываемого материала при температуре выше критической точки A_{C3} .

На рисунке 3.10 приведена зависимость глубины диффузии углерода в поверхностном слое от величины подачи и коэффициента трения.

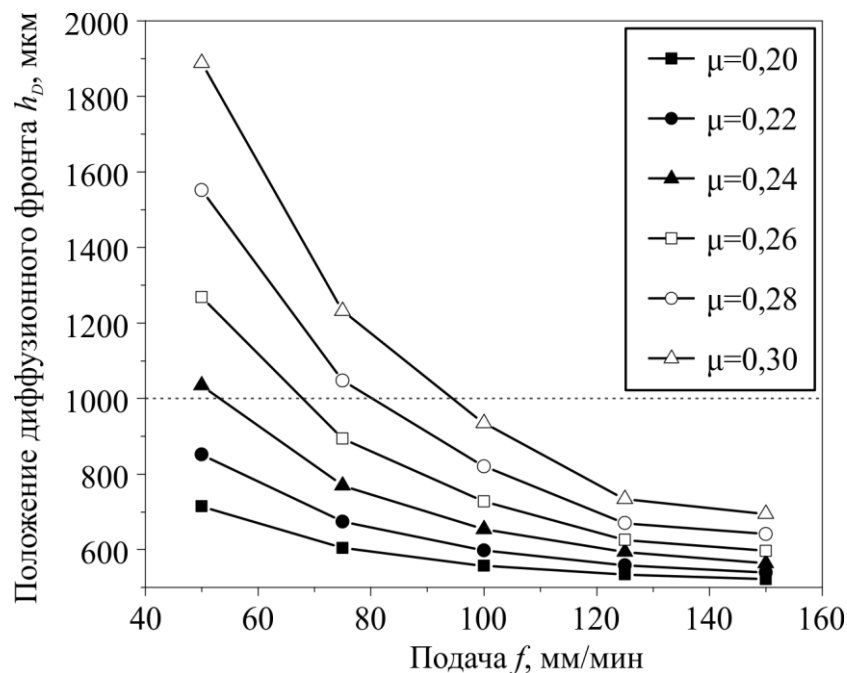


Рисунок 3.10 – Зависимость глубины диффузионного фронта от подачи при различных значениях коэффициента трения в контакте

Анализ полученных зависимостей показал, что формирование аустенита в слое толщиной 1 мм и более возможно при коэффициенте трения не менее 0,24 и подаче выше 50 мм/мин. При подаче 100 мм/мин поверхностный слой с глубиной диффузии углерода более 1 мм может быть сформирован в условиях ОТП с коэффициентом трения 0,28...0,3.

На основе анализа параметров термических циклов поверхностной закалки построены диаграммы непрерывного охлаждения обрабатываемого материала поверхностного слоя после ОТП с подачами 50, 100 и 150 мм/мин и коэффициентах трения $\mu=0,2$ и $\mu=0,5$ (рисунок 3.11).

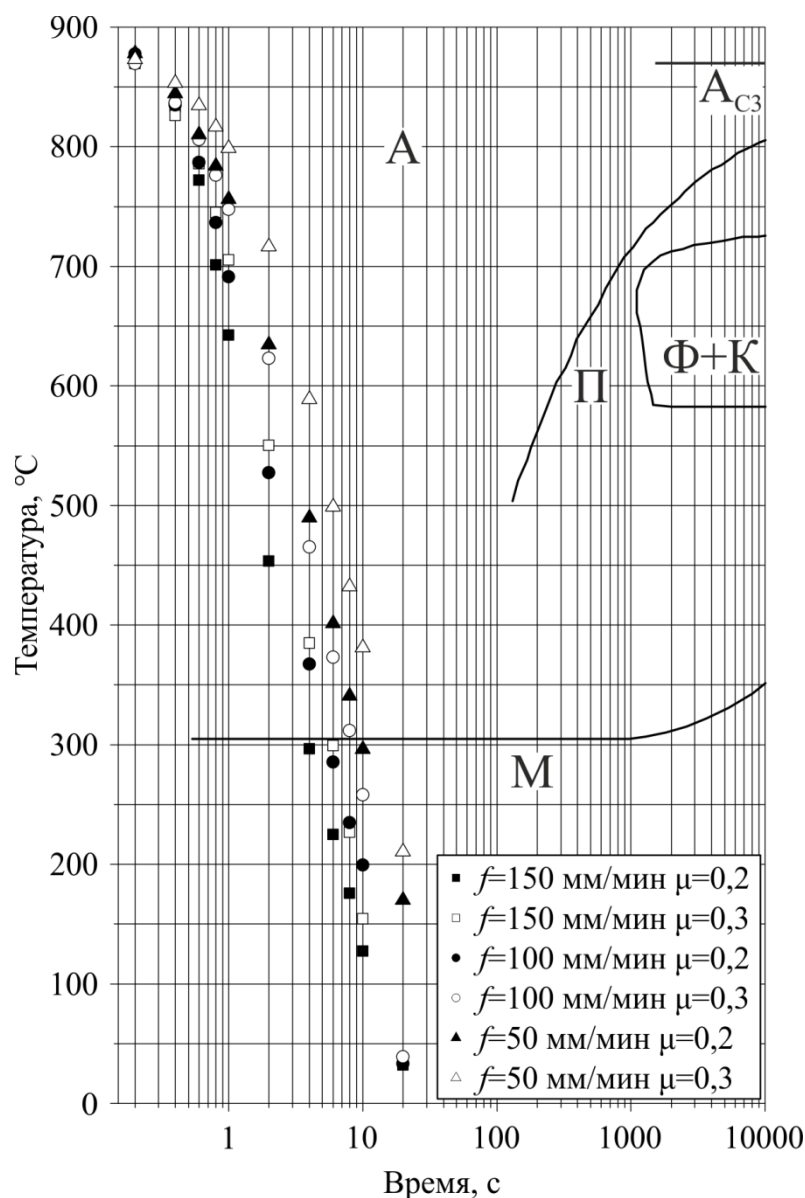


Рисунок 3.11 – Диаграмма непрерывного охлаждения стали 20X13 по результатам конечно-элементного моделирования ОТП

Полученные результаты показывают, что скорость охлаждения чувствительна как к величине подачи, так и к коэффициенту трения. Однако для рассмотренных режимов подачи скорость охлаждения $v_{\text{охл}}$ значительно превосходит критическую скорость закалки стали 20X13.

3.4 Конечно-элементное моделирование поверхностной закалки кольцевого участка стали 20X13 при движении инструмента по концентрическим окружностям

Моделирование ОТП кольцевого участка при движении инструмента по концентрическим окружностям осуществлялось по траекториям с диаметром 34, 44 и 54 мм. Линейная подача вдоль траектории задавалась равной 100 мм/мин.

Для характеристики процессов, протекающих в обрабатываемой поверхности в течение полного цикла обработки взяты температурно-временные зависимости проб, размещенных в ключевых точках А1...А8, расположенных в узлах сетки конечных элементов (рисунок 3.12).

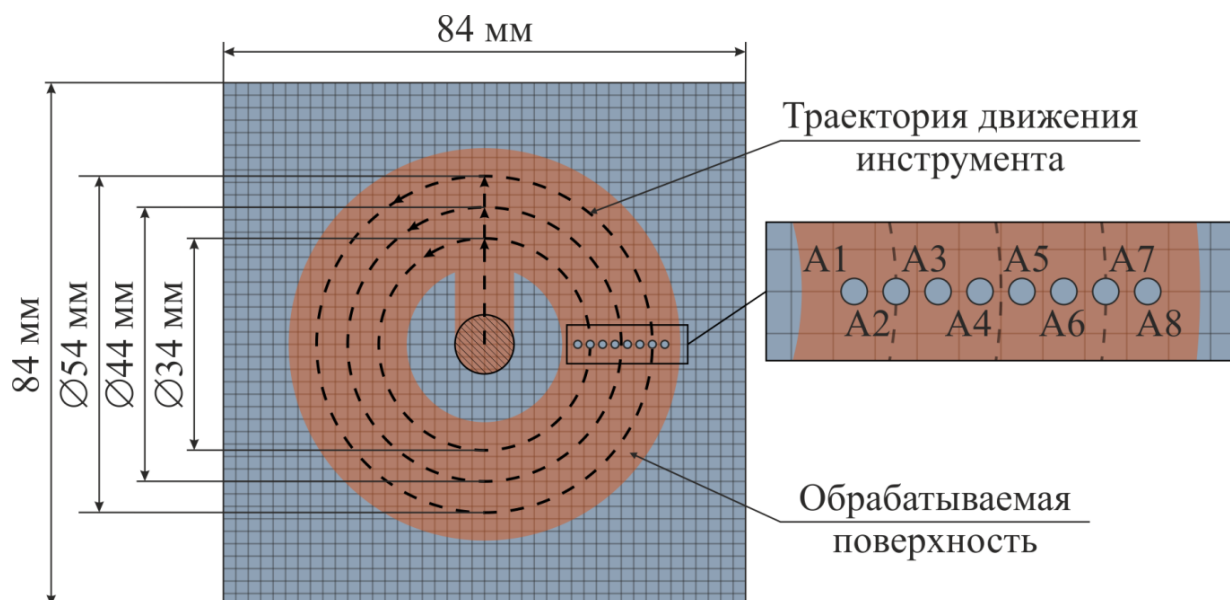


Рисунок 3.12 – Траектория движения инструмента вдоль концентрических окружностей и точки размещения проб А1...А8 в узлах сетки конечных элементов

Результаты симуляции показывают, что при обработке кольцевой поверхности при движении инструмента вдоль концентрических окружностей температура нагрева в контактной зоне стабилизируется на уровне ~ 1300 °С (рисунок 3.13). Расчётная температура нагрева материала в контактной зоне существенно превышает критическую точку A_{C3} , что обеспечит формирование аустенитной структуры и возможность закалки обрабатываемой поверхности.

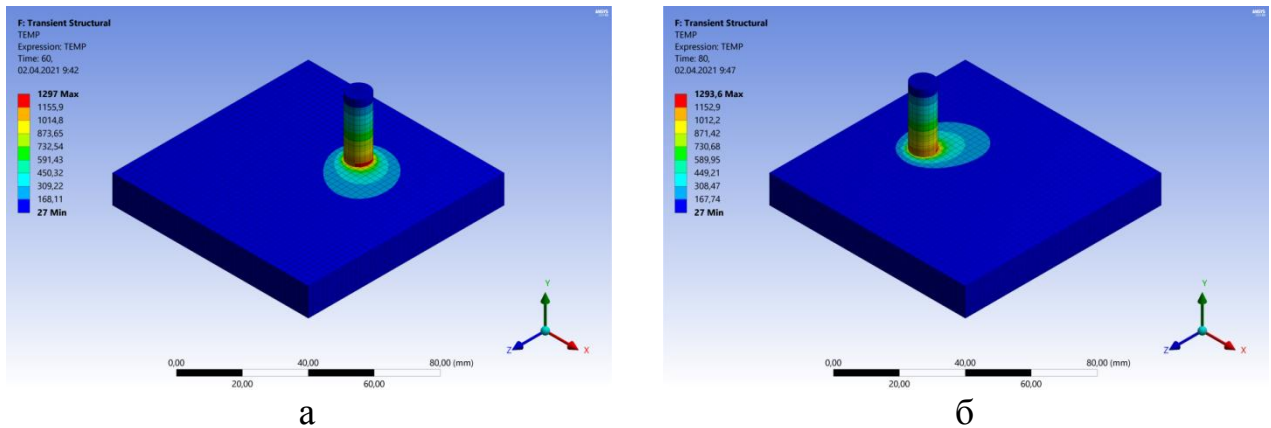


Рисунок 3.13 – Температурные поля в системе инструмент-деталь при обработке по концентрическим окружностям на 60 секунде (а) и 80 секунде (б) процесса

Анализ температурно-временных характеристик, полученных в размещенных пробах, показывает, что в каждой ключевой точке имеет место три последовательных импульсных нагрева (рисунок 3.14).

Вблизи внутреннего края обрабатываемой поверхности в точках A1 и A2 первый импульс имеет самую большую амплитуду, достигающую $\sim 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом амплитуда второго импульса превышает $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в точке A1 и $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в точке A2. В результате этого в точке A1 закаленный при первом проходе материал претерпевает отпуск, в результате которого твердость может существенно снизиться. В точке A2 происходит частичная аустенизация закаленной при первом проходе поверхности, что должно также негативно сказаться на твердости, особенно в глубине поверхности.

По мере удаления от центра обрабатываемой кольцевой поверхности в точках A3 и A4 первый и второй импульсы имеют амплитуду, превышающую критическую точку A_{C3} . В результате этого обрабатываемый материал претерпевает два последовательных цикла аустенизации и закалки, что в свою очередь не должно оказать влияния на результирующую твердость. Однако в данных точках третий импульс нагрева имеет амплитуду, превышающую $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ в точке A3 и $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в точке A4.

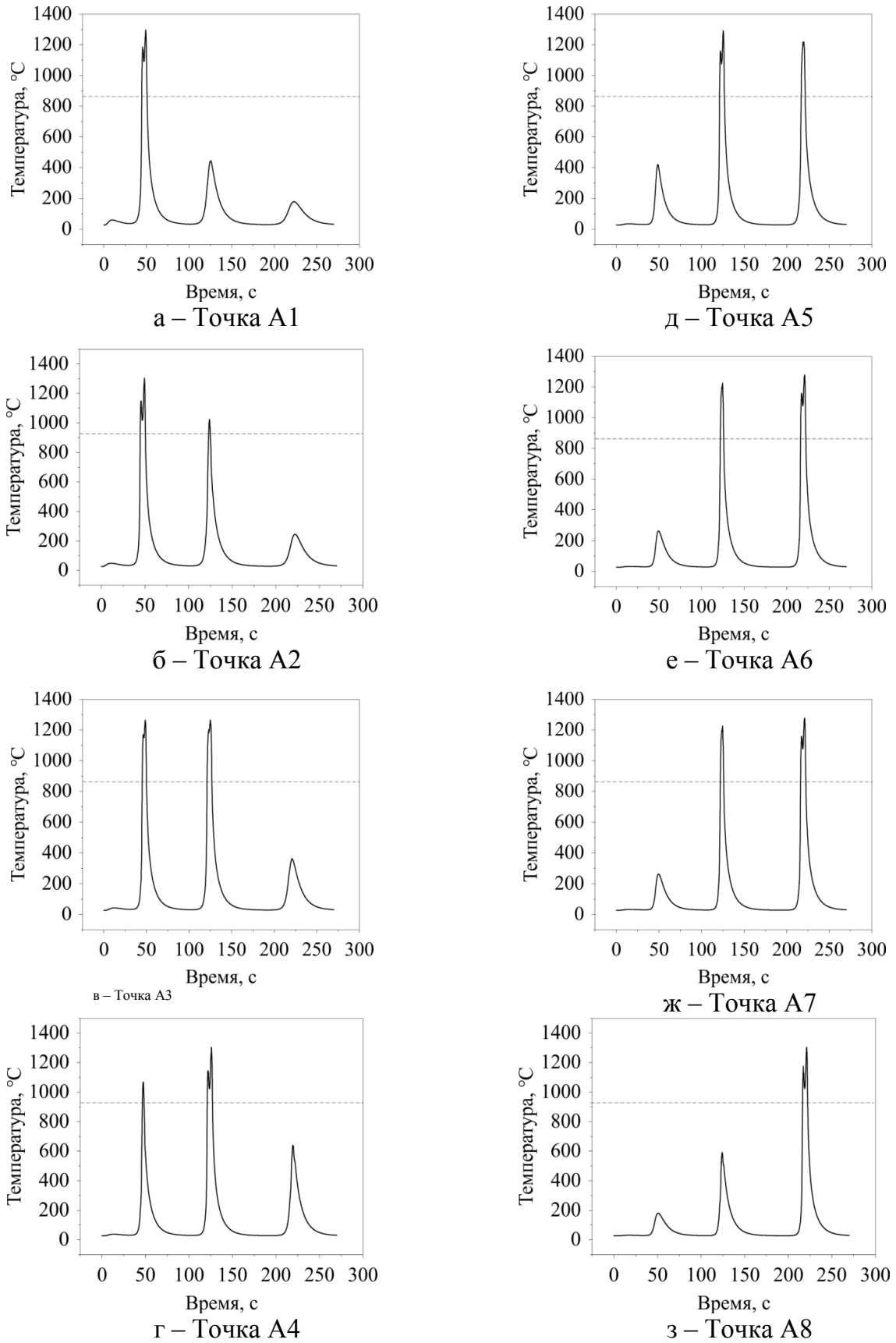


Рисунок 3.14 – Температурно-временные зависимости в ключевых точках А1...А8 траектории движения вдоль concentрических окружностей

Подобный нагрев закаленной поверхности неизбежно приведет к её отпуску и, соответственно, снижению твердости. При дальнейшем отступлении от центра в точках А5...А7 первый импульс нагрева имеет амплитуду менее 400 °С а два последних достигают ~1300 °С. В результате такого нагрева материал претерпевает два последовательных цикла аустенизации и закалки, что не должно оказать влияние на твердость обработанной поверхности. При этом после цикла закалки не происходит последующего нагрева до температур отпуска. Наконец вблизи наружного края обрабатываемой поверхности первые два импульса нагрева малы и не приводят к фазовым превращениями. В то же время последний импульс имеет амплитуду ~1300 °С и должен обеспечить закалку.

На основе проведенного анализа можно заключить, что обработка широкой поверхности при движении инструмента вдоль концентрических окружностей различного диаметра имеет существенные проблемы в равномерности упрочнения. Так, только поверхность, находящуюся в контактной зоне инструмента при его движении вдоль последней концентрической окружности возможно обеспечение равномерного упрочнения. Остальные участки обрабатываемой поверхности претерпевают отпуск, вызванный температурным полем от движения инструмента вдоль соседней концентрической поверхности.

3.5 Конечно-элементное моделирование поверхностной закалки кольцевого участка при веерной траектории движения инструмента

Для анализа температурных колебаний, возникающих в материале при ОТП кольцевой поверхности с веерной траекторией движения материала, разработана конечно-элементная модель типа transient structural с использованием APDL в программном пакете ANSYS Workbench 2019 R3. Геометрическая модель представляет собой квадратный брусок со стороной в 45 мм толщиной 15 мм с расположенным на нём пальцем диаметром 10 мм с фаской 0,5 мм (рисунок 3.15).

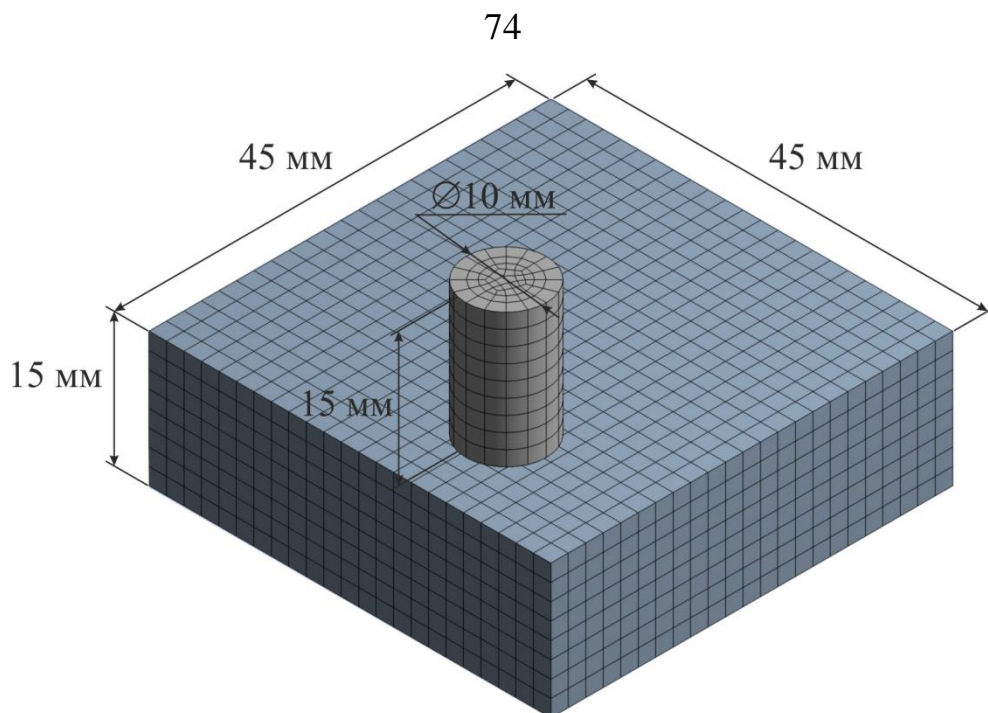


Рисунок 3.15 – Геометрическая модель процесса ОТП при веерной траектории движения инструмента с наложенной сеткой конечных элементов

Для проведения смежных расчётов деформации и теплопередачи на геометрические модели наложена гексаэдрическая сетка конечных элементов типа SOLID226. Как на пальце, так и на обрабатываемой детали нанесение сетки конечных элементов выполнено методом Multizone. Линейные размеры конечных элементов, нанесенных на обрабатываемой детали, составляют ~2 мм. Размеры элементов на пальце составляют ~1 мм. В модели использован асимметрический неразрывный фрикционный контакт пальца и обрабатываемой детали с использованием конечных элементов типа CONTA174 и TARGE170 у которых задана идеальная теплопроводность ($\lambda=1E+06$ Вт/м²°С). Рассеивание тепла с поверхностей инструмента и детали в окружающую среду задано с использованием элементов типа SURF152. В контактной зоне инструмента задано тепловыделение мощностью 1000 Вт, что соответствует ОТП при коэффициенте трения 0,22, нормальной силе 3500 Н и частоте вращения 4000 об/мин. Начальные условия для инструмента и обрабатываемой детали заданы следующим образом: $T(x,y,z,t=0) = \text{const} = +22$ °С.

В рамках модели выполнена симуляция температурных полей при ОТП с предварительным разогревом в течение 5 секунд и дальнейшим движением инструмента по веерной траектории длиной 15 мм с шагом $8,5^\circ$ при линейной подаче 500 мм/мин. Величина подачи выбрана таким образом, чтобы при заданной траектории движения инструмента температурное пятно перемещалось вдоль обрабатываемой кольцевой поверхности с линейной скоростью 100 мм/мин.

Из полученных результатов видно, что в процессе ОТП при веерной траектории движения инструмента формируется широкое температурное пятно, медленно движущееся вдоль обрабатываемого кольца (рисунок 3.16). Однако температура нагрева в данном пятне находится в пределах от 400 до 600 °С, что недостаточно для аустенизации. В то же время температура в контактной зоне превышает 900 °С, что может обеспечить необходимые фазовые превращения для закалки поверхности.

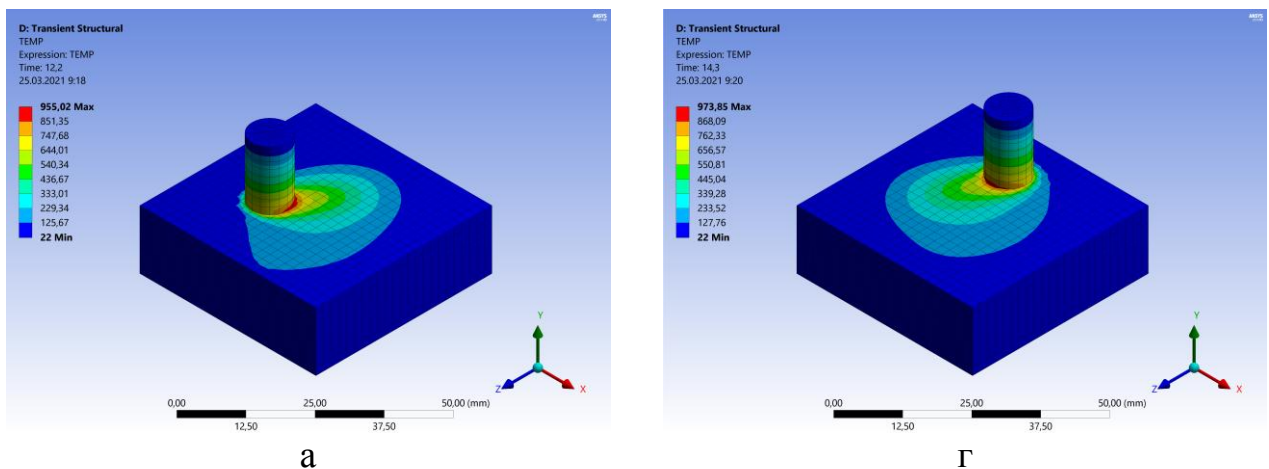


Рисунок 3.16 – Температурные поля в системе инструмент-деталь при веерной траектории обработки на 12,2 секунде (а) и 14,3 секунде (б) процесса

Для более точного понимания процессов, происходящих в обрабатываемом материале в процессе ОТП при веерной траектории движения инструмента, на обрабатываемой поверхности взяты пробы температур. Пробы размещены в узлах сетки конечных элементов расположенных в ключевых точках веерной траектории (рисунок 3.17). При этом пробы А2...А7 и Б2...Б6

находятся непосредственно на целевой кольцевой поверхности, а остальные пробы – за её пределами.

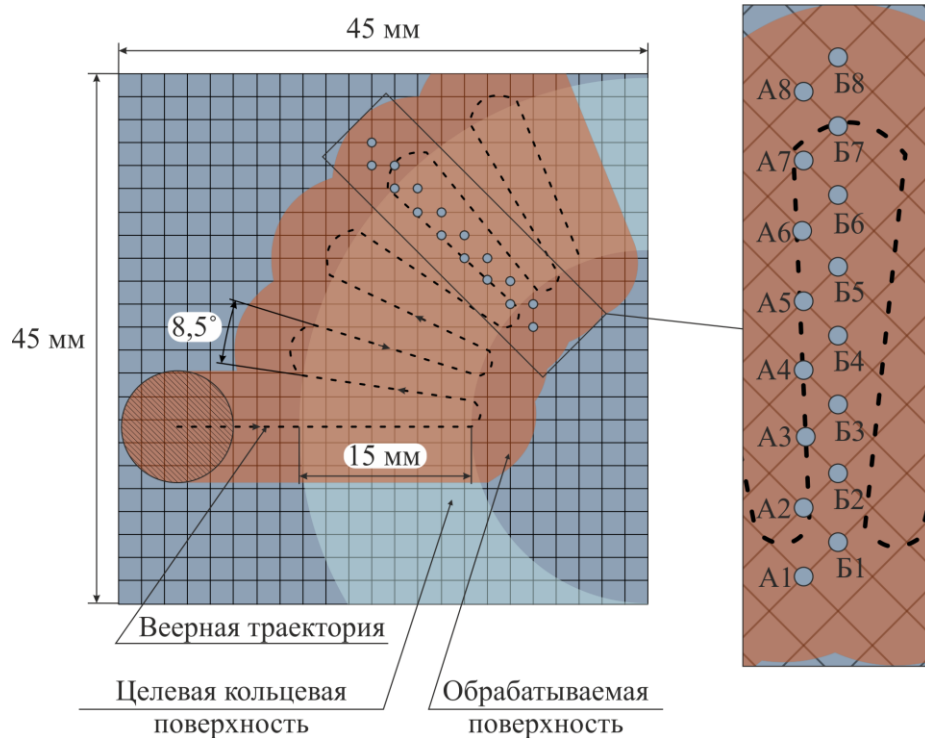


Рисунок 3.17 – Веерная траектория движения инструмента и точки размещения проб температуры (A1...A8 и B1...B8) в узлах сетки конечных элементов

Веерная траектория задана таким образом, чтобы с большим запасом перекрывать целевую кольцевую поверхность, закалку которой требуется провести. В реальном приложении в пределах целевой кольцевой поверхности необходимо обеспечить равномерную твёрдость и толщину упрочнённого слоя.

В ключевых точках линии А, расположенных непосредственно вдоль движения инструмента наблюдается импульсный характер изменения температуры (рисунок 3.18). Так, в точке А1, расположенной за пределами целевой кольцевой поверхности происходит три последовательных нагрева до температур, не превышающих температуру критической точки A_{C3} ($870\text{ }^{\circ}\text{C}$). В результате этого в поверхности не может образоваться аустенит и, следовательно, произойти закалка при последующем охлаждении. В точке А2 также имеет место три последовательных нагрева. Однако амплитуда двух последних импульсов превышает $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, что выше критической точки A_{C3} стали 20Х13.

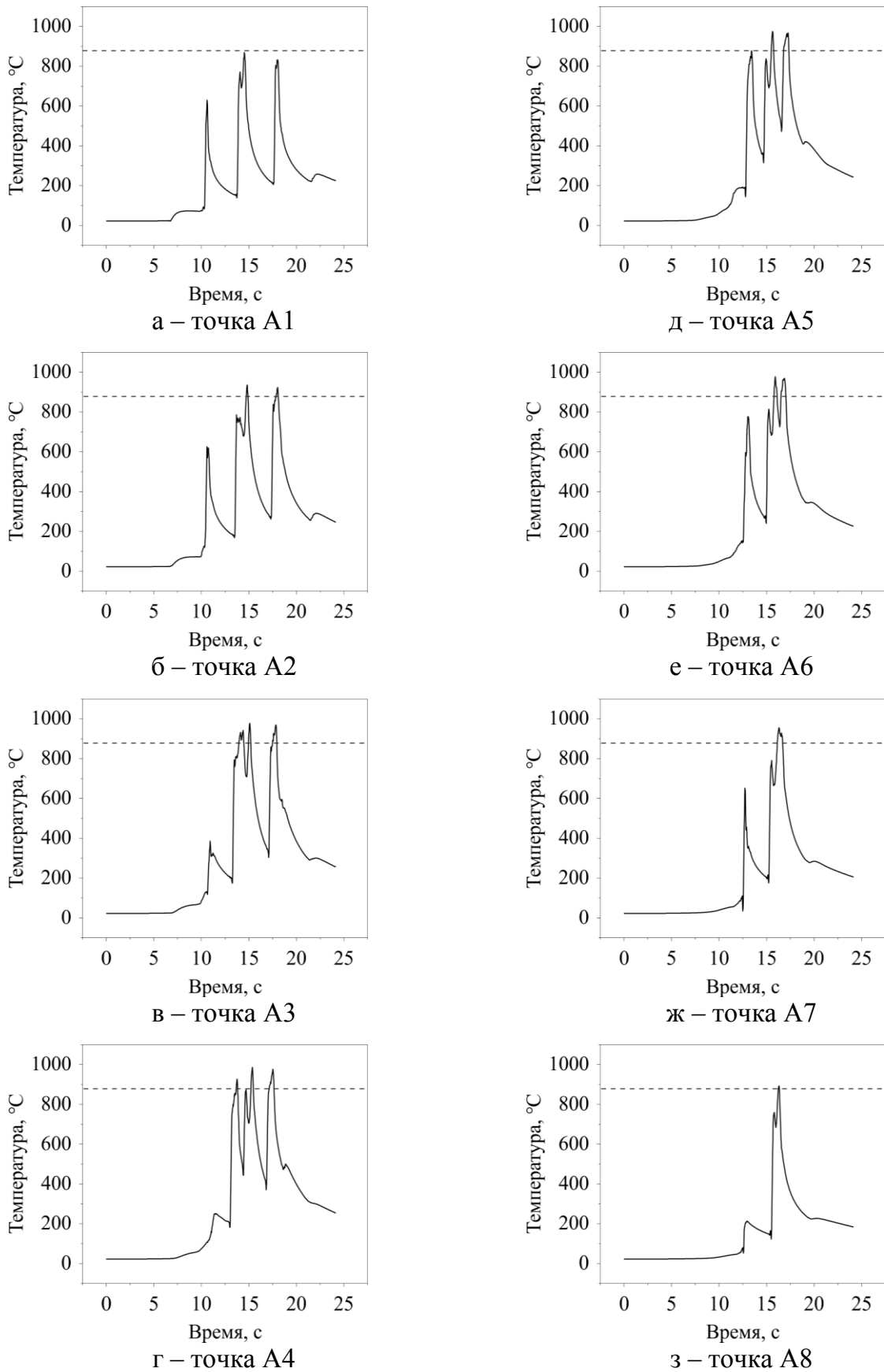


Рисунок 3.18 – Температурно-временные зависимости в ключевых точках А1...А8 веерной траектории движения инструмента

Похожий характер имеют температурно-временные характеристики в точках А3...А5, где также наблюдается три последовательных импульсных нагрева до температуры более 950 °С. Характер последующих точек линии А несколько иной. В точке А6 наблюдается только два характерных импульса, где последний превышает температуру критической точки, но в своём амплитудном положении имеет некоторые колебания. В точке А7 наблюдается аналогичный характер температурно-временной характеристики но величина первого и второго импульсов меньше, чем в точке А6. Аналогично и в точке А8, однако амплитуда второго импульса лишь на 10 °С превышает величину А_{С3}.

Характер температурно-временных характеристик в ключевых точках на линии Б существенно отличается от линии А (рисунок 3.19). Так, в точках Б1...Б4 имеют место четыре последовательных импульсных нагрева. При этом критическую точку А_{С3} превышают только второй и третий импульсы. Кроме того, при охлаждении после третьего импульса температура не падает ниже границы мартенситного превращения до того момента как снова начинает повышаться при четвертом импульсе. В результате этого обрабатываемый материал продолжительное время находится в диапазоне температур перлитного превращения. Вследствие этого при охлаждении мартенситная фаза может либо не образовываться вовсе, либо её доля может значительно уменьшиться.

В точке Б4 этот эффект имеет максимальное проявление, поскольку после третьего импульса температура снижается до ~450 °С после чего вновь повышается до ~600 °С. В точках Б5...Б8 температурно-временная характеристика включает в себя три последовательных импульса нагрева. При этом в точках Б5...Б7 только второй импульс по амплитуде превышает точку А_{С3}. При этом третий импульс вызывает повышение температуры на ~50 °С относительно температуры, имеющей место при охлаждении после второго импульса

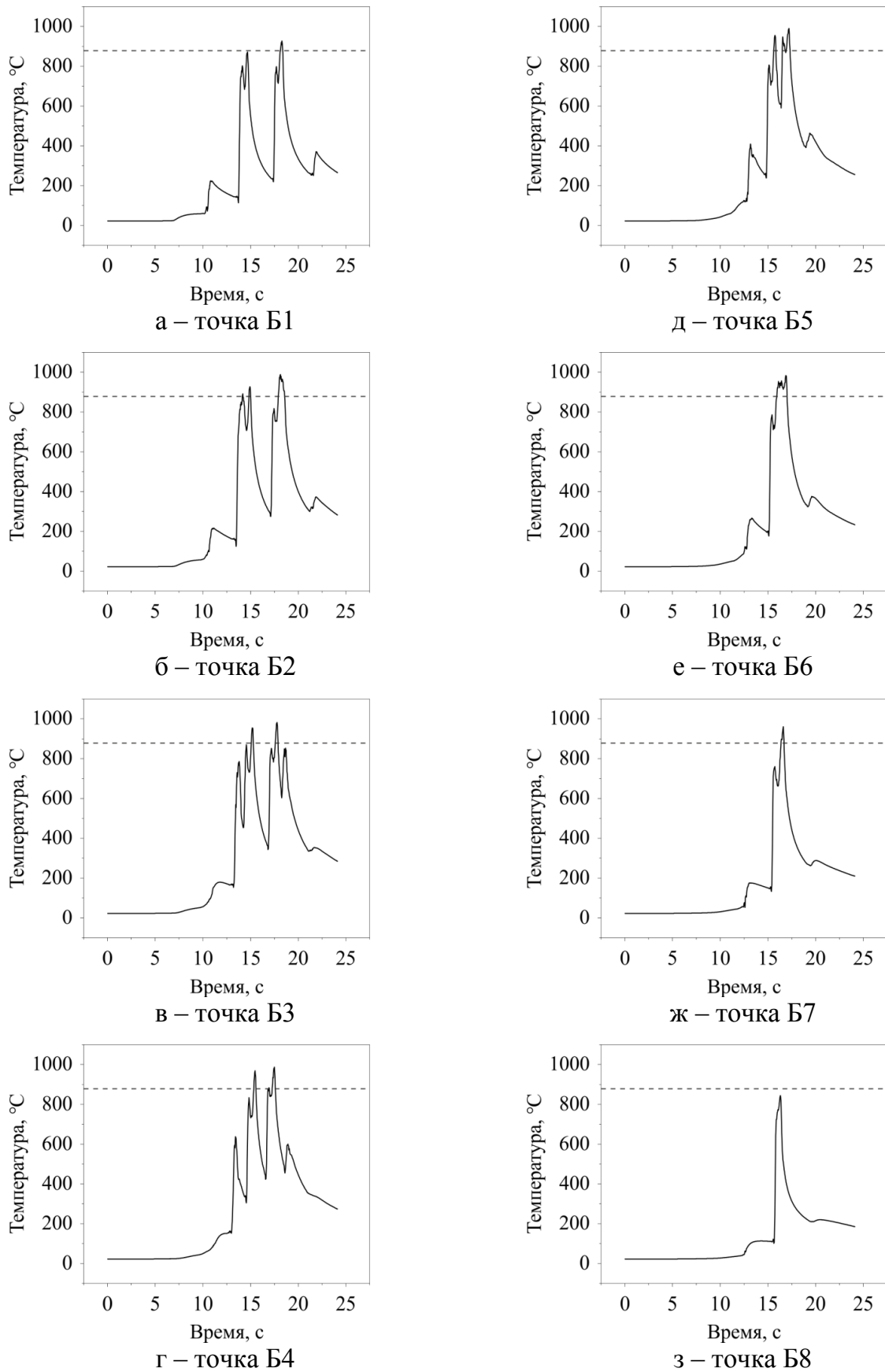


Рисунок 3.19 – Температурно-временные зависимости в ключевых точках Б1...Б8 верной траектории движения инструмента

В результате этого несколько замедляется скорость охлаждения, что может негативно сказаться на результирующей твердости. В точке Б8 температура нагрева не превышает 800 °С и не приводит к закалке.

Полученные результаты показывают, что при веерной траектории обработки в пределах целевой кольцевой поверхности обеспечивается аустенизация поверхности с последующей закалкой поверхностного слоя. При этом также наблюдается отсутствие эффекта самоотпуска, имеющего место при движении инструмента вдоль концентрических окружностей. Таким образом, можно утверждать, что веерная траектория движения инструмента способна обеспечить равномерное упрочнение широкой кольцевой поверхности. Однако амплитудные значения температуры импульсов нагрева при веерной траектории и линейной подачи 500 мм/мин существенно ниже по сравнению с движением вдоль концентрических окружностей, что, по всей видимости, приведет к меньшей толщине закаленного поверхностного слоя.

Выводы по третьему разделу

1 Разработаны конечно-элементные тепловые модели ОТП в пакете ANSYS Mechanical Workbench 2019 R3, позволившие установить влияние технологических параметров процесса и коэффициента трения на изменение температуры в обрабатываемой стали и инструменте на этапах предварительного разогрева, аустенизации и охлаждения при прямолинейном движении инструмента, а также при движении по концентрическим окружностям и веерной траектории.

2 Установлено, что оптимальной механической нагрузкой при поверхностной закалке стали 20Х13 с температурой нагрева $T_m=1000\dots1100$ °С являются величина нормальной силы $F_n=3500$ Н, частота вращения инструмента $n=4000$ об/мин и коэффициент трения $\mu\approx 0,3$.

3 Выявлено, что поверхностная закалка в процессе ОТП с температурой нагрева $T_m=1050$ °С на глубинах до 1,25 мм возможна только при подаче инструмента не более 100 мм/мин.

4 Установлено, что траектория движения инструмента по концентрическим окружностям малоэффективна для поверхностной закалки в процессе ОТП кольцевых участков поверхностей шириной более двух диаметров инструмента вследствие проявления эффекта самоотпуска в зонах перекрытия дорожек трения.

5 Определено, что в процессе ОТП кольцевых участков стали 20X13 при движении инструмента по веерной траектории движения инструмента создается стабильное тепловое пятно с температурой близкой и выше A_{C3} , что позволяет исключить самоотпуск и обеспечить равномерное упрочнение по ширине и глубине поверхностного слоя участка.

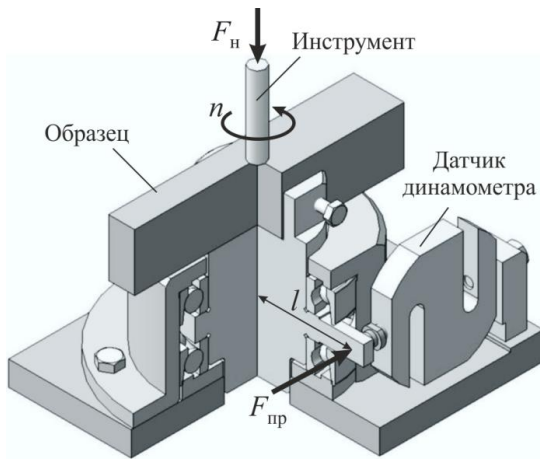
4 Экспериментальные исследования термического цикла поверхностной закалки, микротвердости и структуры поверхностного слоя в процессе однопроходной обработки трением с перемешиванием

В четвертом разделе приведены результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса ОТП стали 20Х13 на изменение коэффициента трения, микротвердости и температуры поверхностного слоя на этапе разогрева, а также аустенизации и охлаждения при однопроходной обработке.

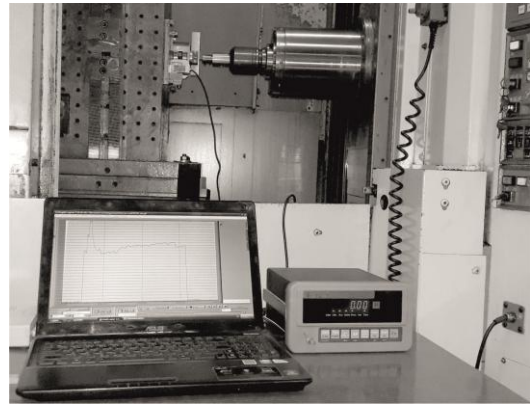
Целью экспериментальных исследований ОТП в цикле разогрева и за один проход инструмента являлось подтверждение адекватности выбора коэффициента трения μ и оптимальной комбинации технологических параметров (F_n , n и f_n), а также времени разогрева t_p , установленных при КЭМ процесса по критериям обеспечения допустимых температурно-временных параметров термического цикла, а также целостности поверхности и максимальной глубины упрочнения обрабатываемой стали.

4.1 Исследование закономерностей изменения коэффициента трения и состояния контактной поверхности на этапе разогрева материала

Оценка коэффициента трения μ в цикле разогрева материала вращающимся цилиндрическим инструментом с плоским торцом осуществлялась впервые при исследовании процесса ОТП (FSP) на основе определения приведенного крутящего момента $M_{пр} = F_{пр}l$ с помощью специально разработанного трибометрического устройства (рисунок 4.1). Сила $F_{пр}$ измерялась с помощью датчика типа PST-50, входящего в состав динамометра АЦД 2С-05/1И-1 (рисунок 4.1, а).



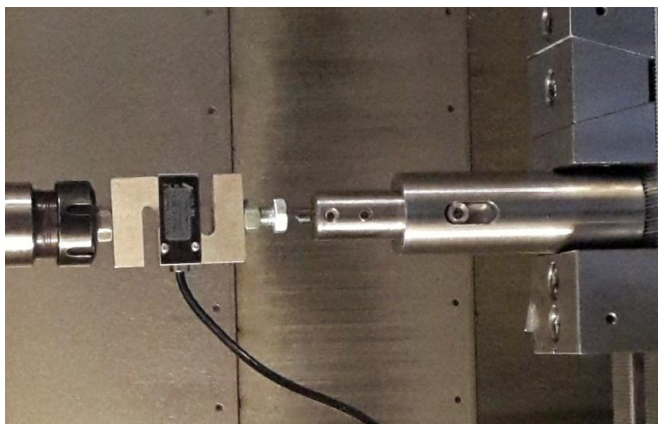
а



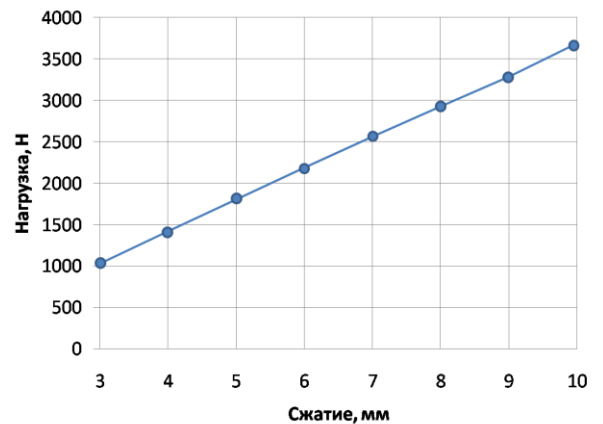
б

Рисунок 4.1 – Схема трибометрического устройства (а) и общий вид измерительного комплекса на базе динамометра АЦД 2С-05/1И-1 (б) для оценки коэффициента трения по крутящему моменту

Для задания величины нормальной силы F_n была выполнена тарировка пружины в державке инструмента с помощью динамометра модели АЦД 2С-05/1И-1, на станке Mikron VCE 600 Pro (рисунок 4.2, а). По результатам тарировки получена зависимость, представленная на рисунке 4.2, б.



а



б

Рисунок 4.2 – Тарировка зависимости нормальной силы от величины сжатия пружины в державке инструмента с применением динамометра АЦД 2С-05/1И-1 (а) и тарировочная зависимость (б)

Используя зависимость Ø. Frigaard [43] для величины крутящего момента инструмента в процессе ОТП $M = \frac{2}{3} \mu F_n R_n$ и при условии равенства $M = M_{пр}$ получена формула для вычисления коэффициента трения:

$$\mu = \frac{3F_{\text{пр}}l}{2F_{\text{н}}R_{\text{и}}} \quad (4.1)$$

Изменение величины коэффициента трения μ в зависимости от времени разогрева t_p и частоты вращения инструмента устанавливалось для выявленной методом КЭМ процесса ОТП оптимальной величины нормальной силы $F_{\text{н}} = 3500$ Н и при частотах вращения инструмента $n = 1000, 2000, 3000$ и 4000 об/мин, обеспечивающих температуру нагрева материала в пределах $650 \dots 1200$ °С (раздел 3). Экспериментальные исследования ОТП в цикле разогрева проводились на двух сторонах образца в виде прямоугольного параллелепипеда сечением 30×30 мм и длиной 120 мм на обрабатывающем центре МА-600 (OKUMA) с последовательным разогревом в $5, 10, 15$ секунд для каждой из частот вращения (рисунок 4.3, а). Время разогрева задавалось программно. Шаг контактных зон инструмента составлял 15 мм. Начало каждого последующего разогрева проводилось после подъема и охлаждения инструмента в течение не менее 5 минут. Пример участка исследований разогрева на одной из сторон образца представлен на рисунке 4.3, б.

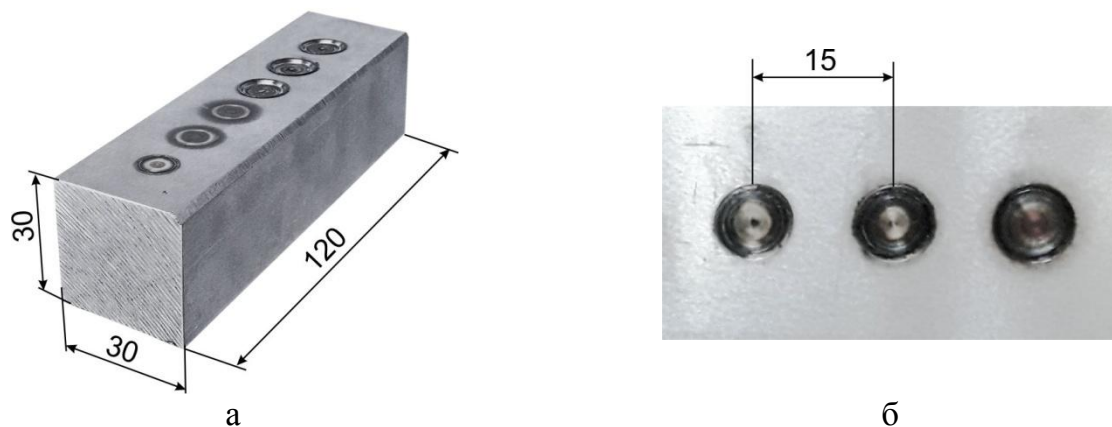


Рисунок 4.3 – Образец со следами контакта инструмента с поверхностью при исследовании коэффициента трения в процессе ОТП на этапе разогрева (а) и увеличенный фрагмент участка поверхности (б)

Расчет величины коэффициента трения по формуле (4.1) осуществлялся в программе OriginPro 2019 и представлен на рисунке 4.4, а. Зависимость

коэффициента трения μ от частоты вращения инструмента n в установившемся режиме показана на рисунке 4.4, б.

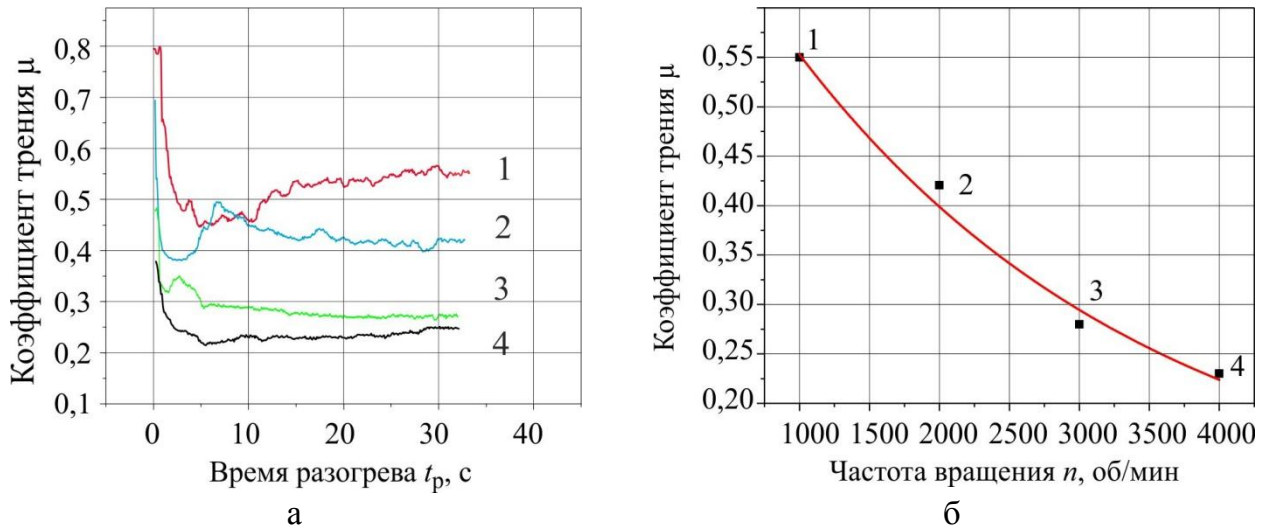


Рисунок 4.4 – Динамика изменения коэффициента трения μ в процессе разогрева контактной зоны (а) и при различной частоте вращения инструмента (б)

Влияние времени разогрева t_p , частоты вращения инструмента n и коэффициента трения μ на формирование микропрофиля поверхности в контактной зоне инструмента исследовалось на 3D-профилометре WYKO NT1100 (рисунки 4.5–4.6, 4.8–4.9).

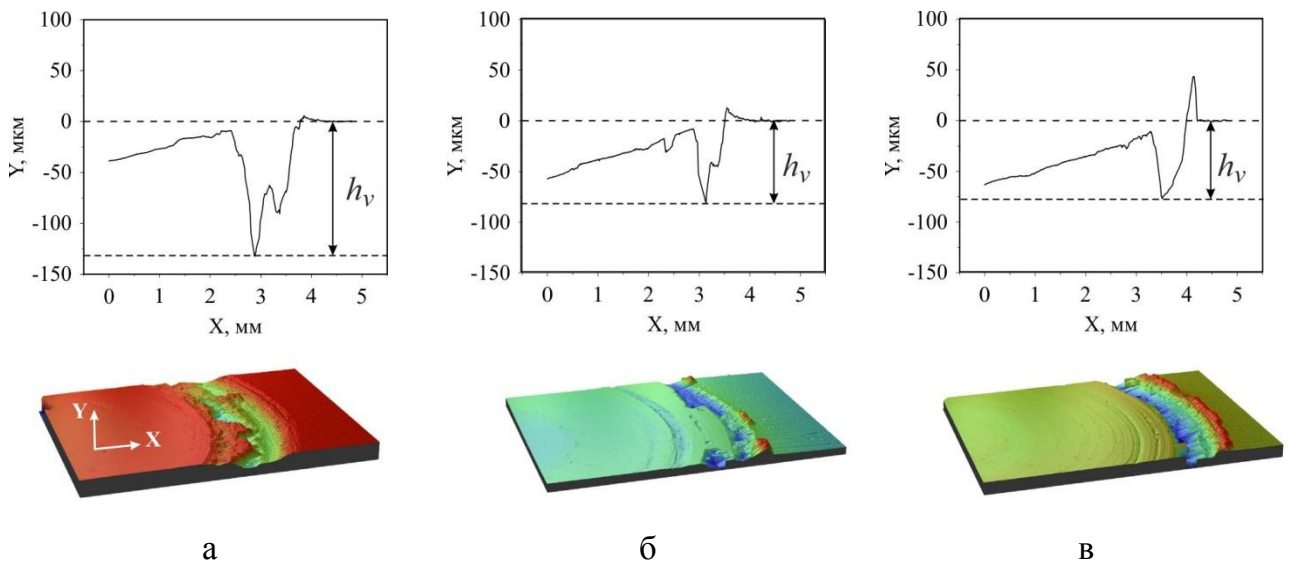


Рисунок 4.5 – Изменение профиля поверхности в контактной зоне инструмента от времени нагрева при $F_H=3500$ Н и $n=1000$ об/мин: а – 5 с; б – 10 с; в – 15 с

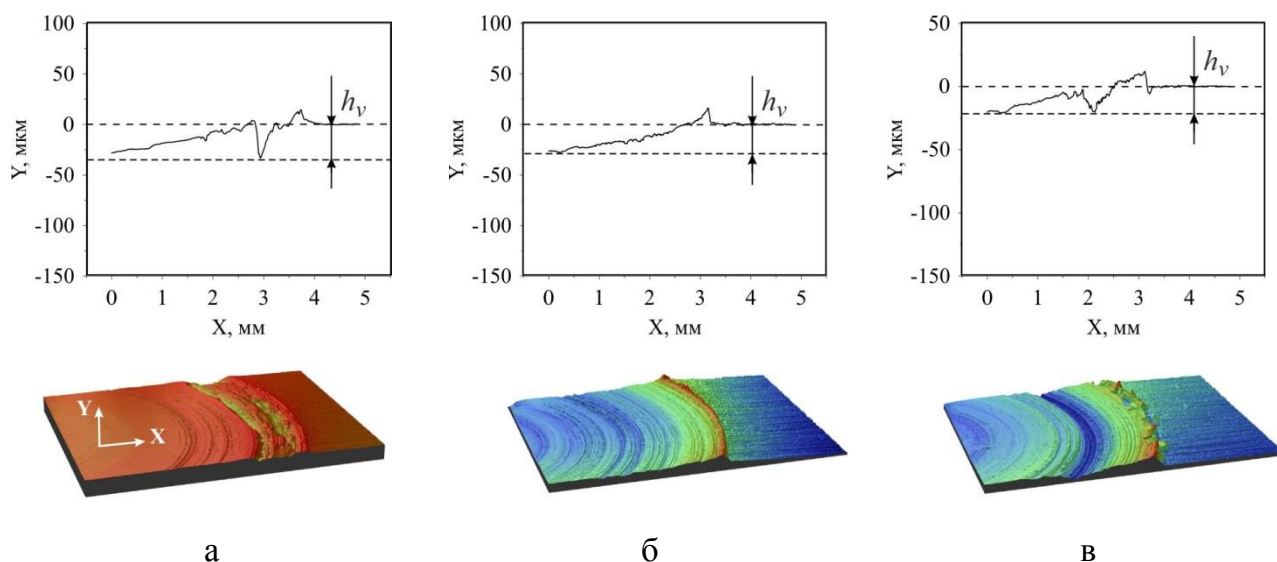


Рисунок 4.6 – Изменение профиля поверхности в контактной зоне инструмента от времени нагрева при $F_H=3500$ Н и $n=2000$ об/мин: а – 5 с; б – 10 с; в – 15 с

Впервые установлено, что при скоростях вращения 1000 и 2000 об/мин инструмент и обрабатываемый материал в первые 2...3 с обработки разогреваются недостаточно, что и вызывает повышенный коэффициент трения $\mu = 0,7...0,8$. Происходит адгезия обрабатываемой стали, налипание ее на рабочую поверхность инструмента (рисунок 4.7). Поверхность в контактной зоне углубляется на величину h_v . По мере разогрева ($t_p \geq 10$ с) коэффициент трения снижается до $\mu = 0,4...0,55$ и стабилизируется.

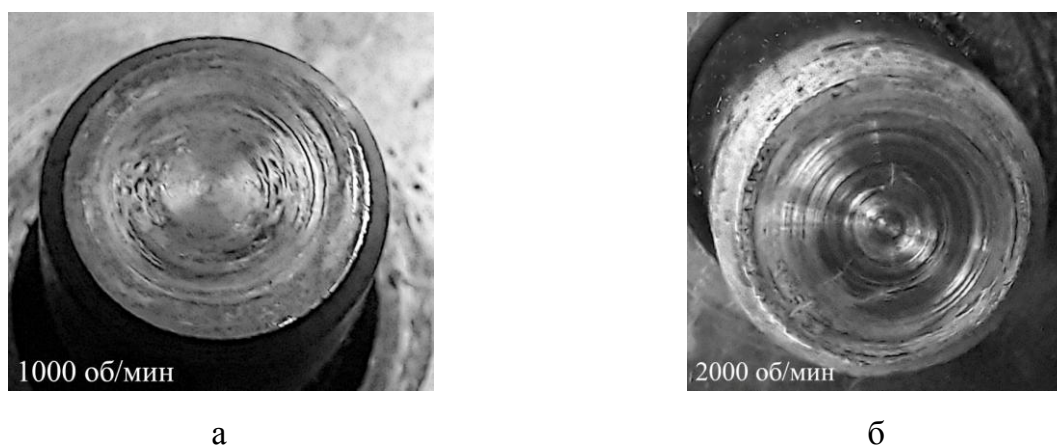


Рисунок 4.7 – Поверхности рабочего торца инструмента со следами износа и адгезионного переноса стали 20X13 после ОТП на этапе разогрева с частотой вращения $n=1000$ об/мин (а) и $n=2000$ об/мин (б)

Изменения величины коэффициента трения μ в цикле разогрева материала при частотах вращения 3000 и 4000 об/мин существенно отличаются

от полученных выше ($n=1000$ и 2000 об/мин). Значительно большее тепловыделение уменьшает адгезию стали 20Х13 на инструмент. Максимальная глубина унесенного адгезией слоя с поверхности контактной зоны h_v при времени разогрева $5...10$ с составляет не более $12...18$ мкм. Однако при увеличении времени разогрева до 15 с происходит формирование конического углубления с концентрическими кольцами эрозии стали от центра к периферии контактной зоны величиной $h_v \approx 20...45$ мкм вследствие адгезионного переноса обрабатываемого материала на инструмент.

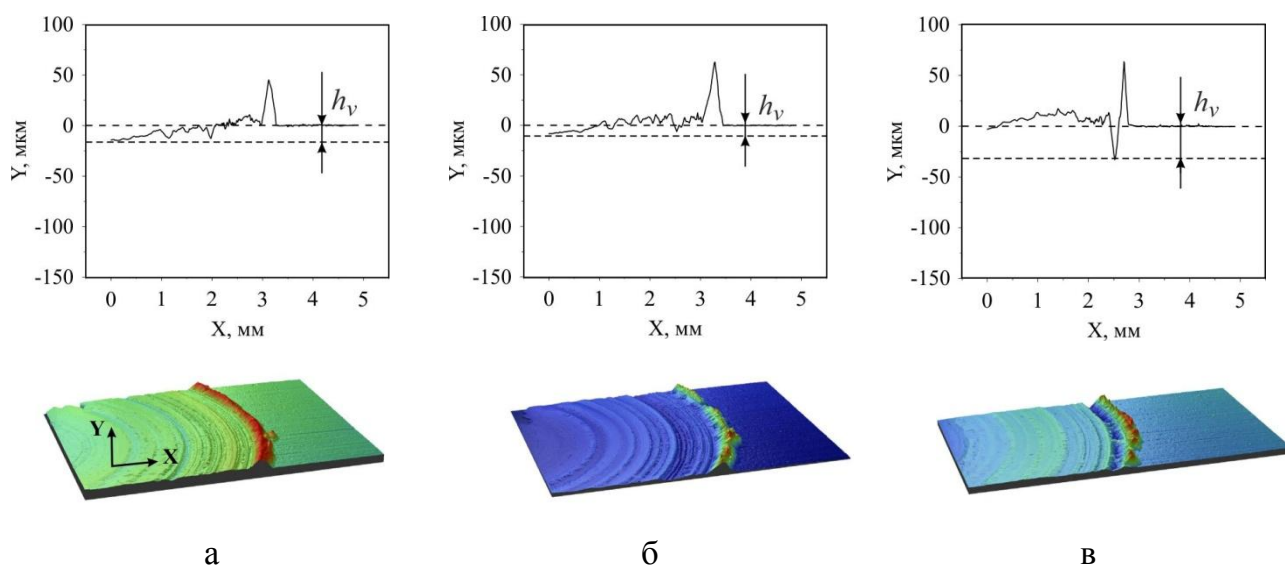


Рисунок 4.8 – Изменение профиля поверхности в контактной зоне инструмента от времени нагрева при $F_n=3500$ Н и $n=3000$ об/мин: а – 5 с; б – 10 с; в – 15 с

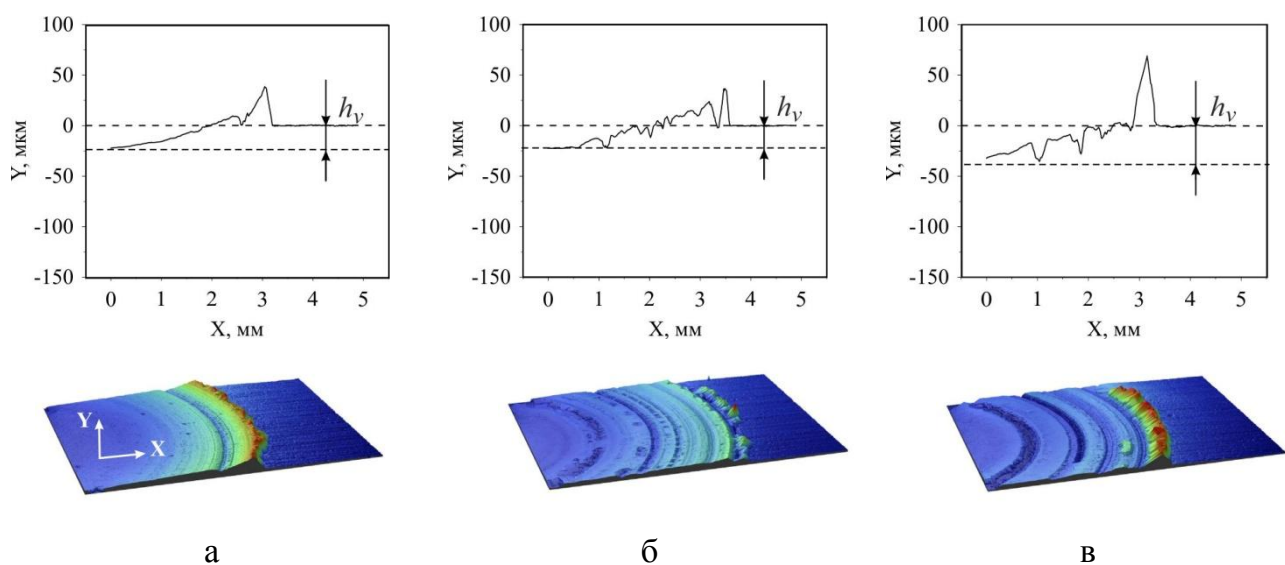


Рисунок 4.9 – Изменение профиля поверхности в контактной зоне инструмента от времени нагрева при $F_n=3500$ Н и $n=4000$ об/мин: а – 5 с; б – 10 с; в – 15 с

Поверхности торцов инструмента после разогрева $t_p=5$ с с частотами вращения инструмента $n=3000$ об/мин и $n=4000$ об/мин, приведенные на рисунке 4.10, а, б, показали значительно меньшее налипание обрабатываемого материала.

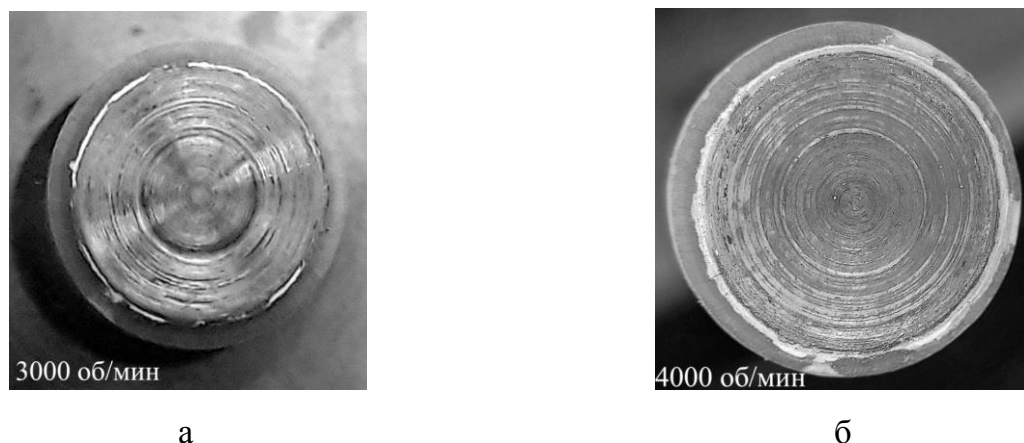


Рисунок 4.10 – Поверхности рабочего торца инструмента со следами износа и адгезионного переноса стали 20X13 после ОТП на этапе разогрева с частотой вращения $n=3000$ об/мин (а) и $n=4000$ об/мин б)

По результатам исследований построена трехмерная зависимость износа стали h_v от времени разогрева t_p и частоты вращения инструмента n (рисунок 4.11).

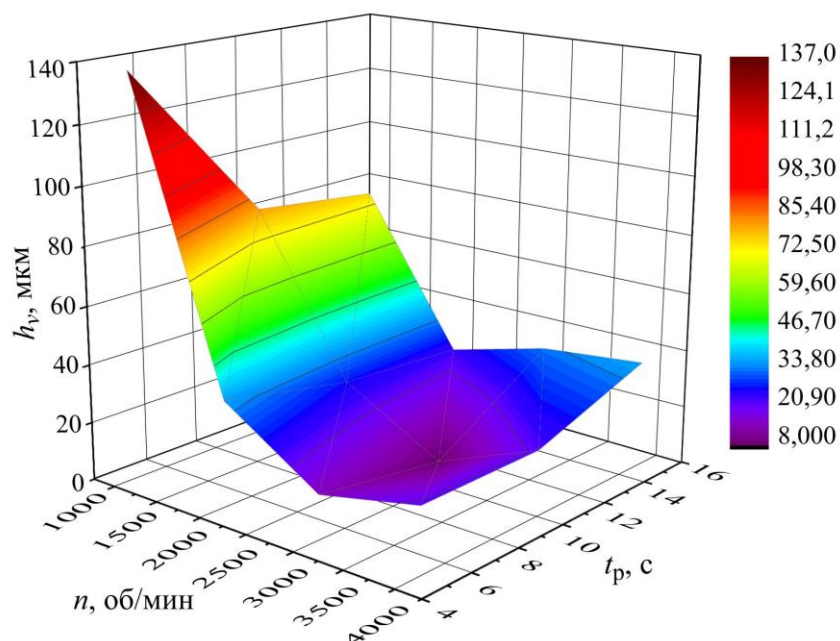


Рисунок 4.11 – Зависимость глубины эрозионной канавки h_v от частоты вращения инструмента n и времени разогрева t_p

Таким образом, экспериментально выявлено, что наиболее благоприятным режимом разогрева стали 20Х13 является продолжительность $t_p=5\dots 6$ с с частотой вращения инструмента 3000...4000 об/мин при нормальной силе $F_n=3500$ Н.

4.2 Исследование закономерностей изменения параметров термического цикла в зависимости от подачи инструмента при однопроходной ОТП

Для проведения ОТП с однократными проходами инструмента было изготовлено 2 образца толщиной 15 мм, позволяющих формировать на каждом не менее 4-х дорожек трения длиной 60 мм (рисунок 4.12, б).

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 выполнены отверстия диаметром 1,5 мм для установки термопар 1...4 марки ТХА типа К (рисунок 4.12, б). Подача инструмента принималась равной 25; 50; 75; 100; 125; 150 и 175 м/мин.

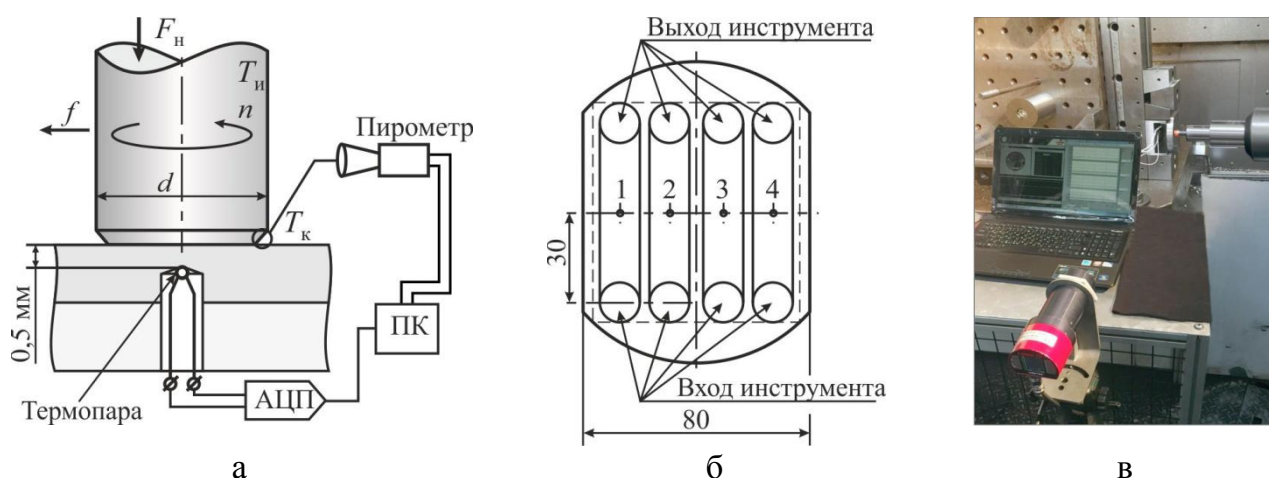


Рисунок 4.12 –Схема измерения температуры в поверхностном слое термопарами и пирометром в контактной зоне инструмента (а), расположение термопар на упрочняемых дорожках (б) и общий вид измерительного комплекса на станке (в)

Поверхность образцов предварительно обрабатывалась чистовым фрезерованием до достижения шероховатости $Ra = 0,8$ мкм. Координаты отверстий соответствовали серединам обрабатываемых дорожек, при этом положение термопар обеспечивало измерение температуры на глубине 0,5 мм от поверхности. 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.

Результаты измерения температуры поверхностного слоя в контакте инструмента T_k и на глубине 0,5 мм от поверхности $T_{0,5}$ и установленные значения времени выдержки t_γ при подачах $f_{и}=50, 100$ и 150 мм/мин приведен на рисунке 4.13.

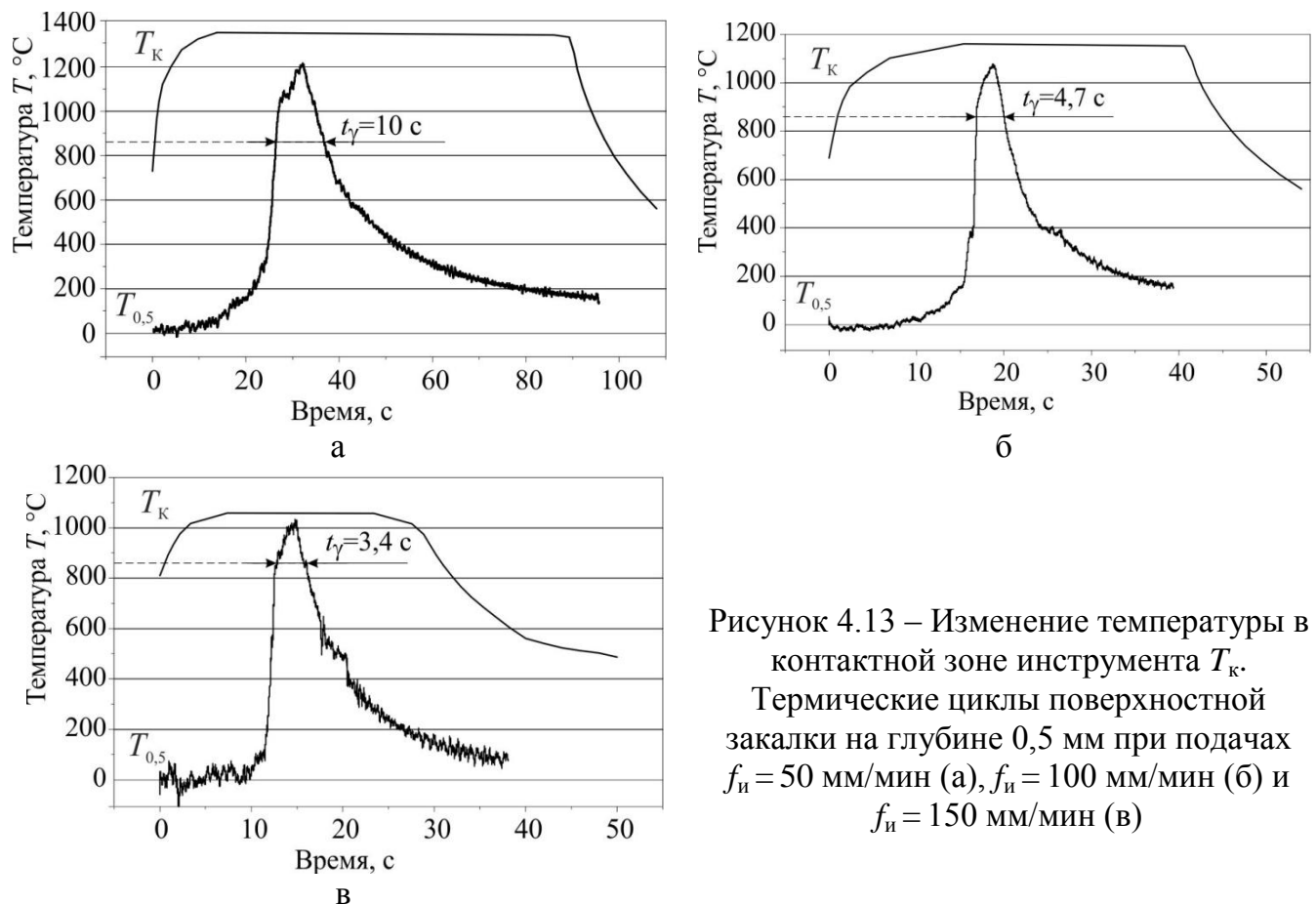


Рисунок 4.13 – Изменение температуры в контактной зоне инструмента T_k . Термические циклы поверхностной закалки на глубине 0,5 мм при подачах $f_{и} = 50$ мм/мин (а), $f_{и} = 100$ мм/мин (б) и $f_{и} = 150$ мм/мин (в)

Экспериментально установлены термические циклы закалки в поверхностном слое стали 20X13 на глубине 0,5 мм для пяти подач и температурно-временные параметры, которые могут быть сравнены с результатами моделирования (Приложение Б).

Для всего спектра подач результаты измерения температур T_k , $T_{0,5}$ и времени выдержки t_γ , а также аналогичные параметры КЭМ из раздела 3 приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Сравнительные данные результатов измерения и моделирования температур T_k , $T_{0,5}$ и времени выдержки t_γ

Подача f , мм/мин	Температурно-временные параметры термического цикла						Относительная погрешность δ , %		
	Эксперимент			Моделирование					
	$T_{кЭ}$, °C	$T_{0,5Э}$, °C	$t_{\gammaЭ}$, с	$T_{кМ}$, °C	$T_{0,5М}$, °C	$t_{\gammaМ}$, с	δT_k	$\delta T_{0,5}$	δt_γ
50	1352	1191	10	1336	1215	11,2	1%	2%	12%
75	1214	1117	6,2	1272	1150	6,9	4,7%	3%	11%
100	1167	1064	4,7	1213	1089	4,12	4%	2,3%	12,3%
125	1104	1051	4,1	1160	1037	3,5	5%	1,3%	14,6%
150	1058	1006	3,5	1115	998	2,9	5,3%	0,8%	17%

Относительные погрешности оценки температурно-временных параметров термического цикла, установленных при моделировании, в сравнении с результатами эксперимента определялись по следующим формулам:

$$\delta T_k = \frac{T_{кМ} - T_{кЭ}}{T_{кЭ}} \cdot 100\%; \quad \delta T_{0,5} = \frac{T_{0,5М} - T_{0,5Э}}{T_{0,5Э}} \cdot 100\%; \quad \delta t_\gamma = \frac{t_{\gammaМ} - t_{\gammaЭ}}{t_{\gammaЭ}} \cdot 100\%.$$

Величины $T_{кМ}$, $T_{0,5М}$ и $t_{\gammaМ}$ получены при КЭМ процесса ОТП со следующими технологическими параметрами: $F_H=3500$ Н, $n=4000$ об/мин и коэффициенте трения $\mu=0,22$.

На основе анализа экспериментальных данных параметров термического цикла и результатов моделирования процесса ОТП построена также и диаграмма охлаждения стали 20X13 для ОТП при подачах инструмента в пределах от 25 до 175 мм/мин (рисунок 4.14). 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 4.2.

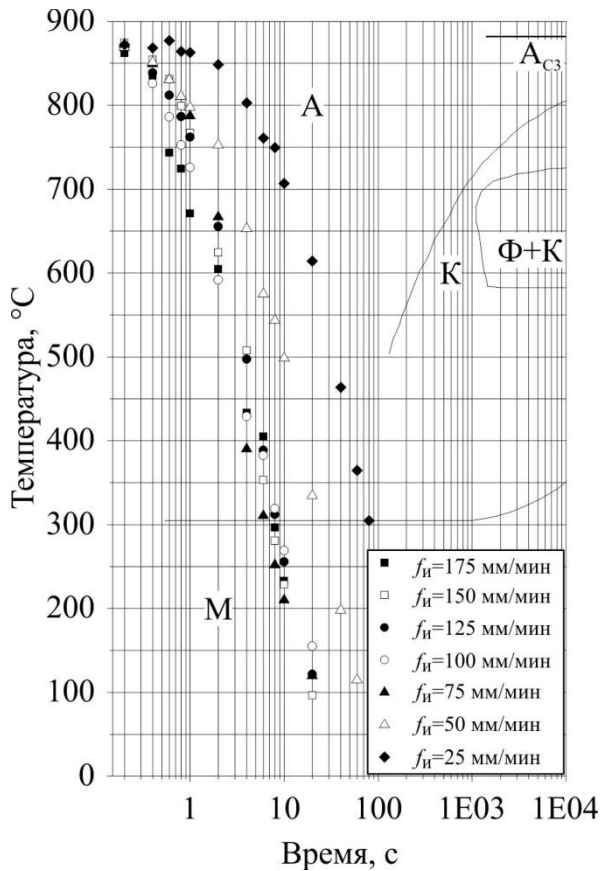


Таблица 4.2. Сравнительные данные скорости охлаждения стали 20X13

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

4.3 Исследование влияния подачи на микротвердость и микроструктуру поверхностного слоя при однопроходной ОТП

Пример одной из обработанных ОТП заготовок и образцов 1 и 2 с вырезанными участками в конце движения инструмента с подачами 25, 50, 75, 100 мм/мин (образец 1) и 125, 150, 175 и 200 мм/мин (образец 2) приведен на рисунке 4.15. Для исследования микротвердости по глубине поверхностного слоя в поперечном сечении образцов под дорожками трения подготавливались косые шлифы под углом 19 градусов (рисунок 4.16).

Измерения микротвердости были проведены методом восстановленного отпечатка пирамидки Виккерса, полученной при нагрузке 0,05 кгс и выдержки 15 с на микротвердомере АНОТЕСН есоHARD ХМ1270С. Перед измерениями косые шлифы был предварительно протшлифованы и отполированы с

охлаждением, не допускающим перегрев исследуемого материала. Результаты измерений приведены в таблицах В.1–В.5 (Приложение В).

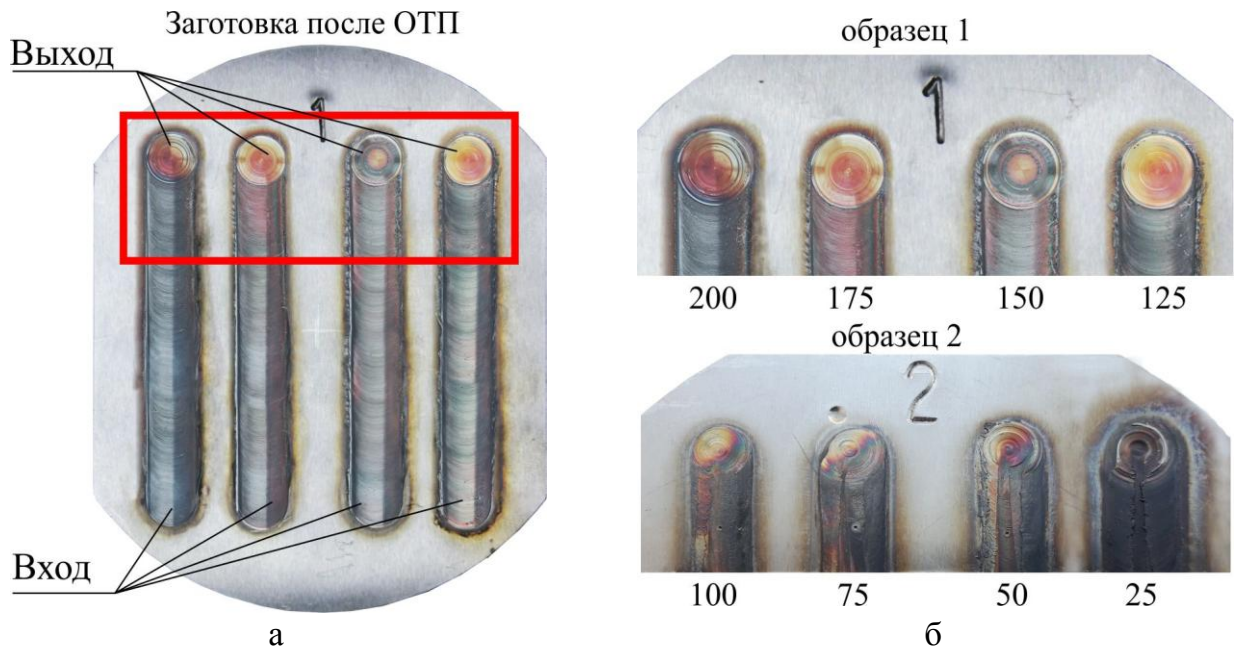


Рисунок 4.15 – Общий вид заготовки 1 с дорожками трения после ОТП (а) и образцы из заготовок 1 и 2 на участках выхода инструмента после обработки с подачами 25, 50, 75, 100 125, 150, 175 и 200 мм/мин (б)

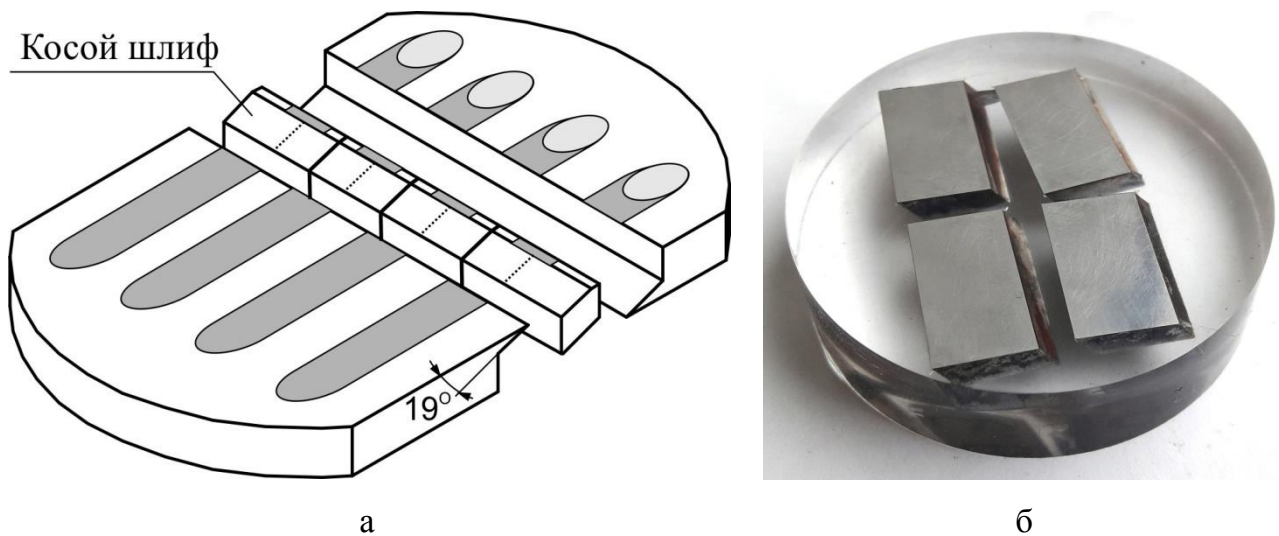


Рисунок 4.16 – Схема подготовки (а) и фотографии (б) косых шлифов

На рисунке 4.17 показаны экспериментальные зависимости изменения микротвердости $HV_{0,05}$ по глубине поверхностного слоя для подач $f_n = 25, 50, 75, 100, 150$ и 200 мм/мин, построенные на основе данных таблицы.

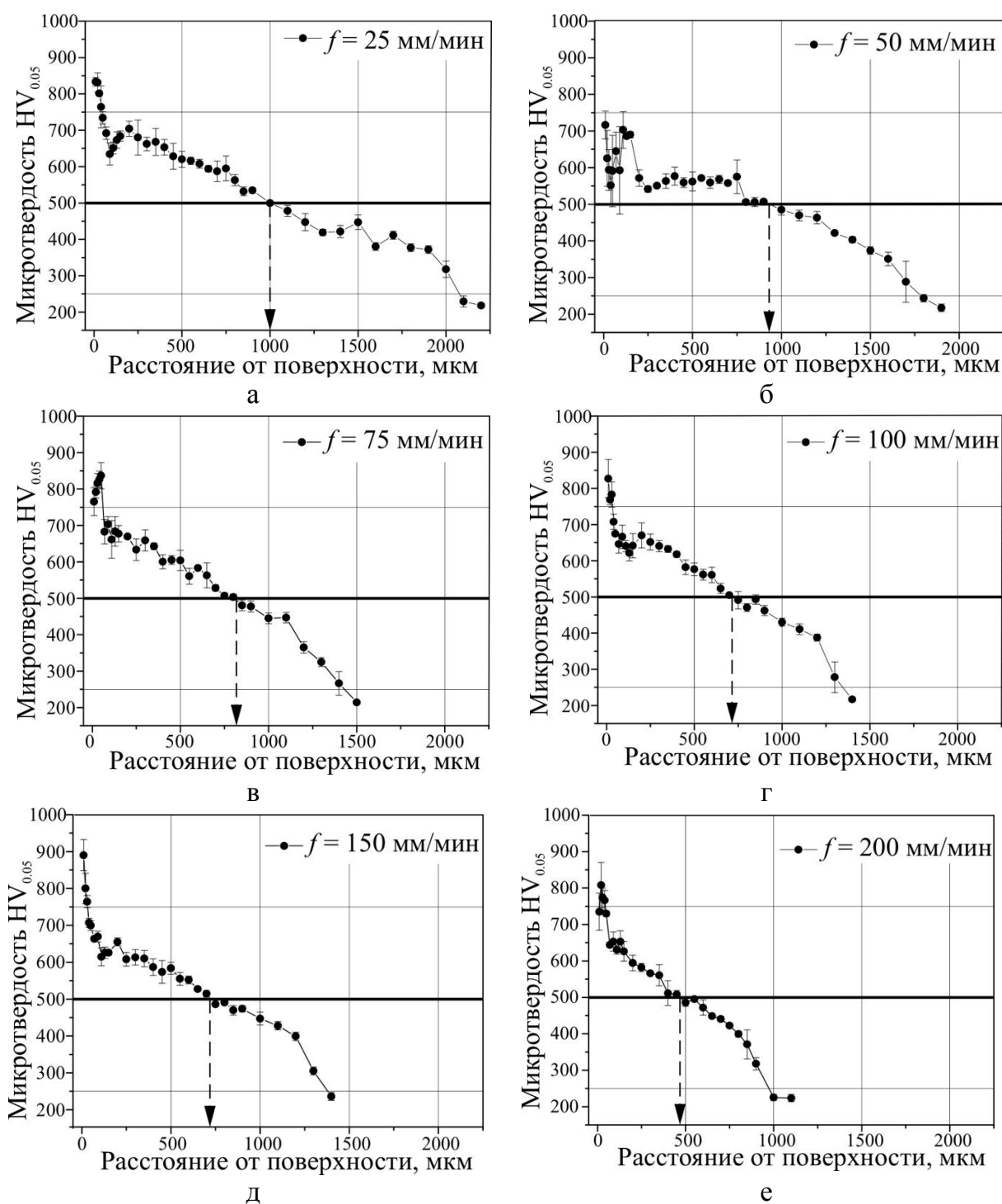


Рисунок 4.17 – Изменение микротвердости $HV_{0,05}$ по глубине поверхностного слоя после ОТП с подачей 25 мм/мин (а), 50 мм/мин (б), 75 мм/мин (в), 100 мм/мин (г), 150 мм/мин (д) и 200 мм/мин (е)

На рисунке 4.18 приведены результаты оптической и сканирующей микроскопии поверхностного слоя в поперечном сечении дорожки трения после ОТП с подачей 100 мм/мин. Определено, что после ОТП с подачей 100 мм/мин термическое воздействие на поперечном шлифе дорожки трения

имеет форму, близкую к сегменту круга, в котором можно выделить три основных участка по глубине от поверхности [53]: 1) белый слой с существенно диспергированной мартенситной структурой толщиной до 50 мкм; 2) участок с мартенситной структурой и следами карбидной сетки по границам бывшего аустенитного зерна толщиной до 0,45...0,5 мм и 3) участок со смешанной мартенситной и перлитной структурой на глубине от 0,9 до 1,0 мм от поверхности.

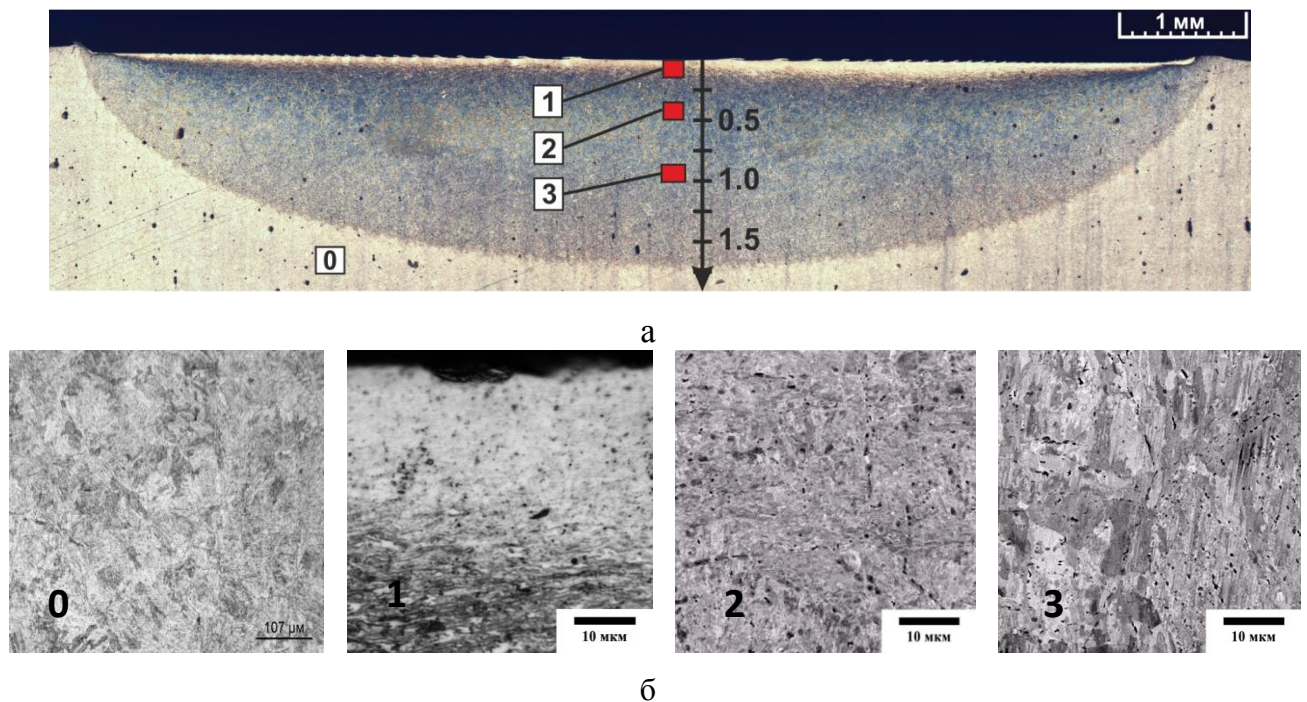


Рисунок 4.18 – Оптическая (а) и сканирующая (б) микроскопия структуры в поперечном сечении дорожки трения после однопроходной ОТП: 0 – матрица; 1 – на глубине до 50 мкм; 2 – на глубине от 0,45 до 0,5 мм; 3 – на глубине от 0,9 до 1 мм.

Установлено, что при ОТП за один проход инструмента уменьшение линейной подачи инструмента с 200 мм/мин до 25 мм/мин приводит к увеличению толщины упрочненного поверхностного слоя, микротвердость которого превышает пороговое значение однородной мартенситной структуры 500 HV_{0,05}, с 480 мкм до 1000 мкм.

На основе данных о глубине от поверхности по линии микротвердости 500 HV_{0,05}, представленных на рисунке 4.17, построена зависимость 1 на рисунке 4.19. Кроме того, на рисунке 4.19 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 $500 \text{ HV}_{0,05}$ для различных подач в полной мере соответствует диффузионному фронту углерода при $\mu=0,24$.

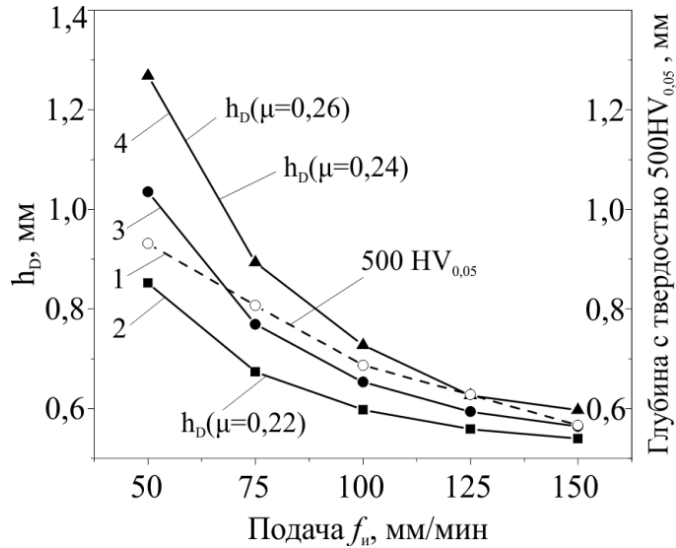


Рисунок 4.19 – Экспериментальная зависимость глубины упрочненного слоя с микротвердостью $500 \text{ HV}_{0,05}$ (1) и расчетные зависимости глубины диффузии углерода (2, 3, 4) от подачи при различных коэффициентах трения

Просвечивающая микроскопия с фольги после одностороннего утонения образца с поверхности дорожки трения приведена на рисунке 4.20. На светлопольном изображении (рисунок 4.20, а) видно, что имеет место повышенная плотность дислокаций, появляются дислокационные ячейки. На рисунке 4.20, б приведено темнопольное изображение в рефлексах типа 110α участка с измельченной структурой. Картина микродифракции (рисунок 4.20, в) имеет кольцевой вид.

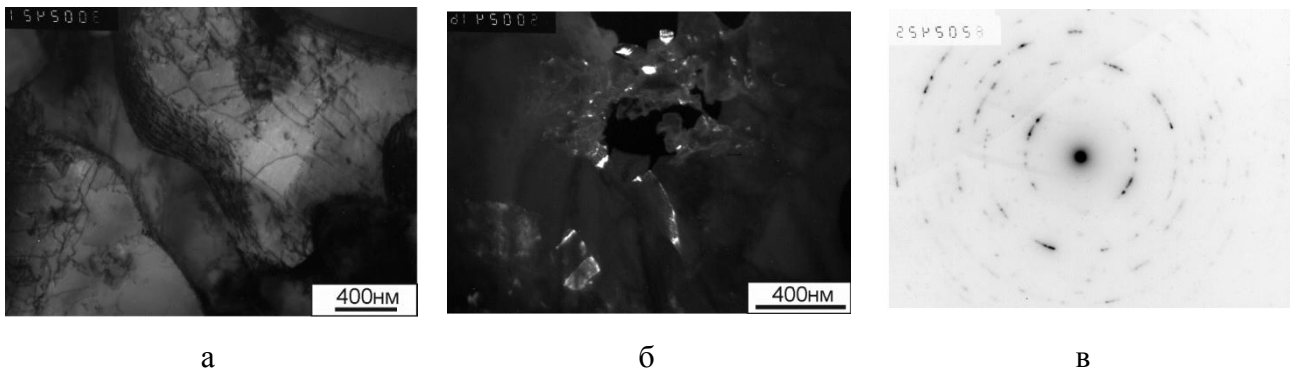


Рисунок 4.20 – Просвечивающая электронная микроскопия после односторонней обработки

Еще одним важным критерием выбора подачи в процессе ОТП является шероховатость обработанной поверхности, от которой зависит вид постобработки и величина удаляемого слоя. На всех обработанных дорожках была измерена шероховатость поверхности Ra. 3D снимки микропрофиля для подач 50, 100 и 175 мм/мин представлены на рисунке 4.21. Из приведенных рисунков следует, что при уменьшении подачи шероховатость поверхности дорожек увеличивается, также увеличивается разница между максимальными значениями вершин и впадин.

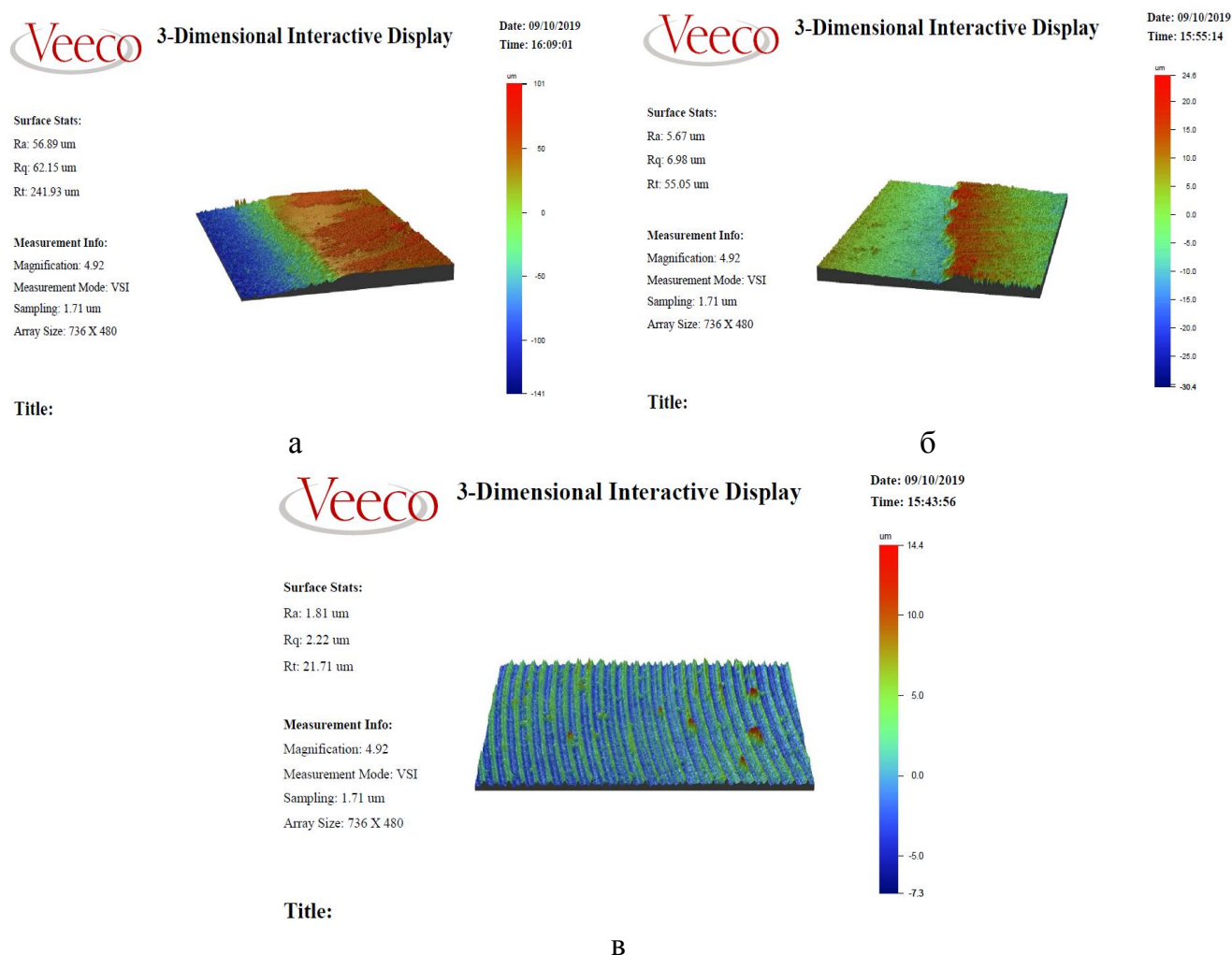


Рисунок 4.21 – Снимки микропрофиля поверхности после ОТП с подачами 50(а), 100(б) и 175(в) мм/мин

Графики зависимости глубины упроченного слоя и шероховатости поверхности от скорости подачи представлены на рисунке 4.22.

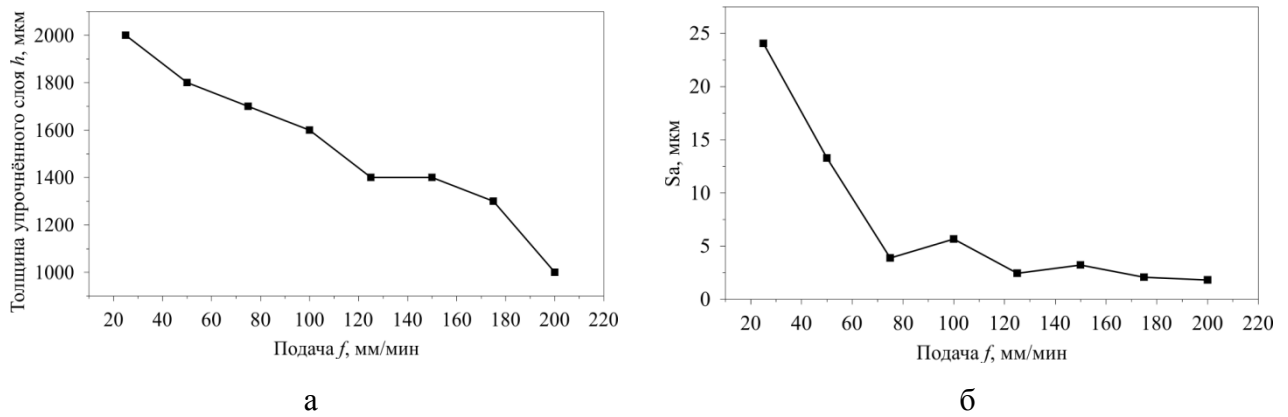


Рисунок 4.22 – Зависимости глубины упрочненного слоя (а) и шероховатости поверхности (б) от скорости подачи

Выявлено, что при линейной подаче 75 мм/мин и более формируются дорожки трения со стабильной топологией и шероховатостью $Ra=1,81...5,67$ мкм. Снижение линейной подачи до 50 мм/мин и 25 мм/мин приводит к формированию дорожек трения со следами плавления и эрозии материала и повышению шероховатости до $Ra=13,29$ мкм $Ra=24,06$ мкм, соответственно.

Выводы по четвертому разделу

1 Создано трибометрическое устройство и автоматизированный измерительный комплекс для оценки величины коэффициента трения инструмента с поверхностью в процессе ОТП на этапе разогрева обрабатываемого и инструментального материала.

2 Выявлено, что продолжительность разогрева материала и инструмента в пределах от 4 до 15 с для реализации поверхностной закалки в процессе ОТП определяет стабилизацию величины коэффициента трения в контакте и глубину эрозионного износа поверхности.

3 Проведены экспериментальные исследования взаимосвязи температуры поверхностного слоя стали 20X13 в контактной зоне инструмента и на глубине 0,5 мм в процессе ОТП с подачей, которые с погрешностью не более 17 % подтвердили результаты КЭМ термического цикла.

4 Установлено, что в процессе ОТП с оптимальным режимом механического нагружения и подачей инструмента 100 мм/мин максимальная

температура нагрева стали в контактной зоне достигает 1150 °С и на глубине 0,5 мм – до 1000 °С. При этом время аустенизации (выдержки), по данным экспериментальных исследований и КЭМ, составляет, соответственно, 4,7 и 4,1 с, а скорость охлаждения 101,1...123,8 °С/с. Достигнутые температурно-временные условия термического цикла обеспечивают формирование мартенситной структуры.

5 Установлено, что при ОТП за один проход инструмента уменьшение линейной подачи инструмента с 200 мм/мин до 25 мм/мин приводит к увеличению толщины упрочненного поверхностного слоя, микротвердость которого превышает пороговое значение однородной мартенситной структуры 500 HV_{0,05}, с 480 мкм до 1000 мкм.

6 Определено, что расчетная зависимость глубины диффузии углерода при коэффициенте трения 0,24 от подачи инструмента в диапазоне 50...150 мм/мин, установленной при КЭМ процесса ОТП стали 20X13 практически совпадает с экспериментальной зависимостью микротвердости 500 HV_{0,05} на глубине упрочненного слоя в пределах от 500 до 950 мкм.

7 Определено, что после ОТП с подачей 100 мм/мин зона термического воздействия на поперечном шлифе дорожки трения имеет форму, близкую к сегменту круга, в котором можно выделить три основные зоны: 1) белый слой с существенно диспергированной мартенситной структурой толщиной до 50 мкм; 2) зону с мартенситной структурой и следами карбидной сетки по границам бывшего аустенитного зерна толщиной до 0,45...0,5 мм и 3) зону со смешанной мартенситной и перлитной структурой на глубине от 0,9 до 1,0 мм от поверхности.

5 Экспериментальные исследования распределения микротвердости и структуры в кольцевых участках поверхностного слоя после ОТП. Внедрение технологии поверхностной закалки

В пятом разделе представлены результаты экспериментальных исследований поверхностной закалки кольцевых участков поверхности шириной $l_{\text{кп}} > 4R_{\text{н}}$ в процессе ОТП в условиях движения инструмента по трем концентрическим окружностям с перекрытием 50 % предшествующей дорожки трения и по веерной траектории, выполненные с целью обоснования условий достижения равномерной микротвердости и мартенситной структуры упрочненного слоя, а также приведен пример реализации разработанной технологии при изготовлении клина задвижки. Экспериментальные исследования упрочняющей обработки кольцевых участков проводились также для проверки адекватности тепловых конечно-элементных моделей.

5.1 Оценка равномерности микротвердости в кольцевом участке поверхностного слоя

В качестве критерия равномерности микротвердости по ширине и глубине кольцевого участка поверхности, подвергнутого ОТП, применен индекс равномерности твердости CU , предложенный в работе [19] G. Campana. Оценка индекса равномерности твердости CU осуществляется для различных величин пороговой (требуемой) микротвердости H_{th} и глубины h от поверхности по формуле

$$CU(H_{th}, h) = 1 - \frac{W_t + W_{HAZ}}{W_{tot}}, \quad (5.1)$$

где W_t – суммарная длина участков с микротвердостью ниже пороговой, на стыках дорожек трения, мм; W_{HAZ} – суммарная длина участков с микротвердостью ниже пороговой на краях упрочняемого участка поверхностного слоя, мм; W_{tot} – общая длина упрочняемой поверхности вдоль линии пороговой твердости, мм.

Оценка индекса равномерности твердости CU поверхностного слоя при экспериментальных исследованиях процесса ОТП плоской заготовки проводилась для рассмотренных выше траекторий движения по трем concentрическим окружностям без охлаждения заготовки и по веерной траектории без охлаждения заготовки и с охлаждением тыльной стороны турбулентным потоком жидкости, создаваемым специальным устройством.

На рисунке 5.1, а показана плоская заготовка из стали 20X13 после ОТП с траекторией движения по concentрическим окружностям ($F_H=3500$ Н; $n=4000$ об/мин и $f_n=100$ мм/мин).

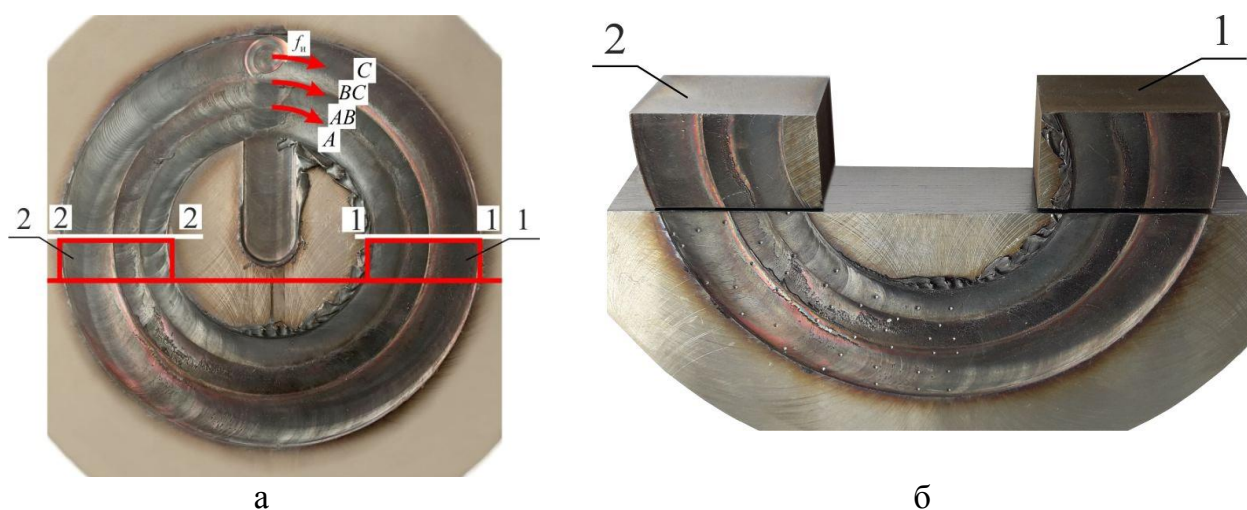


Рисунок 5.1 – Общий вид кольцевого участка поверхности заготовки после ОТП с дорожками А, С и перекрытыми дорожками АВ и ВС (а) и фотография вырезанных образцов 1 и 2 (б)

Выход инструмента с радиусом плоского торца $R_n=4,5$ мм на ОТП кольцевого участка осуществлялся из центра заготовки. ОТП осуществлялась всухую с движением инструмента по часовой стреле. На рисунке отмечены части дорожки трения А и С без перекрытия и две дорожки с перекрытием 50 %, соответственно, АВ и ВС.

Исследование микротвердости и оценка индекса равномерности CU по глубине упрочняемого поверхностного слоя проводилась в двух сечениях (1–1 и 2–2) на специально вырезанных образцах 1 и 2 (рисунок 5.1, б), соответствующих половине обрабатываемого кольцевого участка. Анализ равномерности микротвердости CU в этих сечениях позволяет выявить влияние

времени обработки и, соответственно, объемного нагрева заготовки. Подготовка торцов образцов для измерения микротвердости проводилась путем шлифования наждачной бумагой Р2500 ГОСТ 52381-2005 и полирования пастой ГОИ. Оценка микротвердости $HV_{0,05}$ проводилась по ширине кольцевого участка для следующих глубин от поверхности: 100; 200; 300; 400; 500; 600 мкм.

На рисунке 5.2 приведены зависимости изменения микротвердости $HV_{0,05}$ по ширине кольцевого участка в сечениях 1–1 и 2–2 на глубине 200 и 500 мкм и отмечены зоны перекрытия дорожек трения АВ и ВС.

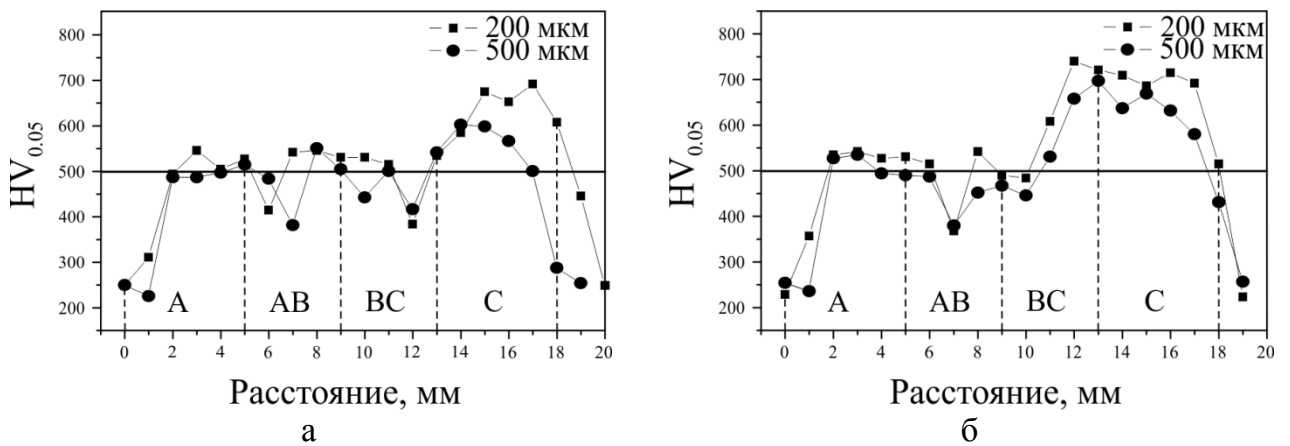


Рисунок 5.2 – Зависимости изменения микротвердости $HV_{0,05}$ по ширине кольцевого участка в сечениях 1–1 (а) и 2–2 (б) на глубине 200 и 500 мкм

На рисунке 5.3, а показан пример оценки параметра CU применительно к ОТП кольцевого участка поверхности после ОТП с траекторией движения инструмента по трем концентрическим окружностям для пороговой микротвердости $H_{th} = 500 HV_{0,05}$ на глубине 200 мкм вдоль линии $I-I$ образца. 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_n , 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 кольцевой поверхности.

Таким образом, при пороговой твердости $H_{th} = 500 \text{ HV}_{0,05}$ на глубине 200 мкм индекс равномерности твердости $CU = 0,67$.

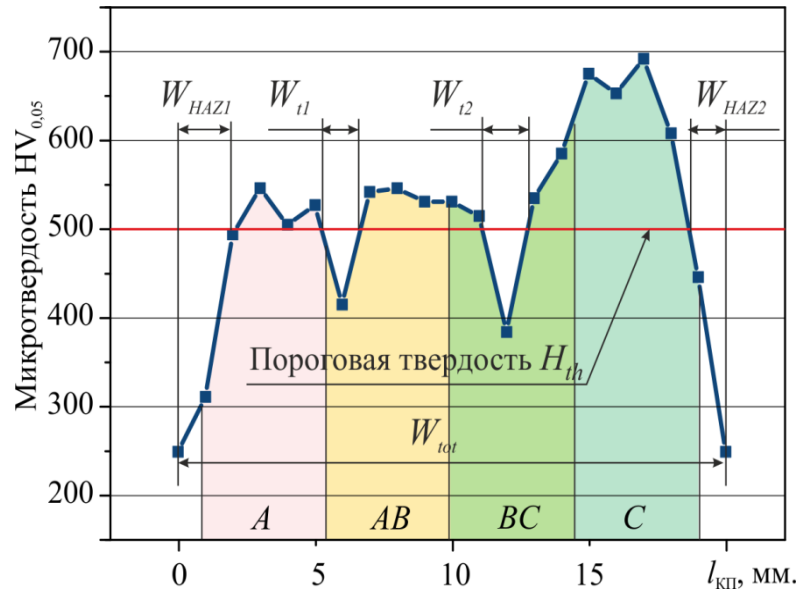


Рисунок 5.3 – Оценка равномерности микротвердости по методу Г. Самрана при пороговой величине $H_{th} = 500 \text{ HV}_{0,05}$ на глубине 200 мкм в сечении 1–1

Зависимости изменения микротвердости по ширине участков кольцевой поверхности в сечениях 1–1 и 2–2 на глубинах от 100 до 600 мкм приведены в приложении Г. На основе данных приложения Г для сечений 1–1 и 2–2 кольцевого участка поверхностного слоя проведены вычисления и построены зависимости изменения индекса равномерности твердости CU , приведенные на рисунке 5.4.

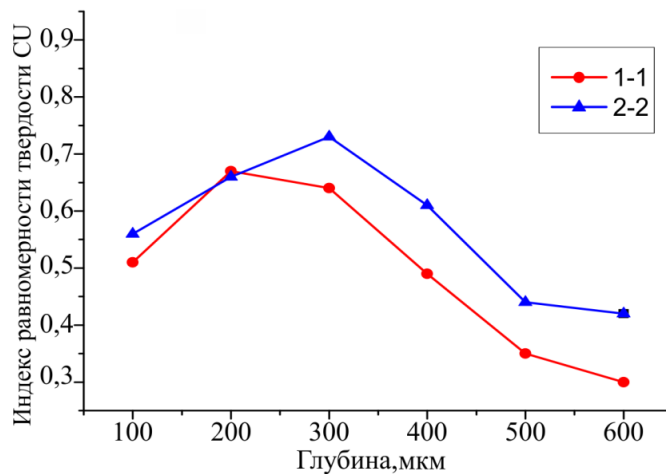


Рисунок 5.4 – Изменение индекса равномерности микротвердости CU в сечениях 1–1 и 2–2 кольцевого участка по глубине поверхностного слоя

В целом, анализ результатов исследований микротвердости образцов из стали 20X13 после ОТП при движении инструмента по концентрическим окружностям показал, что данная технология упрочнения кольцевых участков не может обеспечить формирование равномерной твердости по ширине и глубине.

ОТП кольцевого участка поверхностного слоя заготовки из стали 20X13 по верной траектории движения инструмента проводилась с применением устройства охлаждения тыльной стороны заготовки на обрабатывающем центре МА-600 OKUMA (рисунок 5.5). Конструктивное исполнение, принцип работы устройства и расчет требуемого расхода охлаждающей жидкости $Q_{ож}$ при давлении насоса $P_{ож}$ приведены в приложении Е.

Контроль температуры входящего и исходящего потоков жидкости осуществлялся встроенными термопарами Тп1 и Тп2 марки ТХА типа К, при этом наблюдаемая разница температур не превышала 2 °С. При отключении насоса подачи жидкости из бака обработка осуществлялась без охлаждения.

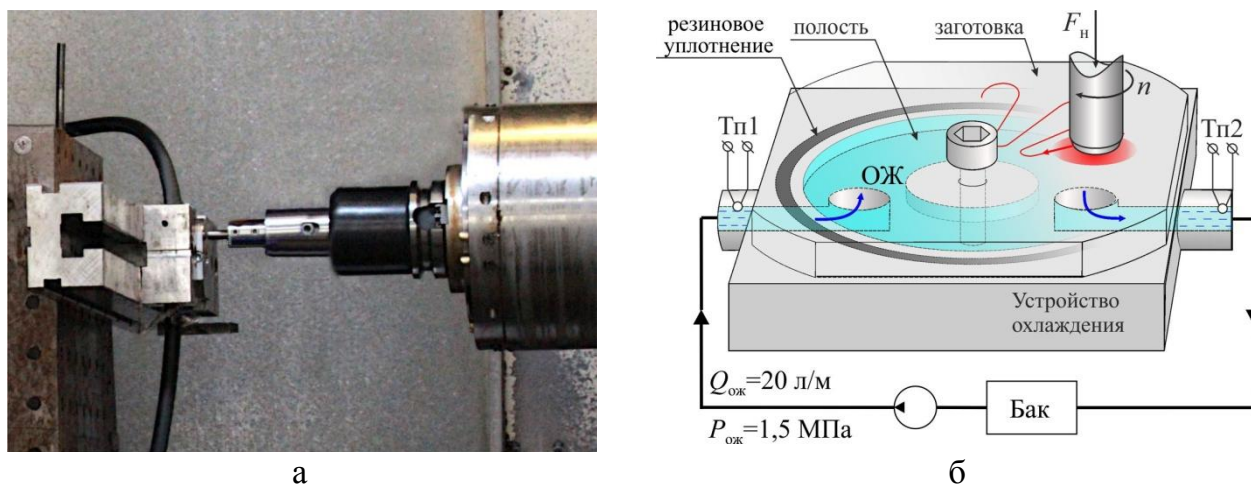


Рисунок 5.5 – ОТП кольцевого участка поверхностного слоя стали 20X13 на станке МА-600 OKUMA (а) и конструктивное исполнение устройства охлаждения (б)

Модель верной траектории движения центра инструмента с радиусом $R_n=4,5$ мм для программирования ОТП показана на рисунке 5.6, а.

В процессе ОТП с оптимальными параметрами механического нагружения ($n = 4000$ об/мин, $F_n = 3500$ Н) твердосплавный инструмент перемещался с подачей $f_n = 588$ мм/мин, которая обеспечивает скорость

перемещения интегрального теплового пятна $f_{тп} \approx 100$ мм/мин и, соответственно, оптимальную для закалки температуру нагрева стали в пределах участка шириной $l_{рт}$ формируемого кольцевого участка поверхности. Заготовка со сформированным при движении инструмента по верной траектории кольцевым участком показана на рисунке 5.6, б. На обработанной поверхности видны следы входа и выхода инструмента.

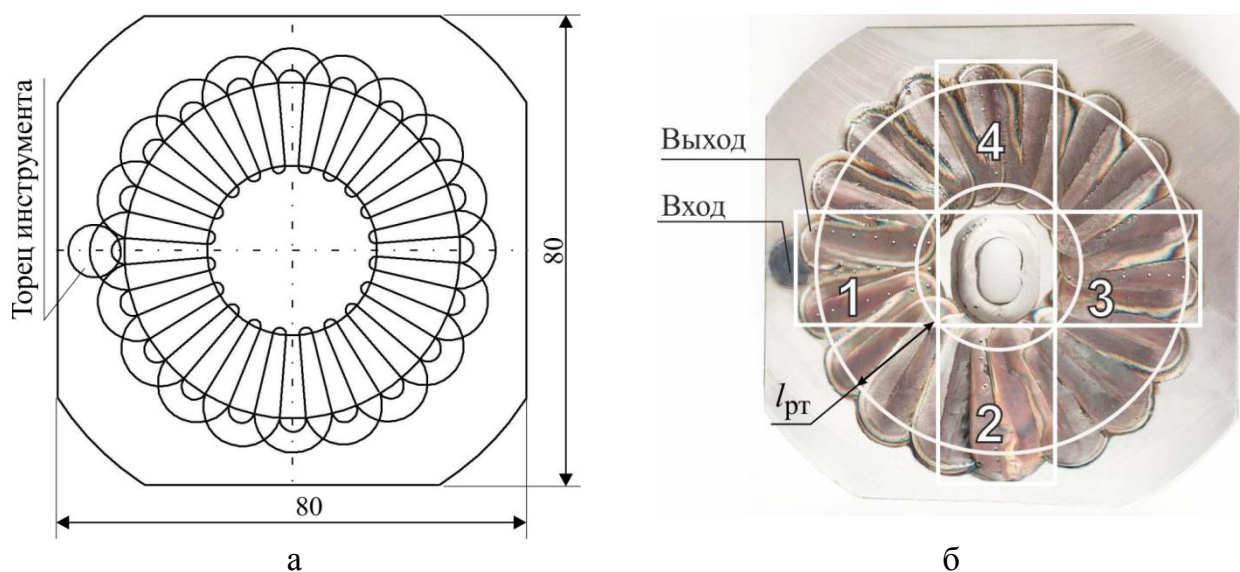


Рисунок 5.6 – Модель верной траектории движения центра инструмента (а) и вид заготовки после ОТП по верной траектории (б)

Для исследования равномерности упрочнения кольцевых участков поверхности после ОТП заготовок по верной траектории с охлаждением и без охлаждения на обработанной поверхности были выделены сектора 1–4.

Первоначально было проведено измерение твердости с поверхности методом Роквелла на стационарном твердомере ТР-5006 в радиальном направлении от периферии к центру кольцевого участка. Результаты измерения твердости HRC после ОТП без охлаждения (линия 1) и с охлаждением тыльной стороны заготовки (линия 2) вдоль дорожек, расположенных в выделенных секторах, приведены на рисунке 5.7.

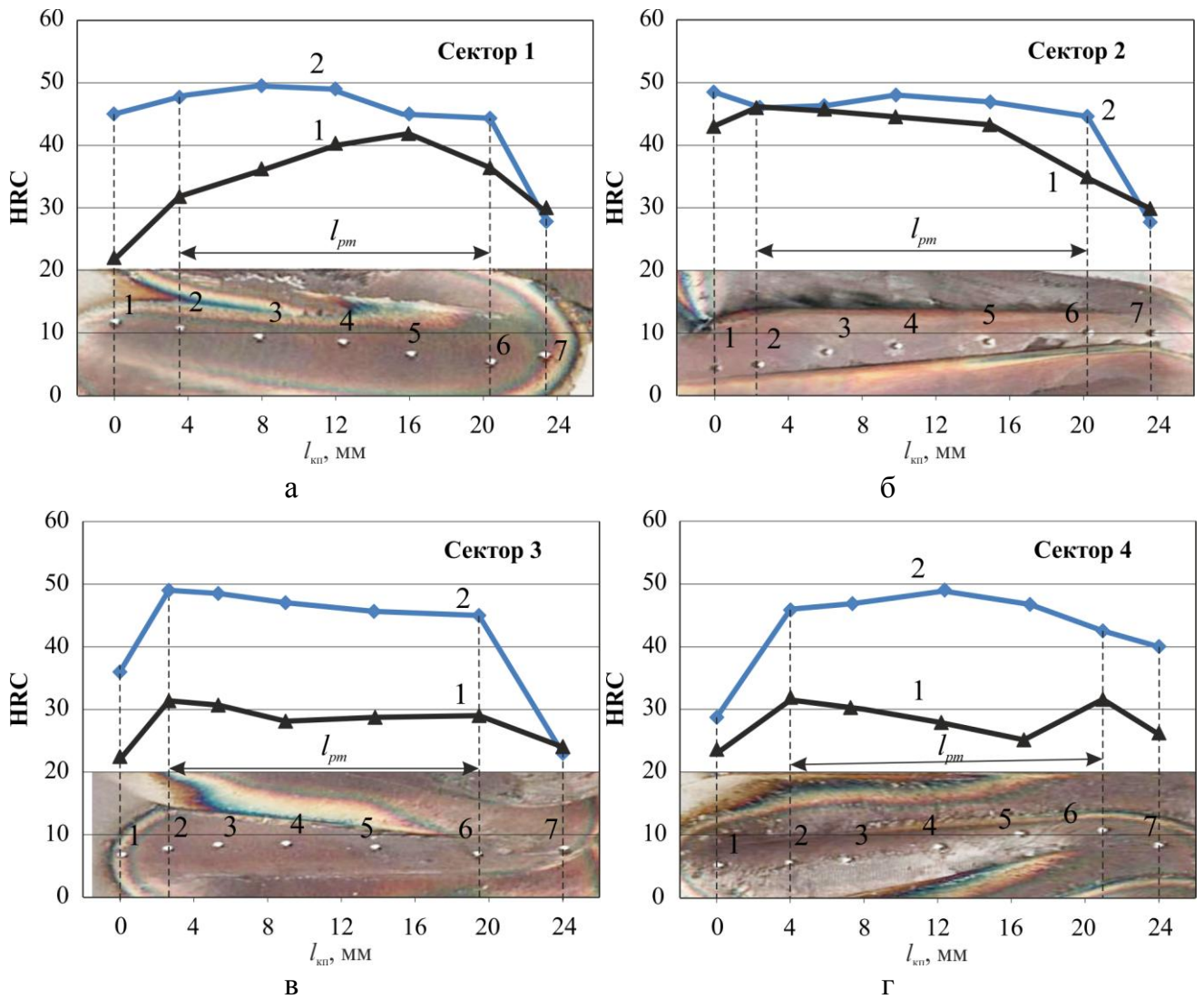
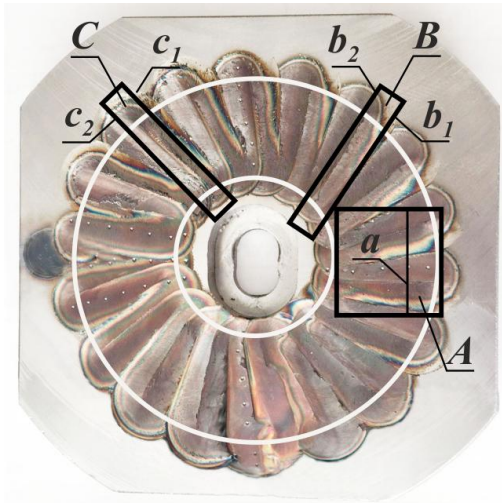


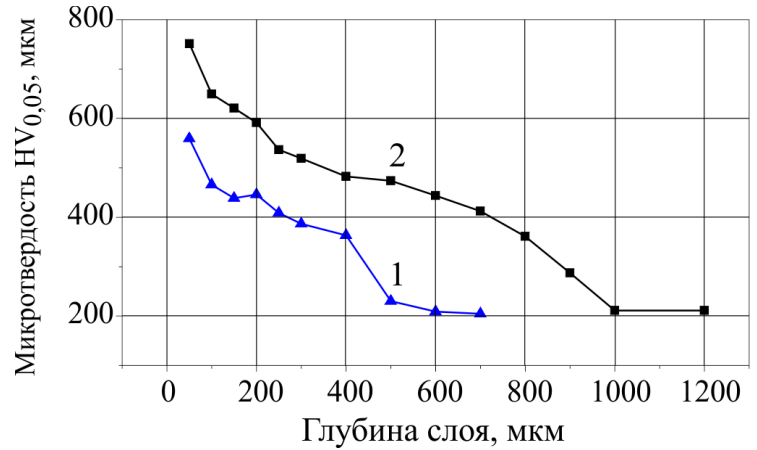
Рисунок 5.7 – Результаты измерения твердости HRC после ОТП без охлаждения (линия 1) и с охлаждением тыльной стороны заготовки (линия 2) вдоль дорожек, расположенных в секторах 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г)

На основе анализа кривых 1 и 2 установлено, что в пределах кольцевого участка шириной $l_{pm} \approx 17$ мм величина твердости поверхностного слоя после ОТП по верной траектории без охлаждения изменяется в пределах 26...44 HRC, при охлаждении тыльной стороны заготовки – 42...49 HRC и распределена более равномерно по ширине кольцевой поверхности.

Далее из заготовок вырезались образцы А (рисунок 5.8, а), в середине стороны $a-a$ которых выполнялось измерение микротвердости $HV_{0,05}$. На рисунке 5.8, б приведена зависимость изменения микротвердости по глубине поверхностного слоя после ОТП по верной траектории без охлаждения (линия 1) и с охлаждением тыльной стороны образца (линия 2).



а

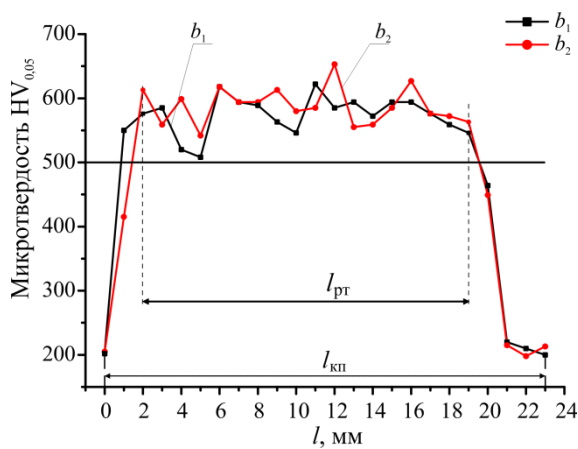


б

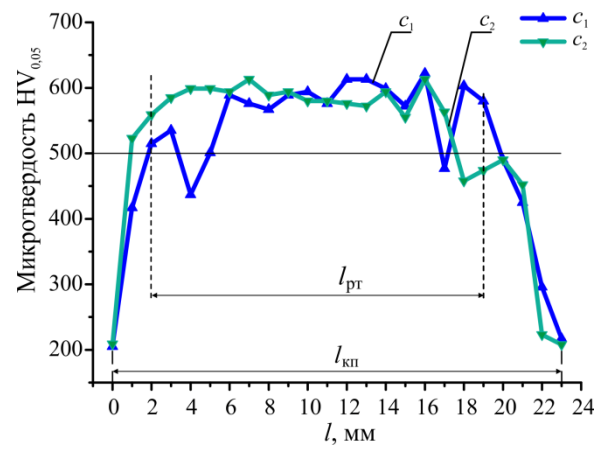
Рисунок 5.8 – Схема вырезания образцов (а) и график изменения микротвердости в середине стороны a образца A по глубине поверхностного слоя после ОТП при движении инструмента по веерной траектории:

1 – без охлаждения; 2 – с охлаждением жидкостью тыльной стороны заготовки

Для определения равномерности твердости в радиальном направлении по граням b_1 , b_2 , c_1 и c_2 , которые соответствовали линиям X-X и Y-Y на рисунке 2.7, в (раздел 2) из заготовки, обработка которой производилась с охлаждением, вырезались также образцы В и С (рисунок 5.8, а). Результаты измерений микротвердости по ширине кольцевой поверхности на образцах В и С по сторонам b_1 , b_2 , c_1 и c_2 приведены в приложении Д, а для глубины от поверхности 200 мкм представлены на рисунке 5.9.



а



б

Рисунок 5.9 – Изменение микротвердости по ширине кольцевой поверхности на глубине 200 мкм после ОТП при движении инструмента по веерной траектории и охлаждении жидкостью тыльной стороны заготовки

Установлено, что индекс равномерности твердости CU для заданной пороговой величины $500 HV_{0,05}$, соответствующей границе мартенситного превращения, при веерной траектории движения инструмента и применении жидкостного охлаждения с тыльной стороны образца в пределах ширины $l_{кп}=24,5$ мм составляет $CU=0,70...0,81$ и в пределах $l_{рт}=17$ мм индекс равномерности $CU=0,79...0,99$ (рисунок 5.10).

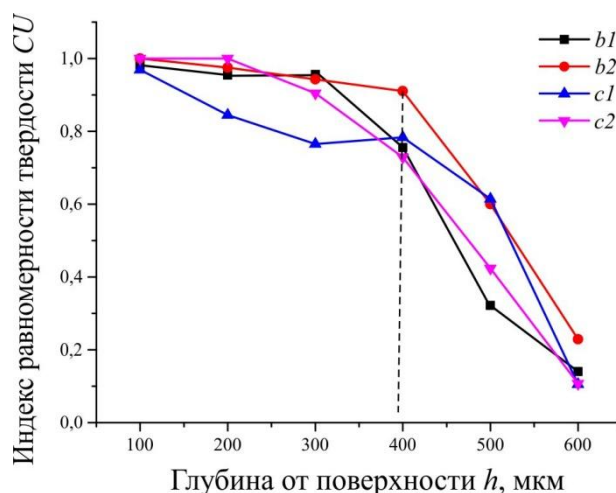


Рисунок 5.10 – Изменение индекса равномерности твердости CU по глубине поверхностного слоя h в радиальных направлениях b_1 , b_2 , c_1 и c_2 после ОТП кольцевого участка поверхности стали 20X13 по веерной траектории с охлаждением тыльной стороны образца

Таким образом, доказательно подтверждено преимущество ОТП широких кольцевых участков по веерной траектории по сравнению с ОТП по концентрическим окружностям по критерию индекса равномерности твердости CU в поверхностном слое глубиной до 400 мкм.

5.2 Исследование микроструктуры в кольцевых участках стали 20X13 после ОТП с движением инструмента по веерной траектории

На торцевой поверхности a и с поверхности образца А были проведены исследования микроструктуры с помощью сканирующей (SEM), просвечивающей (ТЕМ) электронной микроскопии и выполнен рентгеноструктурный анализ. На рисунке 5.11 а приведена SEM поверхностного слоя после ОТП с увеличением $\times 200$, и край слоя с

увеличением $\times 3000$ (рисунок 5.12, б). Результаты SEM позволили установить, что глубина упрочненного слоя составляет 766,43...910,66 мкм, величина перемешанного слоя не превышает 20...25 мкм.

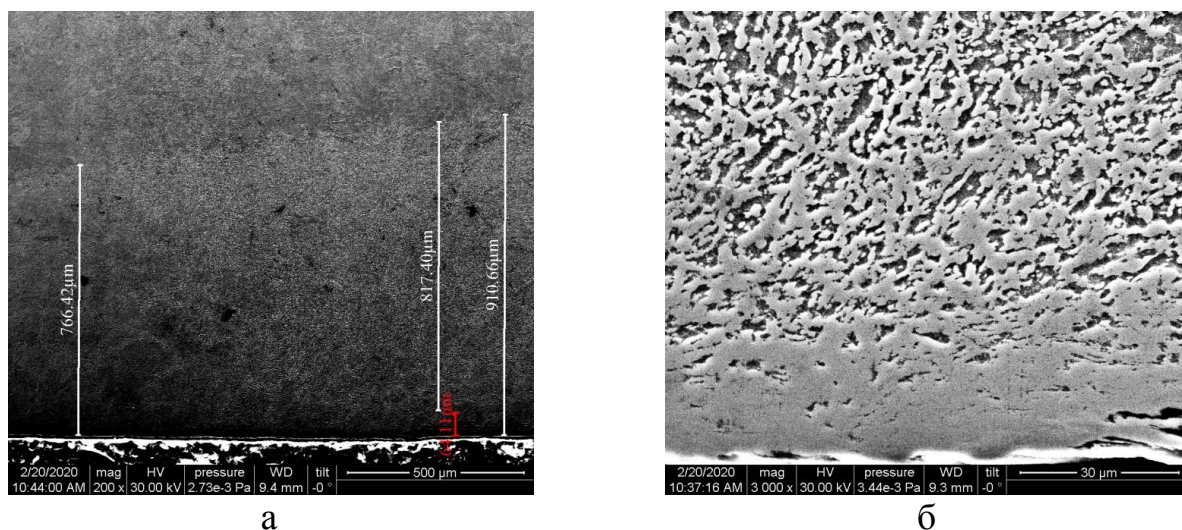


Рисунок 5.11 – Общий вид упрочненного слоя (а) и край упрочненного слоя (б)

На рисунке 5.12 показана SEM с микроанализом химического состава в тонком слое до 20 мкм, выделенном красным прямоугольником. Наблюдается переход в поверхность на глубину до 10 мкм 0,46 % вольфрама от нагретого инструмента, что связано с достижением температуры красностойкости 1050...1100 °С и пластической деформацией кобальтовой связи.

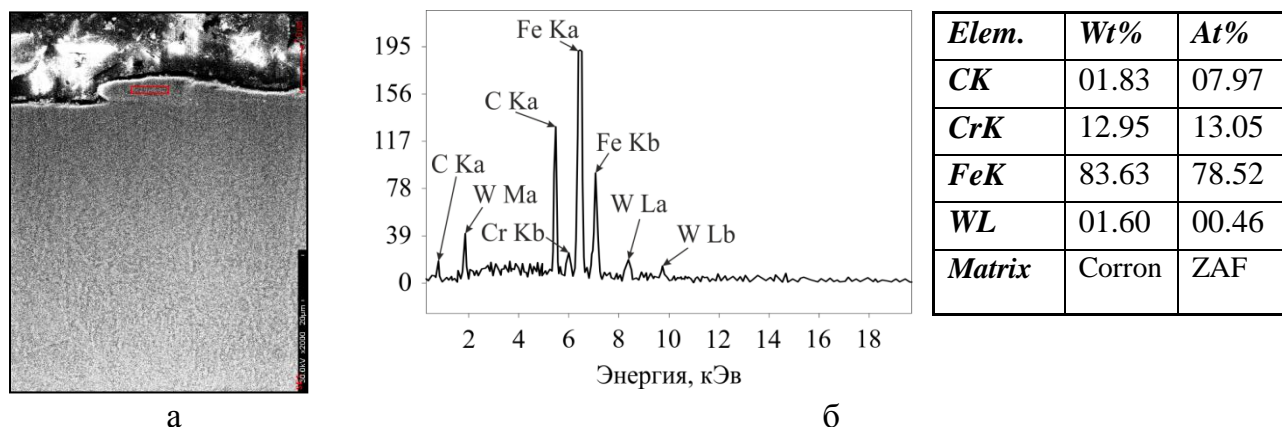


Рисунок 5.12 – Микроструктура (а) и химический состав (б) в тонком поверхностном слое после ОТП

Просвечивающая электронная микроскопия была выполнена на микроскопе JEOL JEM 200CX. Фольги толщиной ~ 300 мкм были отобраны с глубины 5 мм, непосредственно с обработанной поверхности, а также на

глубине 620 мкм. Фольги подвергались электрохимическому утонению в ортофосфорной кислоте.

Анализ полученных снимков материала на глубине 5 мм от поверхности показывает, что исходная микроструктура состоит из крупных ферритных зерен, которые содержат в себе одиночные дислокации (рисунок 5.13).

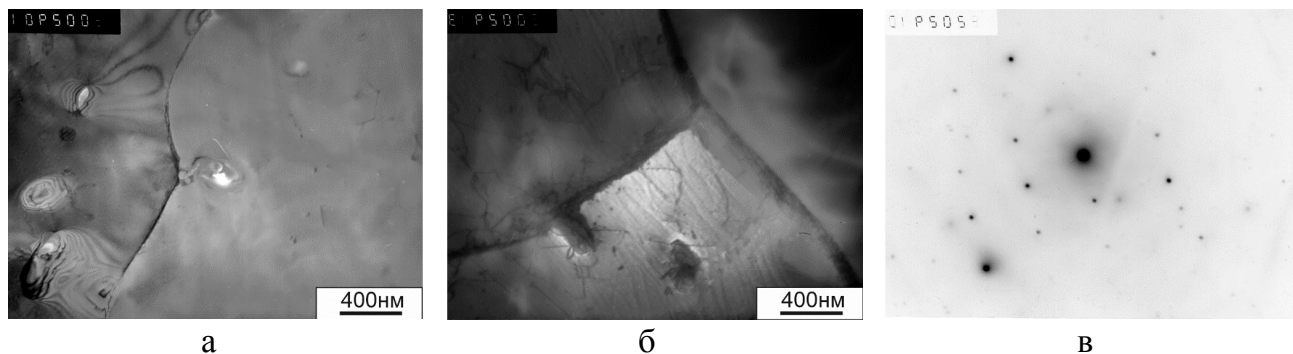


Рисунок 5.13 – Просвечивающая электронная микроскопия исходной микроструктуры на глубине 5 мм от поверхности

Ферритные зерна имеют малоугловые широкие границы большой протяженности. Внутри зерен и по их границам присутствует большое количество крупных неметаллических включений частиц $Me_{23}C_6$. Картина микродифракции состоит из точечных рефлексов, что характерно для монокристаллических недеформированных материалов.

Фольги, отобранные непосредственно с обработанной поверхности были подвергнуты одностороннему механическому и электрохимическому утонению с обратной стороны. Фольги, отобранные на глубине 620 мкм, утонялись аналогичным образом с двух сторон.

На снимках фольг, отобранных с поверхностного слоя, после фрикционной обработки образца с жидкостным охлаждением наблюдается дисперсная мартенситная структура с признаками высокой деформации (рисунок 5.14). 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.

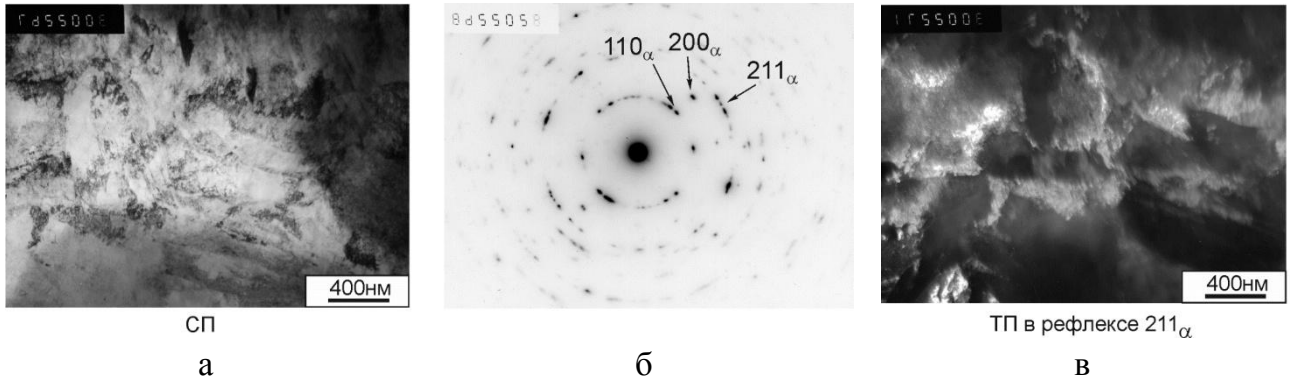


Рисунок 5.14 – Микроструктура материала после ОТП по веерной траектории с охлаждением тыльной стороны заготовки. Просвечивающая микроскопия поверхности

Рентгенографические исследования закалённого слоя на глубине 400 мкм от поверхности после ОТП при движении инструмента по веерной траектории и с жидкостным охлаждением были выполнены на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000. На характерном спектре, снятом в излучении Cr, 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 5.15).

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.

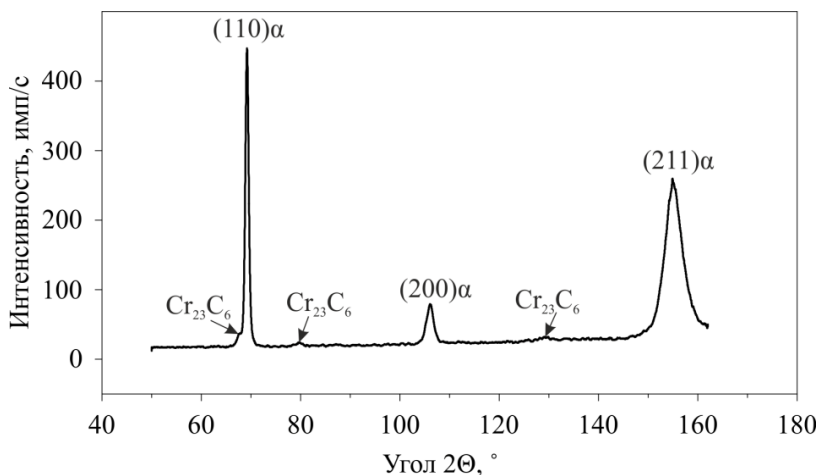


Рисунок 5.15 – Характерный спектр закалённого слоя на глубине 400 мкм в излучении Cr

Таблица 5.1. 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.;
 $d, \text{Å}$ – межплоскостное расстояние, Å ; a – параметр решетки, Å .

Микроструктура материала с глубины 620 мкм от поверхности после фрикционной обработки имеет смешанный характер (рисунок 5.16).

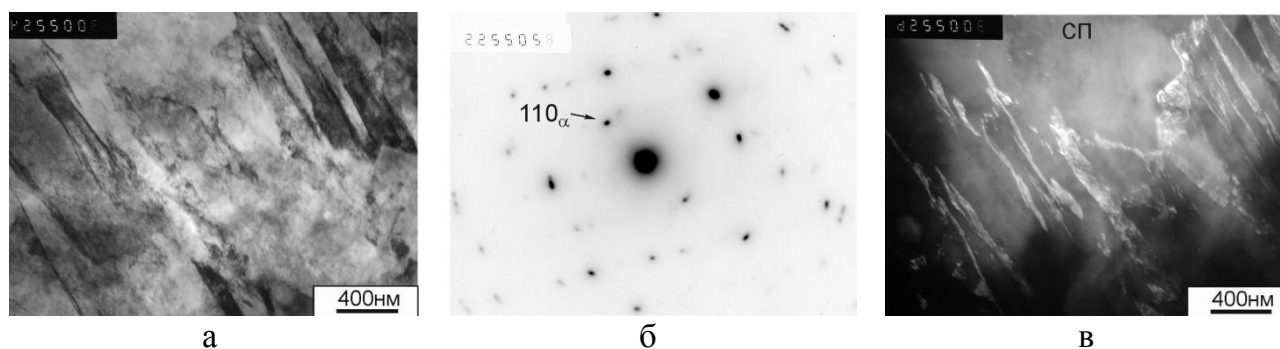


Рисунок 5.16 – Микроструктура поверхностного слоя на глубине 620 мкм от поверхности после ОТП по верной траектории

Наряду с участками, состоящими из дисперсионного мартенсита, присутствуют также ферритные зерна, которые не претерпели фазовых превращений в процессе термического воздействия. Это связано с поддержанием температуры в контактной зоне $\sim 1000 \dots 1050 \text{ } ^\circ\text{C}$, что недостаточно для полного протекания процесса аустенизации, но обеспечивает максимальную стойкость инструмента. Картины микродифракции имеют точечный вид с большим количеством отдельных рефлексов, характерный для материалов со смешанным фазовым составом слабо подвергнутых деформации. Имеется небольшое азимутальное размытие рефлексов.

5.3 Внедрение технологии поверхностной закалки при изготовлении клиньев задвижек на обрабатывающем центре.

Реализация технологии поверхностной закалки в процессе ОТП по верной траектории движения инструмента при изготовлении клина задвижки DN 80 мм, PN 16 МПа на станке MA-600 (Okuma) ОТП осуществлялась с использованием обоснованного ранее оптимального режима механического

нагрузки поверхности ($F_n = 3500$ Н и $n = 4000$ об/мин) и подачи инструмента $f_n=100$ мм/мин. Ширина кольцевого участка поверхности клина составляет 15 мм, величина контактной поверхности седла при этом имеет размер 5 мм. На рисунке 5.17 приведены процесс ОТП поверхности клина и упрочненная поверхность после обработки.

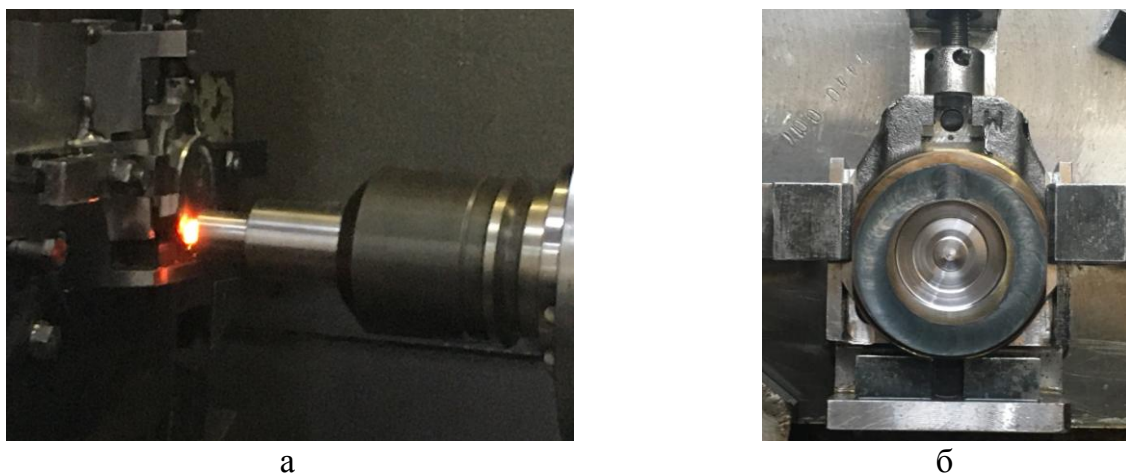


Рисунок 5.17 – ОТП уплотнительной поверхности клина задвижки на обрабатывающем центре MA-600/Okuma (а) и упрочненная поверхность после ОТП (б) клина задвижки DN 80 мм, PN 16 МПа

После ОТП уплотнительной поверхности клина за один установ заготовки на станке далее проводились следующие операции механической постобработки:

1. Фрезерование центрального отверстия диаметром 65 мм твердосплавной фрезой GM-4E-D12.0 для ускорения и снижения трудозатрат в процессе дальнейшей притирки уплотнительной поверхности; (рисунок 5.17, б)
2. Тонкое фрезерование упрочненного кольцевого участка поверхности на глубину 45 мкм с применением торцевой фрезы 100A07R-S45OD06D со следующими режимами обработки: частота вращения 1000 об/мин; скорость подачи 80 мм/мин.

После тонкого фрезерования шероховатость упрочненной поверхности клина составила менее $Ra=0,4$ мкм. Заготовка клина после тонкого фрезерования приведена на рисунке 5.18.

Для обеспечения необходимой плоскостности и шероховатости $Ra 0,4$ мкм предъявляемой к уплотнительным поверхностям применялась

операция притирки (рисунок 5.18, б). Для притирки использовался притир ПКТБА СП-5 и алмазные пасты АСМ НОМГ 20/14 и АСМ НОМГ 10/7, после чего клин был промыт уайт-спиритом С4-155/200 до полного удаления притирочной пасты и просушен сжатым воздухом.

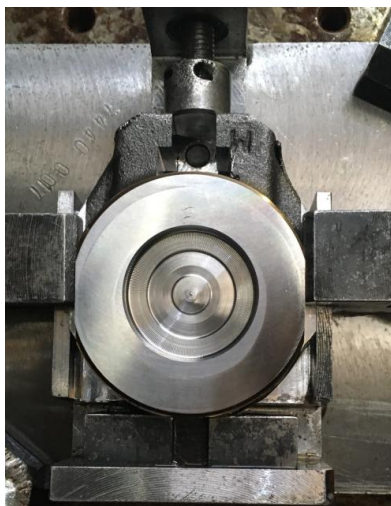


Рисунок 5.18 – Заготовка клина после тонкого фрезерования (а) и общий вид процесса притирки клина (б).

Проверка пригодности технологии поверхностной закалки в процессе ОТП оценивалась путем проведения гидравлических испытаний задвижки с изготовленным клином (рисунок 5.19) с определением количества циклов «открыто–закрыто» до появления протечек. Поверхностная закалка уплотнительных поверхностей клина в процессе ОТП позволила обеспечить 3240 циклов «открыто–закрыто» при норме 3000.



Рисунок 5.19 –Проведение гидравлических испытаний задвижки с изготовленным клином на герметичность (протечки)

После проведения гидравлических испытаний задвижки были проведены исследования износа контактных поверхностей с двух сторон клина методом 3D профилометрии. На рисунке 5.20 приведены результаты измерения шероховатости на верхних и нижних частях контактной зоны с помощью профилометра WYKO NT1100.

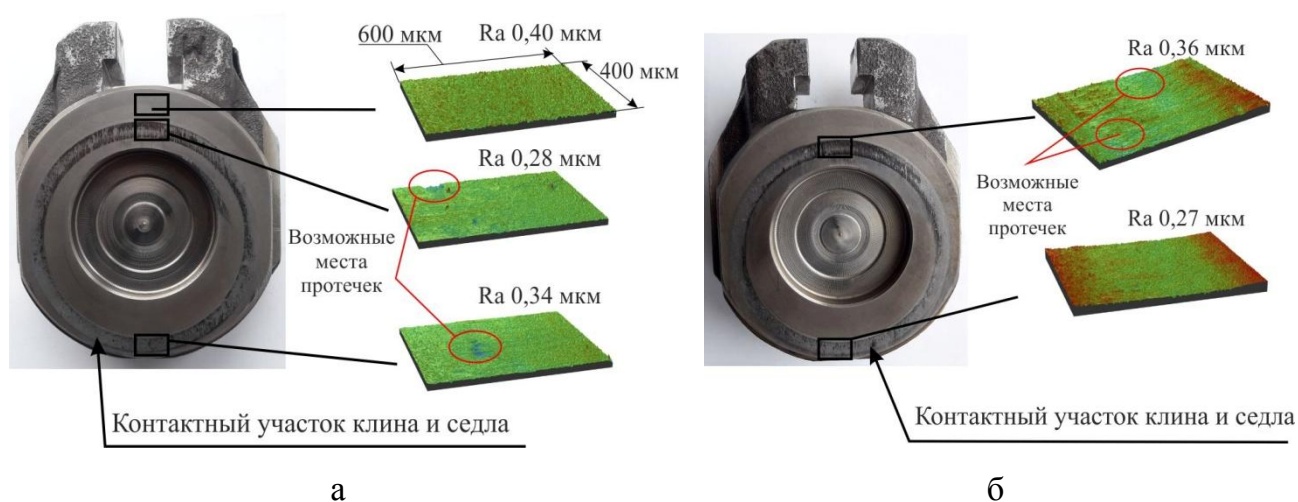


Рисунок 5.20 – 3D-профилометрия уплотнительных поверхностей клина в местах контакта с седлом со стороны подачи давления в задвижку (а) и со стороны без давления (б)

Анализ шероховатости уплотнительных кольцевых поверхностей клина после испытания задвижки позволил выявить участки с местами наибольшего износа при действии контактных нагрузок. Контактный участок седла с поверхностью задвижки имеет вид кольца шириной ~5 мм с чётко выраженной границей и следами изнашивания. 3D-профилометрия контактных участков уплотнительных поверхностей выполнена в верхней и нижней областях клина. Определено, что величина шероховатости R_a на участках размером 400x600 мкм (рисунок 5.20) составляет $R_a=0,27\dots0,36$ мкм, что ниже исходной шероховатости уплотнительной поверхности $R_a=0,4$ мкм. Уменьшение величины R_a после испытаний задвижки объясняется приработкой контактных участков. Кроме того, 3D-профилометрия позволила выявить контактные участки с перепадами микропрофиля 1,5...2,0 мкм, образование которых и могло привести к потере герметичности.

Выводы по пятому разделу

1 Установлено, что ОТП кольцевого участка поверхности стали 20Х13 с движением инструмента по концентрическим окружностям не может быть рекомендовано поскольку при пороговой микротвердости $500 \text{ HV}_{0,05}$ индекс равномерности твердости CU по глубине слоя от 100 до 600 мкм изменяется от 0,5 до 0,3 с максимальным значением $CU=0,67$ на глубине 300 мкм

2 Установлено, что в пределах кольцевого участка шириной $l_{\text{рт}} \approx 17$ мм величина твердости поверхностного слоя после ОТП по вверной траектории без охлаждения изменяется в пределах 26...44 HRC, при охлаждении тыльной стороны заготовки – 42...49 HRC и распределена более равномерно по ширине кольцевой поверхности.

3 Определено, что микротвердость поверхностного слоя образца из заготовки после ОТП по вверной траектории с охлаждением достигает на глубине 100 мкм величины $630 \text{ HV}_{0,05}$, на глубине 400 мкм – $\sim 495 \text{ HV}_{0,05}$ и на глубине 700 мкм – $405 \text{ HV}_{0,05}$. После ОТП кольцевых участков без охлаждения величины микротвердости $\text{HV}_{0,05}$ на аналогичной глубине от поверхности существенно ниже и составляют, соответственно, $\sim 450 \text{ HV}_{0,05}$, $\sim 390 \text{ HV}_{0,05}$ и $\sim 202 \text{ HV}_{0,05}$.

4 Выявлено, что после ОТП поверхности по вверной траектории с охлаждением тыльной стороны заготовки индекс равномерности твердости CU для заданной пороговой величины $500 \text{ HV}_{0,05}$, соответствующей границе мартенситного превращения в пределах полной ширины обрабатываемого кольцевого участка $l_{\text{кп}}=24,5$ мм, составляет $CU=0,70...0,81$ и в пределах ширины $l_{\text{рт}} - 0,77...0,99$.

5 Определена предельная величина толщины упрочняемого кольцевого участка $h=400$ мкм в пределах ширины $l_{\text{рт}}=17$ мм, для которой индекс равномерности твердости $CU=0,79...0,99$.

6 Установлен переход в поверхностных слой на глубину до 10 мкм 0,46 At% вольфрама от нагретого инструмента, что связано с достижением

температуры, близкой к температуре красностойкости применяемого твердого сплава, и пластической деформацией кобальтовой связки.

7 Выполнена просвечивающая микроскопия двухсторонних фольг образца кольцевого участка после ОТП по веерной траектории движения инструмента, результаты которой позволили установить, что на глубине 620 мкм формируется дисперсная мартенситная структура с признаками высокой деформации. Картины микродифракции приобретают кольцевой вид с рефлексами $(110)\alpha$, $(200)\alpha$ и $(211)\alpha$.

8 Методом рентгеноструктурного анализа образца после ОТП по веерной траектории движения инструмента с охлаждением заготовки на глубине 400 мкм от поверхности на характерном спектре в излучении Cr выявлены пики, соответствующие линиям $(110)\alpha$, $(200)\alpha$ и $(211)\alpha$, что свидетельствует о формировании мартенсита различной степени тетрагональности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили создать предпосылки решения многофакторной задачи управления термическим циклом поверхностной закалки в процессе обработки трением с перемешиванием твердосплавным WC-Co инструментом. Методами конечно-элементного моделирования в программном пакете ANSYS и экспериментальных исследований установлена взаимосвязь температурно-временных параметров термического цикла поверхностной закалки стали 20X13 в состоянии поставки с технологическими параметрами процесса (нормальной силой F_n , частотой вращения n и подачей f_i инструмента) и коэффициентом трения.

Впервые для реализации поверхностной закалки в процессе обработки трением с перемешиванием (ОТП) определена продолжительность разогрева стали до температуры A_{C3} по критерию стабилизации коэффициента трения и минимизации ее массопереноса на поверхность рабочего торца инструмента.

Методом конечно-элементного моделирования процесса установлено, что оптимальной механической нагрузкой при нагреве стали 20X13 до температуры 1000...1100 °С являются величина нормальной силы 3500 Н и частота вращения инструмента 4000 об/мин при коэффициенте трения 0,24...0,3.

Для решения задачи обеспечения равномерной твердости кольцевых участков поверхностей шириной до двух диаметров инструмента в процессе ОТП предложена веерная траектория движения инструмента и на основе проведения микродюрметрии доказаны ее преимущества по сравнению с традиционной обработкой по концентрическим окружностям.

При конечно-элементном моделировании процесса ОТП доказано, что при движении инструмента по веерной траектории создается движущееся стабильное тепловое пятно с температурой, близкой и выше A_{C3} , что исключает самоотпуск закаливаемой стали и обеспечивает равномерное упрочнение кольцевой поверхности.

Научно обоснован подход к снижению влияния объемного нагрева заготовки в процессе ОТП при движении инструмента по верной траектории для обеспечения равномерной твердости кольцевых участков упрочненного поверхностного слоя за счет отвода накопленного тепла охлаждающей жидкостью с тыльной стороны заготовки.

Разработано и изготовлено устройство охлаждения заготовки, проведены расчеты необходимого расхода жидкости для турбулизации потока.

Создана экспериментальная установки и проведены исследования температурно-временных параметров термического цикла закалки в контактной зоне инструмента и на глубине 0,5 мм от поверхности в процессе ОТП с различными подачами. С погрешностью не более 17 % эксперимент подтвердил результаты КЭМ. Выявлено, что при упрочнении поверхностного слоя температура нагрева стали 20X13 на глубине 0,5 мм достигает 980...1000 °С, время аустенизации составляет от 4,7 до 6,5 с, а скорость охлаждения от 101,1 до 123,8 °С/с.

Сканирующей и просвечивающей микроскопией доказано, что достигнутые параметры термического цикла обеспечивают формирование мартенситной структуры до глубины ~620 мкм.

Впервые для оценки распределения микротвердости по ширине поверхностного слоя кольцевого участка и для различных глубин применен индекс равномерности твердости, предложенный G. Campana.

Определена расчетная зависимость положения диффузионного фронта углерода в поверхностном слое в диапазоне изменения подачи инструмент от 50 до 1500 мм/мин и установлено, что она практически совпадает с экспериментальной зависимостью микротвердости 500 HV_{0,05} в пределах расстояния от поверхности от 500 до 950 мкм.

Разработанный способ упрочнения поверхностей обработкой трением с перемешиванием и инструмент для его осуществления защищены патентами РФ №2595191 и №197733. Выполнено опытное внедрение разработанной технологии при изготовлении клина задвижки на промышленном предприятии.

Дальнейшее направление исследования

Дальнейшее развитие экологически чистого физико-механического процесса обработки трением с перемешиванием и технологии поверхностной закалки видится в исследованиях применения новых инструментальных материалов и конструкций инструмента. Перспективными инструментальными материалами могут быть сплавы вольфрам-рений, имеющие высокую температуру красностойкости. Новое конструктивное исполнение инструмента предполагает использование сферической рабочей части. Значительный интерес представляют исследования физико-химических аспектов трения при движении инструмента и закономерностей переноса обрабатываемого материала. Новые знания необходимо получить и о деформационной составляющей упрочнения в процессе ОТП как методами моделирования, так экспериментально.

Для развития метода поверхностной закалки необходимо исследовать новые обрабатываемые материалы и траектории движения инструмента. Большой интерес вызывает поверхностная закалка тонких заготовок и, соответственно, разработка и исследование новых методов оценки влияния объемного нагрева и конструкций теплоотводящих систем воздушного и жидкостного охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mazumder J. Laser heat-treatment—the state of the art / J. Mazumder // *Journal of Metals* 35 (5). – 1983. – P. 18-26.
2. Mahmoudi B. Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd:YAG laser / B. Mahmoudi, M.J. Torkamany, A.R. Sabour Rouh Aghdam, J. Sabbaghzade // *Materials and Design* 31. – 2010. – P. 2553-2560.
3. Магин Д.Ю. Влияние скорости лазерной закалки на структуру и свойства стали 20Х3Н3МФБА / Д.Ю. Магин, С.В. Костромин // *European Student Scientific Journal*. – № 2. – 2013. – 7 с.
4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров // М.:МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2008. – 664 с.
5. Zirehpour Gh. Evaluating wear properties of AISI 420 martensitic stainless steel after laser transformation hardening / Gh. Zirehpour, R. Shoja Razavi, E. Moayerifar // *International Journal of Iron & Steel Society of Iran* 9(2). – 2012. – P. 5-8.
6. Sangwoo S. Laser Transformation Hardening of Carbon Steel Sheets: Doctoral Dissertation / So Sangwoo // Department of Mechanical Engineering Graduate School of UNIST. – 2017.
7. Korotkov V.A. Plasma quenching of gear and slotted couplings / V.A. Korotkov // *Russian engineering Research*. – Vol. 29. – No. 8. – 2009. – P. 813-816.
8. Сафонов Е.Н. Плазменная закалка деталей машин : монография / Е.Н. Сафонов // ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ. – 2014. – 116 с.

9. Hyungson K. Process map for laser heat treatment of carbon steels / К. Hyungson, S. Sangwoo // *Optics & Laser Technology* 44. – 2012. – P. 2106–2114.
10. Agren J. A revised expression for the diffusivity of carbon in binary Fe-C austenite / J. Agren // *Scripta metallurgica* vol. 20. – 1986. – P. 1507-1510.
11. Криштал М.А. Диффузионные процессы в железных сплавах/ М.А. Криштал // М.: Металлургиздат. – 1963. – 278 с.
12. Tibbets G.G. Diffusivity of carbon in iron and steels at high temperatures / G.G. Tibbets // *Journal of Applied Physics* 51. – 1980. – P. 4813-4816.
13. Гольдштейн М.И. Растворимость фаз внедрения при термической обработке стали / М.И. Гольдштейн, В.В. Попов // М: Металлургия. – 1989. – 200 с.
14. Hyungson K. Laser transformation hardening of carbon steel sheets using a hit sink / К. Hyungson, S. Sangwoo // *Journal of Materials Processing Technology* 214. – 2014. – P. 2693–2705.
15. Hung T. Temperature modeling of AISI 1045 steel during surface hardening processes / T. Hung, H. Shi, J. Kuang // *Materials* 11. – P 1815. – 2018.
16. Santhanakrishnan S. An experimentally based thermo-kinetic phase transformation model for multi-pass laser heat treatment by using high power direct diode laser/ S. Santhanakrishnan, F. Kong, R. Kovacevic // *Int J Adv Manuf Technol.* – 2012. – P. 219-238.
17. Foroozmehr E. Thermokinetic Modeling of Phase Transformation in the Laser Powder Deposition Process / E. Foroozmehr, R. Kovacevic // *Metallurgical and materials transactions A.* – Vol. 40A. – 2009. – P. 1935-1943.
18. Giorleo L. Modelling of back tempering in laser hardening / L. Giorleo, B. Previtali, Q. Semeraro // *Int J Adv Manuf Technol* 54. – 2011. – P. 969-977.

19. Campana G. A method for laser heat treatment efficiency evaluation in multi-track surface hardening / G. Campana, A. Ascari, G. Tani // *MSEC*. – Vol. 2. – 2009. – P. 677-683.
20. Ismail M.I.S. Surface hardening of tool steel by plasma arc with multiple passes / M.I.S. Ismail, Z. Taha // *International Journal of Technology* 1. – 2014. – P. 79-87.
21. Mishra R.S. Friction stir welding and processing/ R.S. Mishra, Z.Y. Ma // *Materials Science and Engineering R* 50. – 2005. – P. 1-78.
22. Pan L. Enhancement in hardness and corrosion resistance of AISI 420 martensitic stainless steel via friction stir processing / L. Pan, C.T. Kwok, K.H. Lo // *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 357. – 2018. – P. 339-347.
23. Venkatesh K.M. Review on friction stir welding of steels/ K.M. Venkatesh, M. Arivarsu, M. Manikandan, N. Arivazhagan // *Materials Today: Proceedings* 5. – 2018. – P. 13227-13235.
24. Siddiquee A.N. Experimental investigation on deformation and wear of WC tool during friction stir welding (FSW) of stainless steel / A.N. Siddiquee, S. Pandey // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 73. – 2014. – P. 479-486.
25. Wang S. Feasibility of ZrC-W composite used as a tool of friction stir welding: First principles calculations and experiment / S. Wang, X. Yang, Q. Zhang, K. Wu, D. Li, // *Ceramics International* 44. – 2018. – P. 18650-18655.
26. Liu F.C. A review of friction stir welding of steels: Tool, material flow, microstructure, and properties / F.C. Liu, Y. Hovanski, M.P. Miles, C.D. Sorensen, T.W. Nelson // *Journal of Materials Science & Technology* 34. – 2018. – P. 39-57.
27. Rai R. Review: friction stir welding tools/ R. Rai, A. De, H. Bhadeshia, T. DebRoy // *Science and Technology of Welding and Joining*. – Vol. 16. – № 4. – 2011. – P. 325-342.

28. Zhang Y. N. Review of tools for friction stir welding and processing / Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, P. Wanjara // *Canadian Metallurgical Quarterly*. – Vol. 51. – № 3. – 2012. – P. 250-261.
29. Langlade C. Formation of a Tribologically Transformed Surface (TTS) on AISI 1045 Steel by Friction Stir Processing / C. Langlade, A. Roman, D. Schlegel, E. Gete, M. Folea // *Materials and Manufacturing Processes* 31(12). – 2015. – P. 1565-1572.
30. Takada Y. Effect of Tip Shape of Frictional Stir Burnishing Tool on Processed Layer's Hardness, Residual Stress and Surface Roughness / Y. Takada, H. Sasahara // *Coating* 8.– №1:32. – 2018. – P. 1-11.
31. Lorenzo-Martin C. Rapid surface hardening and enhanced tribological performance of 4140 steel by friction stir processing / C. Lorenzo-Martin, O.O. Ajayi // *Wear* 332-333.– 2015. – P. 962–970.
32. Miranda R. M. Surface Modification by Friction Based Processes / R. M. Miranda, J. Gandra and P. Vilaça // *Modern Surface Engineering Treatments*. – 2013. – P. 1-20.
33. Lebaal N. Thermal modelling of friction stir process (fsp) and identification parameters / N. Lebaal, D. Chamoret, D. Schlegel, M. Folea // *Materials Physics and Mechanics* 32. – 2017. – P. 14-20.
34. Muhsin J. J. Effect of friction stir welding parameters (rotation and transverse) speed on the Transient temperature distribution in Friction stir welding of AA 7020-t53 / J.J. Muhsin, H.T. Moneer, A.M. Muhammed // *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. –Vol.7. – №4. – 2012. – P. 436-446.
35. Kiuchi S. Temperature history and metallographic structure of 0.45%C steel processed by frictional stir burnishing / S. Kiuchi, H. Sasahara // *Journal of advanced mechanical design, systems and manufacturing*. – Vol. 4. – Iss. 5. – 2010. – P. 838-848.

36. Vepakomma K. H. Three Dimensional Thermal Modeling of Friction Stir Processing / K. H. Vepakomma // Electronic Theses, Treatises and Dissertations. Florida State University/ – 2006.
37. Dodds S. Tribological enhancement of AISI 420 martensitic stainless steel through friction-stir processing/ S. Dodds, A.H.Jones, S.Cater // Wear. –Vol. 302. –Iss. 1-2. 2013. – P. 863-877.
38. Pan L. Enhancement in hardness and corrosion resistance of AISI 420 martensitic stainless steel via friction stir processing / L. Pan, C.T. Kwok, K.H. Lo // Sct. –Vol. 357. – 2018. – P. 339-347.
39. Abhilash J. Simulation of friction stir welding using thermo-mechanical coupled finite element method / J. Abhilash, A. Bappa // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 455, 012113. – 2018. – P. 8.
40. Thimmaraju P. Parametric analysis of friction stir welding process / P.Thimmaraju, K. Arkanti, G. Reddy // Materials Today: Proceedings 5(13), – 2018. – P. 26981-26989.
41. Патент RU № 197 733 МПК Российская Федерация, В24В 39/00 (2006.01), С21D 1/06 (2006.01). Инструмент для фрикционной поверхностной закалки детали/Кузнецов Виктор Павлович, Горгоц Владимир Георгиевич, Скоробогатов Андрей Сергеевич, Воропаев Владимир Валерьевич, Кузнецов Семен Викторович. Заявлен 26.02.2020, опубл. 25.05.2020, Бюл. № 15.
42. 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.

43. Frigaard Ø. A Process Model for Friction Stir Welding of Age Hardening Aluminum Alloys / Ø. Frigaard, Ø. Grong, and O.T. Midling // Metallurgical and materials transactions a. – Vol. 32(5). – 2001. – P. 1189-1200.
44. Tian X. Maximum and average flash temperatures in sliding contacts / X. Tian, F. Kennedy // Journal of Tribology. – Vol. 116. – 1994. – P. 167-174.
45. Rech J. Characterisation of friction and heat partition coefficients at the tool-work material interface in cutting / J.Rech et al. // Manufacturing Technology. – 2013. – P. 79-82.
46. Немчинский, А.Л. Тепловые расчеты термической обработки / А.Л. Немчинский // Государственное издательство судостроительной литературы. – 1953. – 106 с.
47. Bejan A. Convection Heat Transfer / A. Bejan // John Wiley & Sons. – 2013.
48. Engineering data book / Gas Processors Suppliers Association. – 2004.
49. Lienhard J. H. A Heat Transfer Textbook 5th edition / J.H. Lienhard IV, J.H. Lienhard V // Cambridge, MA :Phlogiston Press. – 2019.
50. Zhang Z. Laser cladding of 420 stainless steel with molybdenum on mild steel A36 by a high power direct diode laser / Z. Zhang, P. Farahmand, R. Kovacevich // Materials and design 109. – 2016. – P. 686-699.
51. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения / Г. Готтштайн; пер. с англ. К.Н. Золотовой, Д.О. Чаркина; под ред. В.П. Зломанова // М. : Бином. Лаборатория знаний. – 2011. – 400 с.
52. Воропаев В.В., Кузнецов В.П. Фрикционная поверхностная закалка хромистых сталей вращающимся инструментом // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: сборник тезисов докладов XXV Уральской школы металловедов-термистов; Мин-во науки и высш. образования РФ. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. – 2020. – С. 175–179.

53. Воропаев В.В., Кузнецов В.П., Попов А.А. Финишная технология обработки плоской поверхности фрикционным упрочнением и тонким фрезерованием на обрабатывающем центре // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – №2(41). – 2017.– С.165–169.

54. Воропаев В.В., Скоробогатов А.С., Барабашова. Влияние параметров фрикционной термомеханической обработки на формирование структуры и свойств поверхностного слоя стали 20Х13 // Уральская школа молодых металлургов : сборник материалов XIX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та. – 2018. – С. 51–56.

Таблица А.1 Температурно-временные параметры термического цикла поверхностной закалки в процессе ОТП с механической нагрузкой на поверхность $F_H=3500$ Н и $n=4000$ об/мин при однопроходном линейном движении инструмента, установленные методом КЭМ

№	f_H , мм/мин	μ	T_{max} , °C	t_H , с	t_γ , с	$t_{охл}$, с	v_H , °C/с	$v_{охл}$, °C/с
1	50	0,20	1113	28	9,9	8,8	38,79	65,91
2		0,22	1215	28,4	11	8	41,83	72,50
3		0,24	1315	28,7	11,9	10,4	44,88	55,77
4		0,26	1350	28,9	12,6	11,5	45,78	50,43
5		0,28	1390	29,2	13,3	12,4	46,68	46,77
6		0,30	1399	29,4	14	13,2	46,67	43,94
7	75	0,20	1053	16,6	5,7	6,3	61,81	92,06
8		0,22	1150	16,8	6,8	6,9	66,85	84,06
9		0,24	1245	17	7,4	7,7	71,65	75,32
10		0,26	1335	17,2	8,1	7,7	76,05	75,32
11		0,28	1376	17,4	8,5	9,1	77,53	63,74
12		0,30	1401	18,9	9,1	9,66	72,70	60,04
13	100	0,20	997	11,2	3,4	5	86,61	116,00
14		0,22	1089	11,3	4,5	5,4	93,98	107,41
15		0,24	1180	11,3	5,2	5,9	102,04	98,31
16		0,26	1269	11,4	5,7	6,3	108,95	92,06
17		0,28	1355	11,6	6,1	7,1	114,48	81,69
18		0,30	1410	11,7	6,5	7,333	118,21	79,09
19	125	0,20	947	8,1	2	4,1	113,58	141,46
20		0,22	1037	8,2	3,1	4,4	123,17	131,82
21		0,24	1123	8,3	3,8	4,8	132,05	120,83
22		0,26	1189	8,4	4,2	5,4	138,33	107,41
23		0,28	1257	8,5	4,5	5,75	144,71	100,87
24		0,30	1336	8,75	5	5,75	149,60	100,87
25	150	0,20	909	6,3	0,8	3,6	140,00	161,11
26		0,22	996	6,6	2,3	3,7	146,82	156,76
27		0,24	1080	6,6	2,9	4,1	159,55	141,46
28		0,26	1165	6,3	3,4	4,4	180,63	131,82
29		0,28	1246	6,4	3,2	5,4	190,47	107,41
30		0,30	1326	6,4	4	5,033	202,97	115,24

Экспериментальные исследования изменения температуры на глубине 0,5 мм при различных подачах инструмента

Для определения температурно-временных параметров термического цикла процесса ОТП обработку проводили при установленном оптимальном режиме механического нагружения ($F_n=3500$ Н, $n=4000$ об/мин и времени разогрева $t_p=6$ с) с различными скоростями подачи инструмента f_n . Было проведено 7 экспериментов с подачами $f_n=175; 150; 125; 100; 75; 50; 25$ мм/мин.

Полученные результаты приведены на рисунке Б.1 и показывают закономерности изменения термических циклов в материале поверхностного слоя от подачи инструмента.

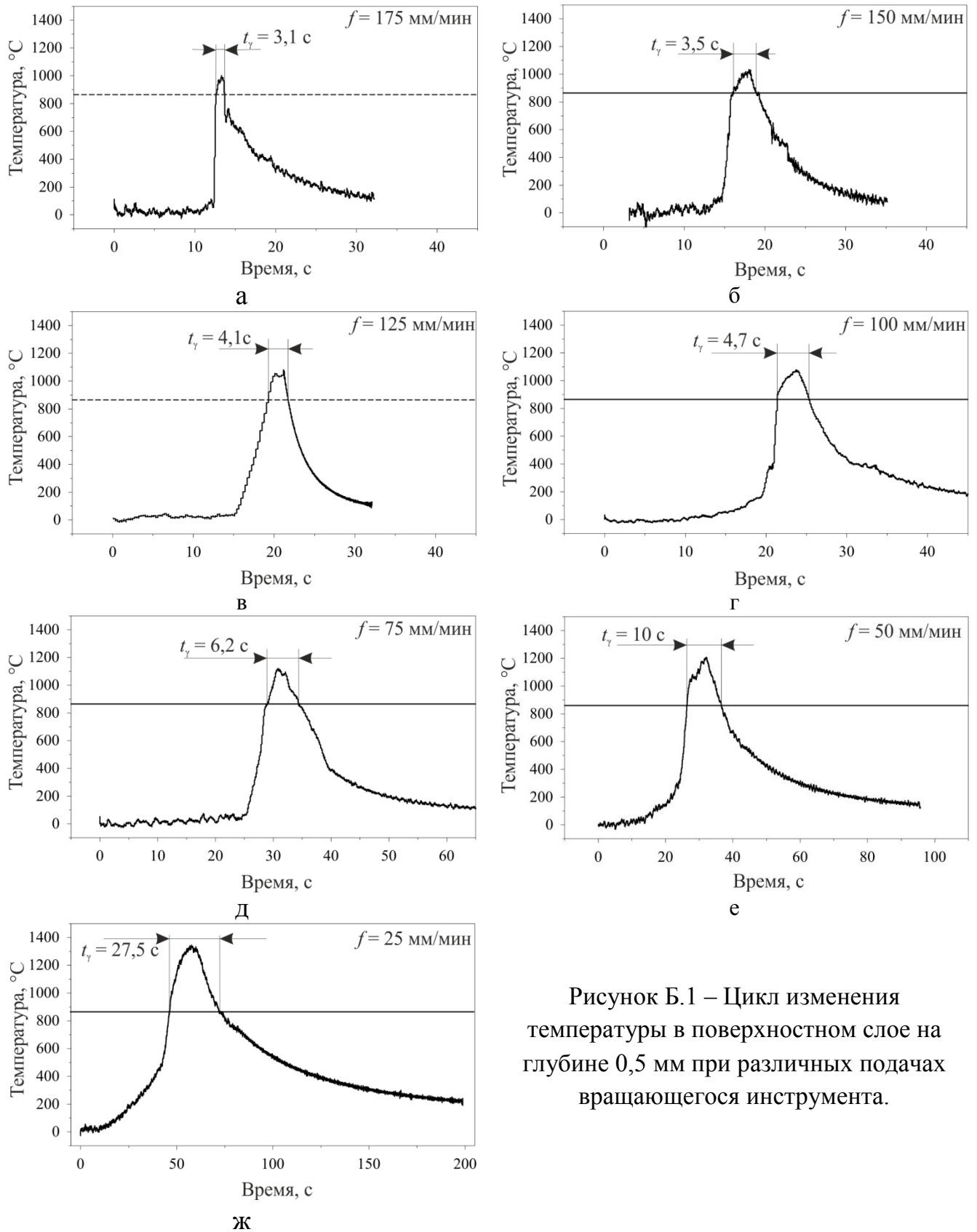


Рисунок Б.1 – Цикл изменения температуры в поверхностном слое на глубине 0,5 мм при различных подачах вращающегося инструмента.

Таблица В.1 Результаты измерения микротвердости $HV_{0,05}$ после ОТП с однократным линейным движением инструмента со скоростью подачи $f = 25$ мм/мин

Глубина мкм	№ измерения	d1 мкм	d2 мкм	Микротвердость $HV_{0,05}$	Среднее значение микротвердости $HV_{0,05}$	Стандартное отклонение $\delta HV_{0,05}$
10	1	10,52	10,71	823	833,3	11,68
	2	10,32	10,61	846		
	3	10,81	10,32	831		
20	1	10,42	10,32	862	831,3	26,56
	2	10,71	10,61	816		
	3	10,52	10,81	816		
30	1	10,81	10,71	801	801,0	7,00
	2	10,81	10,81	794		
	3	11,10	10,32	808		
40	1	10,81	10,32	831	764,3	57,81
	2	11,29	11,19	734		
	3	11,29	11,29	728		
50	1	10,81	11,39	753	734,0	16,82
	2	11,48	11,19	721		
	3	11,10	11,48	728		
70	1	11,58	11,58	692	692,0	17,00
	2	11,39	12,06	675		
	3	11,39	11,48	709		
90	1	11,67	11,87	669	634,7	30,07
	2	12,45	12,16	613		
	3	12,16	12,25	622		
110	1	12,25	11,87	637	651,3	16,26
	2	11,48	12,45	648		
	3	11,67	11,87	669		
130	1	11,67	11,87	669	673,0	22,27
	2	11,67	12,16	653		
	3	11,58	11,48	697		
150	1	11,39	12,16	669	684,0	14,11
	2	11,10	11,96	697		

	3	11,67	11,58	686		
200	1	11,19	11,96	692		
	2	11,29	11,29	728	704,0	20,78
	3	11,48	11,67	692		
250	1	11,29	11,29	728		
	2	11,29	12,06	680	680,0	48,00
	3	11,87	12,35	632		
300	1	11,87	12,16	643		
	2	11,67	11,96	664	662,3	18,56
	3	11,87	11,48	680		
350	1	11,29	11,58	709		
	2	11,67	12,06	658	668,0	37,03
	3	11,96	12,16	637		
400	1	12,06	12,16	632		
	2	11,58	11,87	675	653,3	21,50
	3	11,87	11,96	653		
450	1	12,06	12,54	613		
	2	12,45	12,35	603	628,3	35,57
	3	11,58	11,96	669		
500	1	11,87	12,16	643		
	2	12,06	12,83	599	620,0	22,07
	3	12,06	12,45	618		
550	1	12,16	12,45	613		
	2	12,16	12,54	608	616,0	9,85
	3	12,06	12,25	627		
600	1	11,96	12,45	622		
	2	12,54	12,25	603	608,0	12,29
	3	12,35	12,54	599		
650	1	12,54	12,64	585		
	2	12,35	12,64	594	594,0	9,00
	3	12,25	12,54	603		
700	1	12,45	13,22	563		
	2	12,45	12,83	580	587,0	28,16
	3	12,25	12,25	618		
750	1	11,87	12,45	627		

	2	12,54	12,35	599	595,0	34,18
	3	12,45	13,31	559		
800	1	12,74	12,83	567		
	2	12,54	12,83	576	563,0	15,39
	3	12,83	13,22	546		
850	1	12,54	13,80	535		
	2	13,22	13,51	519	532,0	11,79
	3	12,74	13,41	542		
900	1	12,74	13,41	542		
	2	13,12	13,22	535	534,7	7,51
	3	13,12	13,41	527		
1000	1	13,51	13,60	505		
	2	13,80	13,41	501	500,0	5,57
	3	13,41	13,99	494		
1100	1	13,51	14,18	484		
	2	13,60	13,89	490	478,3	15,31
	3	13,70	14,67	461		
1200	1	13,70	14,28	474		
	2	14,47	14,86	431	447,3	23,29
	3	14,47	14,67	437		
1300	1	14,47	15,05	425		
	2	14,86	14,76	423	419,0	8,72
	3	15,05	15,05	409		
1400	1	15,53	14,86	402		
	2	14,76	14,57	431	421,3	16,74
	3	14,67	14,67	431		
1500	1	13,89	14,18	470		
	2	14,47	14,67	437	447,0	19,97
	3	14,28	14,96	434		
1600	1	15,24	16,02	380		
	2	15,63	16,02	370	380,3	10,50
	3	15,34	15,44	391		
1700	1	15,15	15,34	399		
	2	14,76	14,96	420	411,3	10,97
	3	14,57	15,34	415		

1800	1	16,69	15,05	368		
	2	16,02	14,86	389	377,3	10,69
	3	15,82	15,63	375		
1900	1	14,76	16,31	384		
	2	15,73	16,02	368	372,0	10,58
	3	15,92	16,02	364		
2000	1	17,08	18,53	293		
	2	16,50	16,69	337	317,7	22,48
	3	16,11	17,75	323		
2100	1	20,55	19,20	235		
	2	19,01	20,26	241	229,3	15,31
	3	20,74	21,13	212		
2200	1	20,94	20,65	214		
	2	21,13	20,26	216	218,3	5,86
	3	20,07	20,55	225		

Таблица В.2. Результаты измерения микротвердости $HV_{0,05}$ после ОТП с однократным линейным движением инструмента со скоростью подачи $f = 50$ мм/мин

Глубина мкм	№ измерения	d1 мкм	d2 мкм	Микротвердость $HV_{0,05}$	Среднее значение микротвердости	Стандартное отклонение
					$HV_{0,05}$	$\delta HV_{0,05}$
10	1	10,71	12,45	692		
	2	11,48	11,58	697	716,3	37,90
	3	10,32	11,77	760		
20	1	12,25	13,70	551		
	2	11,10	13,31	622	625,3	76,05
	3	11,19	11,77	703		
30	1	11,96	12,16	637		
	2	11,87	12,74	613	593,7	55,58
	3	12,35	14,09	531		
40	1	12,35	13,41	559		
	2	13,60	13,70	497	551,7	51,39
	3	13,60	11,29	599		

	1	10,71	12,25	703		
50	2	13,03	13,12	542	590,7	97,57
	3	13,31	13,22	527		
	1	11,77	13,41	585		
70	2	11,77	11,77	669	644,7	51,96
	3	11,10	12,25	680		
	1	12,35	11,19	669		
90	2	11,87	11,96	653	592,3	119,20
	3	13,99	14,57	455		
	1	11,77	12,06	653		
110	2	10,81	12,16	703	703,0	50,00
	3	11,00	11,19	753		
	1	11,29	12,06	680		
130	2	11,39	11,87	686	686,0	6,00
	3	11,29	11,87	692		
	1	11,48	11,87	680		
150	2	11,67	11,48	692	689,7	8,74
	3	11,19	11,87	697		
	1	13,03	13,03	546		
200	2	12,74	12,35	589	571,7	22,68
	3	12,74	12,54	580		
	1	12,74	13,60	535		
250	2	13,12	13,12	538	541,3	8,50
	3	12,54	13,41	551		
	1	12,54	13,41	551		
300	2	13,03	13,03	546	550,7	4,51
	3	12,16	13,70	555		
	1	12,35	13,41	559		

350	2	12,93	13,12	546	563,3	19,86
	3	12,83	12,35	585		
	1	13,41	12,45	555		
400	2	12,64	12,16	603	576,7	24,34
	3	12,93	12,54	572		
	1	13,03	12,74	559		
450	2	13,22	12,83	546	559,0	13,00
	3	12,64	12,83	572		
	1	12,93	12,16	589		
500	2	13,12	13,12	538	562,0	25,63
	3	12,74	13,03	559		
	1	12,74	12,64	576		
550	2	12,45	13,12	567	571,7	4,51
	3	12,54	12,93	572		
	1	12,93	12,93	555		
600	2	12,64	12,74	576	559,0	15,39
	3	12,93	13,12	546		
	1	12,74	12,74	572		
650	2	12,54	12,83	576	567,7	11,15
	3	12,74	13,12	555		
	1	12,93	12,83	559		
700	2	12,93	12,83	559	557,7	2,31
	3	12,93	12,93	555		
	1	11,96	12,54	618		
750	2	12,54	12,74	580	575,0	45,71
	3	13,12	13,41	527		
	1	13,51	13,60	505		
800	2	13,60	13,60	501	506,0	5,57

	3	13,22	13,70	512		
	1	13,60	13,80	494		
850	2	12,83	13,89	519	506,0	12,53
	3	13,41	13,70	505		
	1	13,41	13,70	505		
900	2	13,31	13,51	515	507,0	7,21
	3	13,51	13,70	501		
	1	13,80	13,99	480		
1000	2	13,51	13,70	501	485,0	14,18
	3	13,70	14,28	474		
	1	14,09	13,99	470		
1100	2	13,51	14,18	484	469,7	14,50
	3	14,18	14,38	455		
	1	14,18	14,09	464		
1200	2	14,18	14,67	446	463,3	17,01
	3	13,51	14,28	480		
	1	14,57	14,96	425		
1300	2	14,57	15,15	420	421,7	2,89
	3	14,47	15,24	420		
	1	14,67	15,34	412		
1400	2	15,24	15,15	402	403,3	8,08
	3	14,96	15,63	396		
	1	15,34	16,21	373		
1500	2	15,05	16,02	384	373,7	10,02
	3	15,73	16,21	364		
	1	15,82	16,60	353		
1600	2	15,92	15,82	368	350,7	18,61
	3	16,60	16,88	331		

	1	16,88	18,24	301		
1700	2	19,88	20,55	227	288,3	56,08
	3	16,88	16,31	337		
	1	19,01	19,59	249		
1800	2	18,72	19,88	249	243,3	9,81
	3	19,78	20,17	232		
	1	19,78	20,45	229		
1900	2	20,45	21,13	214	217,3	10,41
	3	20,45	21,71	209		

Таблица В.3. Результаты измерения микротвердости $HV_{0,05}$ после ОТП с однократным линейным движением инструмента со скоростью подачи $f = 75$ мм/мин

Глубина мкм	№ измерения	d1 мкм	d2 мкм	Микротвердость $HV_{0,05}$	Среднее значение микротвердости $HV_{0,05}$	Стандартное отклонение $\delta HV_{0,05}$
	1	11,10	10,61	787		
10	2	11,67	10,03	787	765,0	38,11
	3	11,10	11,58	721		
	1	10,61	10,90	801		
20	2	10,81	11,10	773	791,7	16,17
	3	10,90	10,61	801		
	1	9,94	11,10	838		
30	2	10,52	10,71	823	816,0	26,21
	3	10,23	11,48	787		
	1	10,61	10,90	801		
40	2	9,94	11,00	846	826,0	22,91
	3	11,67	9,46	831		
	1	11,10	10,23	816		
50	2	10,23	10,32	878	836,7	35,80
	3	11,00	10,32	816		

	1	11,67	11,87	669		
70	2	12,06	11,67	658	682,7	33,65
	3	11,19	11,48	721		
	1	11,29	11,58	709		
90	2	11,58	11,77	680	703,3	21,08
	3	11,58	11,10	721		
	1	11,39	11,29	721		
110	2	12,16	11,96	637	661,7	51,63
	3	11,48	12,83	627		
	1	11,87	12,06	648		
130	2	11,10	12,35	675	683,7	40,70
	3	11,00	11,58	728		
	1	11,77	11,87	664		
150	2	11,87	11,77	664	677,0	22,52
	3	11,10	11,87	703		
	1	11,48	11,96	675		
200	2	11,67	11,96	664	669,3	5,51
	3	11,87	11,67	669		
	1	11,96	11,87	653		
250	2	11,96	11,96	648	633,3	29,84
	3	12,35	12,54	599		
	1	12,06	12,06	637		
300	2	11,87	12,06	648	659,0	29,10
	3	11,58	11,58	692		
	1	11,39	12,54	648		
350	2	11,39	12,54	648	642,7	9,24
	3	12,16	12,06	632		

	1	11,87	12,64	618		
400	2	12,35	12,45	603	600,3	19,14
	3	12,06	13,22	580		
	1	11,96	12,83	603		
450	2	11,96	12,54	618	605,0	12,12
	3	12,06	12,93	594		
	1	12,25	12,16	622		
500	2	11,96	12,54	618	604,0	27,78
	3	12,74	12,74	572		
	1	12,45	12,74	585		
550	2	12,83	13,03	555	560,7	22,05
	3	12,35	13,80	542		
	1	12,54	12,74	580		
600	2	12,45	12,74	585	583,3	2,89
	3	12,45	12,74	585		
	1	12,54	13,22	559		
650	2	12,25	12,64	599	563,0	34,18
	3	13,12	13,31	531		
	1	12,93	13,41	535		
700	2	13,12	13,31	531	528,3	8,33
	3	13,22	13,51	519		
	1	13,31	13,51	515		
750	2	13,22	13,80	508	506,7	9,07
	3	12,93	14,38	497		
	1	13,22	13,80	508		
800	2	13,22	13,80	508	503,3	8,08
	3	13,12	14,28	494		
	1	13,22	14,09	497		

850	2	13,22	14,76	474	480,3	14,57
	3	14,18	13,89	470		
	1	13,60	14,67	464		
900	2	13,31	14,09	494	477,3	15,28
	3	13,41	14,57	474		
	1	14,38	14,18	455		
1000	2	14,28	14,38	452	445,0	14,80
	3	14,67	14,76	428		
	1	13,99	14,67	452		
1100	2	13,60	14,86	458	447,0	14,18
	3	14,28	15,05	431		
	1	15,53	17,17	347		
1200	2	15,34	16,21	373	365,0	15,62
	3	15,05	16,40	375		
	1	16,88	17,17	320		
1300	2	16,88	17,37	316	325,0	12,29
	3	16,11	16,98	339		
	1	17,37	18,91	282		
1400	2	19,78	20,45	229	266,3	32,47
	3	17,66	18,24	288		
	1	19,88	21,52	216		
1500	2	20,65	20,94	214	214,0	2,00
	3	20,65	21,13	212		

Таблица В.4. Результаты измерения микротвердости $HV_{0,05}$ после ОТП с однократным линейным движением инструмента со скоростью подачи $f = 100$ мм/мин

Глубина мкм	№ измерения	d1	d2	Микротвердость $HV_{0,05}$	Среднее значение микротвердости $HV_{0,05}$	Стандартное отклонение $\delta HV_{0,05}$
	1	11,87	10,03	773		

10	2	10,03	10,52	878	827,3	52,60
	3	10,03	11,10	831		
	1	11,19	10,71	773		
20	2	10,71	11,48	753	768,7	14,01
	3	10,61	11,19	780		
	1	11,00	11,00	766		
30	2	10,71	11,39	760	783,0	34,77
	3	11,10	10,13	823		
	1	11,77	11,48	686		
40	2	11,10	11,48	728	707,7	21,03
	3	12,06	10,81	709		
	1	11,48	11,87	680		
50	2	11,39	12,16	669	674,7	5,51
	3	11,87	11,58	675		
	1	11,77	12,35	637		
70	2	12,06	12,25	627	646,3	25,32
	3	11,29	12,16	675		
	1	12,06	11,96	643		
90	2	11,39	11,58	703	666,3	32,15
	3	12,35	11,48	653		
	1	12,16	11,96	637		
110	2	12,16	12,16	627	640,7	15,82
	3	11,48	12,25	658		
	1	12,06	12,83	599		
130	2	11,58	12,45	643	621,3	22,01
	3	12,06	12,35	622		
	1	12,45	12,35	603		
150	2	11,87	11,77	664	641,7	33,62

	3	11,87	11,87	658		
	1	11,77	12,25	643		
200	2	11,39	12,35	658	670,0	34,60
	3	11,58	11,29	709		
	1	11,29	12,16	675		
250	2	11,58	12,35	648	651,7	21,73
	3	11,77	12,45	632		
	1	11,39	12,93	627		
300	2	11,39	12,35	658	640,7	15,82
	3	11,67	12,45	637		
	1	11,48	12,54	643		
350	2	11,96	12,35	627	632,3	9,24
	3	11,87	12,45	627		
	1	12,06	12,54	613		
400	2	12,06	12,54	613	617,7	8,08
	3	11,87	12,45	627		
	1	12,25	12,54	603		
450	2	12,74	12,93	563	582,0	20,07
	3	12,25	13,03	580		
	1	12,64	13,12	559		
500	2	12,06	12,93	594	576,3	17,50
	3	12,45	12,93	576		
	1	12,64	13,41	546		
550	2	13,12	12,54	563	561,7	15,04
	3	12,54	12,83	576		
	1	12,93	13,03	551		
600	2	12,74	13,31	546	560,7	21,22
	3	11,96	13,22	585		

	1	12,83	13,51	535		
650	2	13,22	13,80	508	523,3	13,87
	3	13,41	13,12	527		
	1	13,70	13,51	501		
700	2	13,51	13,51	508	504,7	3,51
	3	13,70	13,41	505		
	1	13,22	13,51	519		
750	2	14,09	13,80	477	491,0	24,25
	3	13,99	13,89	477		
	1	13,80	14,09	477		
800	2	13,89	13,99	477	470,7	10,97
	3	14,18	14,28	458		
	1	13,12	13,89	508		
850	2	13,51	14,18	484	493,0	13,08
	3	14,47	13,12	487		
	1	14,18	14,57	449		
900	2	13,41	14,47	477	462,3	14,05
	3	13,89	14,47	461		
	1	14,38	15,15	425		
1000	2	14,76	14,86	423	430,3	11,02
	3	14,09	14,86	443		
	1	15,15	14,47	423		
1100	2	15,24	15,44	394	410,7	14,98
	3	15,05	14,86	415		
	1	15,44	15,44	389		
1200	2	15,15	16,21	377	387,3	9,61
	3	14,86	15,73	396		

	1	16,40	17,27	327		
1300	2	18,33	19,88	254	278,0	42,44
	3	18,24	20,07	253		
	1	21,13	20,36	215		
1400	2	20,26	20,74	221	216,7	3,79
	3	21,32	20,26	214		

Таблица В.5. Результаты измерения микротвердости $HV_{0,05}$ после ОТП с однократным линейным движением инструмента со скоростью подачи $f = 125$ мм/мин

Глубина мкм	№ измерения	d1 мкм	d2 мкм	Микротвердость $HV_{0,05}$	Среднее значение микротвердости $HV_{0,05}$	Стандартное отклонение $\delta HV_{0,05}$
	1	12,64	13,31	551		
10	2	12,64	11,29	648	565,3	76,51
	3	13,41	13,89	497		
	1	12,54	13,31	555		
20	2	11,48	13,51	594	575,0	19,52
	3	12,25	13,12	576		
	1	12,83	11,29	637		
30	2	11,87	10,81	721	629,7	95,21
	3	12,83	13,60	531		
	1	11,48	12,83	627		
40	2	11,10	13,03	637	653,7	37,86
	3	11,19	11,87	697		
	1	10,90	11,10	766		
50	2	9,07	11,00	921	820,0	87,54
	3	11,00	10,90	773		
	1	9,84	10,13	930		
70	2	10,13	9,65	948	933,0	13,75
	3	10,03	10,03	921		

	1	10,52	10,42	846		
90	2	10,61	11,19	780	804,3	36,25
	3	10,71	11,00	787		
	1	11,39	11,77	692		
110	2	11,39	11,39	715	711,7	18,23
	3	11,39	11,19	728		
	1	10,90	11,39	747		
130	2	11,58	11,58	692	704,7	37,63
	3	11,96	11,48	675		
	1	10,90	11,77	721		
150	2	11,39	11,39	715	715,0	6,00
	3	11,29	11,58	709		
	1	11,58	11,67	686		
200	2	11,29	11,39	721	701,3	17,90
	3	11,29	11,77	697		
	1	11,39	11,87	686		
250	2	11,77	11,87	664	690,3	28,75
	3	10,71	11,96	721		
	1	11,87	11,39	686		
300	2	11,67	11,48	692	690,0	3,46
	3	11,39	11,77	692		
	1	11,48	11,96	675		
350	2	11,77	12,16	648	669,7	19,55
	3	11,19	12,06	686		
	1	11,67	12,06	658		
400	2	11,39	12,16	669	654,7	16,26
	3	12,25	11,87	637		
	1	11,87	11,77	664		

450	2	11,10	12,16	686	675,0	11,00
	3	11,87	11,58	675		
	1	12,74	12,25	594		
500	2	11,77	12,06	653	616,7	31,79
	3	12,06	12,74	603		
	1	11,87	12,45	627		
550	2	12,45	12,45	599	611,3	14,29
	3	12,16	12,54	608		
	1	12,54	12,45	594		
600	2	12,74	12,16	599	613,7	29,84
	3	12,25	11,67	648		
	1	12,64	12,54	585		
650	2	12,54	12,64	585	585,0	0,00
	3	12,64	12,54	585		
	1	12,35	13,03	576		
700	2	13,03	13,12	542	548,3	25,11
	3	13,51	13,03	527		
	1	13,03	13,80	515		
750	2	13,22	13,60	515	520,3	9,24
	3	13,22	13,22	531		
	1	13,31	13,12	531		
800	2	13,41	13,60	508	523,3	13,28
	3	12,83	13,60	531		
	1	13,41	13,80	501		
850	2	13,03	13,70	519	509,3	9,07
	3	13,22	13,80	508		
	1	13,41	13,70	505		
900	2	13,70	14,09	480	486,3	16,44

	3	13,89	14,09	474		
	1	14,28	14,18	458		
1000	2	14,28	14,18	458	453,0	8,66
	3	13,99	14,96	443		
	1	14,09	15,15	434		
1100	2	14,57	14,96	425	422,7	12,66
	3	14,86	15,24	409		
	1	15,63	15,24	389		
1200	2	15,44	16,11	373	387,0	13,11
	3	15,15	15,34	399		
	1	17,46	16,79	316		
1300	2	16,02	17,08	339	327,3	11,50
	3	16,79	16,88	327		
	1	19,59	20,45	231		
1400	2	19,01	19,59	249	240,7	9,07
	3	18,91	20,26	242		
	1	19,78	20,26	231		
1500	2	20,36	21,23	214	218,3	11,15
	3	20,74	21,32	210		

Таблица В.6. Результаты измерения микротвердости $HV_{0,05}$ после ОТП с однократным линейным движением инструмента со скоростью подачи $f = 150$ мм/мин

Глубина мкм	№ измерения	d1 мкм	d2 мкм	Микротвердость $HV_{0,05}$	Среднее значение микротвердости $HV_{0,05}$	Стандартное отклонение $\delta HV_{0,05}$
	1	10,32	9,55	939		
10	2	10,71	9,94	870	890,3	42,34
	3	10,42	10,32	862		
	1	10,61	10,71	816		
20	2	11,39	10,81	753	800,0	41,39

	3	10,13	11,00	831		
	1	10,71	11,29	766		
30	2	11,19	11,10	747	764,3	16,56
	3	10,81	11,00	780		
	1	11,10	11,58	721		
40	2	11,29	11,77	697	707,0	12,49
	3	11,10	11,87	703		
	1	11,39	11,77	692		
50	2	10,81	11,96	715	699,7	13,28
	3	11,39	11,77	692		
	1	11,48	12,06	669		
70	2	11,58	12,06	664	663,7	5,51
	3	11,58	12,16	658		
	1	11,39	12,35	658		
90	2	11,96	11,67	664	669,3	14,74
	3	11,67	11,58	686		
	1	12,25	12,83	589		
110	2	11,77	12,74	618	614,7	24,17
	3	11,29	12,83	637		
	1	11,77	12,35	637		
130	2	11,48	12,74	632	625,7	15,50
	3	11,67	13,03	608		
	1	11,96	12,54	618		
150	2	11,48	12,74	632	625,7	7,09
	3	11,10	13,22	627		
	1	11,48	12,54	643		
200	2	11,29	12,35	664	655,0	10,82
	3	11,39	12,35	658		

	1	11,77	12,54	627		
250	2	11,58	13,51	589	608,0	19,00
	3	11,58	13,12	608		
	1	11,67	13,12	603		
300	2	12,25	12,64	599	613,0	20,88
	3	11,48	12,64	637		
	1	11,87	12,64	618		
350	2	11,58	12,74	627	610,0	22,11
	3	12,74	12,45	585		
	1	12,35	13,31	563		
400	2	11,67	13,03	608	586,7	22,59
	3	11,87	13,22	589		
	1	12,83	13,31	542		
450	2	12,06	12,74	603	573,7	30,57
	3	12,06	13,31	576		
	1	12,06	13,12	585		
500	2	12,16	12,74	599	583,7	16,04
	3	12,35	13,22	567		
	1	12,25	13,22	572		
550	2	12,25	13,60	555	555,0	17,00
	3	12,54	13,70	538		
	1	12,45	13,70	542		
600	2	12,16	13,51	563	552,0	10,54
	3	12,45	13,51	551		
	1	12,64	13,80	531		
650	2	12,93	13,70	523	527,0	4,00
	3	12,83	13,70	527		

	1	12,83	13,80	523		
700	2	13,31	13,80	505	514,3	9,02
	3	13,12	13,70	515		
	1	13,22	14,47	484		
750	2	13,31	14,18	490	486,0	3,46
	3	13,51	14,18	484		
	1	13,12	14,28	494		
800	2	13,41	14,28	484	490,7	5,77
	3	13,22	14,18	494		
	1	13,41	14,57	474		
850	2	13,70	14,86	455	469,7	13,05
	3	13,22	14,57	480		
	1	13,80	14,47	464		
900	2	13,51	14,28	480	473,7	8,50
	3	13,51	14,38	477		
	1	13,80	14,38	467		
1000	2	13,89	15,15	440	447,0	17,58
	3	14,09	15,15	434		
	1	14,57	14,76	431		
1100	2	14,96	14,96	415	427,7	11,37
	3	14,18	14,96	437		
	1	14,09	15,92	412		
1200	2	14,86	15,92	391	399,0	11,36
	3	14,96	15,73	394		
	1	16,60	18,04	309		
1300	2	16,98	17,46	313	305,0	10,58
	3	17,66	17,95	293		
	1	19,20	19,59	247		

1400	2	19,49	20,26	235	236,0	10,54
	3	19,68	20,84	226		

Таблица В.7. Результаты измерения микротвердости $HV_{0,05}$ после ОТП с однократным линейным движением инструмента со скоростью подачи $f = 175$ мм/мин

Глубина мкм	№ измерения	d1 мкм	d2 мкм	Микротвердость $HV_{0,05}$	Среднее значение микротвердости $HV_{0,05}$	Стандартное отклонение $\delta HV_{0,05}$
	1	10,52	10,03	878		
10	2	10,71	9,74	886	898,0	28,00
	3	9,74	10,23	930		
	1	9,94	10,90	854		
20	2	10,13	10,90	838	848,7	9,24
	3	10,03	10,81	854		
	1	10,52	10,90	808		
30	2	10,71	10,90	794	803,3	8,08
	3	10,52	10,90	808		
	1	11,96	11,10	697		
40	2	11,96	11,19	692	677,3	29,84
	3	11,77	12,25	643		
	1	12,25	11,67	648		
50	2	12,16	11,39	669	679,3	37,58
	3	11,48	11,19	721		
	1	10,71	11,58	747		
70	2	12,06	11,87	648	679,3	58,65
	3	11,67	12,35	643		
	1	11,58	12,83	622		
90	2	11,96	12,64	613	627,7	18,18
	3	11,67	12,25	648		
	1	11,87	12,35	632		

110	2	11,77	12,16	648	631,0	17,52
	3	11,96	12,64	613		
	1	12,06	12,25	627		
130	2	11,39	12,83	632	628,7	2,89
	3	11,77	12,54	627		
	1	11,77	12,25	643		
150	2	11,58	12,25	653	636,3	20,82
	3	11,58	13,03	613		
	1	12,16	12,83	594		
200	2	11,39	12,64	643	619,7	24,58
	3	11,87	12,54	622		
	1	11,96	12,74	608		
250	2	12,06	12,93	594	600,3	7,09
	3	12,06	12,83	599		
	1	12,06	12,74	603		
300	2	12,16	12,74	599	605,0	7,21
	3	12,06	12,54	613		
	1	12,16	12,74	599		
350	2	11,67	13,60	580	592,7	10,97
	3	11,58	13,31	599		
	1	11,87	13,22	589		
400	2	12,16	13,51	563	571,7	15,01
	3	12,45	13,22	563		
	1	12,83	13,89	519		
450	2	12,35	13,41	559	551,3	29,26
	3	12,16	13,22	576		
	1	12,64	13,22	555		
500	2	13,03	13,41	531	541,3	12,34

	3	12,83	13,41	538		
	1	12,64	13,51	542		
550	2	13,12	13,12	538	535,7	7,77
	3	12,83	13,70	527		
	1	13,03	13,89	512		
600	2	12,93	13,22	542	532,0	17,32
	3	12,45	13,70	542		
	1	12,74	13,99	519		
650	2	12,93	13,89	515	521,7	8,33
	3	12,74	13,70	531		
	1	13,22	13,60	515		
700	2	13,51	13,80	497	505,7	9,02
	3	13,22	13,89	505		
	1	13,70	14,38	470		
750	2	12,93	14,09	508	495,3	21,94
	3	13,12	13,89	508		
	1	13,80	14,67	458		
800	2	13,70	14,09	480	477,3	18,15
	3	13,22	14,18	494		
	1	13,22	13,89	505		
850	2	13,60	14,09	484	485,3	19,04
	3	13,60	14,57	467		
	1	13,80	14,57	461		
900	2	13,89	14,86	449	455,0	6,00
	3	13,80	14,76	455		
	1	13,99	14,86	446		
1000	2	14,28	14,96	434	449,0	16,70
	3	13,41	14,76	467		

	1	14,67	14,38	440		
1100	2	14,47	14,96	428	431,0	7,94
	3	14,38	15,15	425		
	1	15,05	15,82	389		
1200	2	14,86	16,11	387	396,0	13,89
	3	14,47	15,53	412		
	1	16,98	17,95	304		
1300	2	17,75	17,46	299	287,3	24,66
	3	18,62	19,20	259		
	1	18,53	19,88	252		
1400	2	20,36	21,13	215	229,0	20,07
	3	20,45	20,65	220		

Таблица В.8. Результаты измерения микротвердости $HV_{0,05}$ после ОТП с однократным линейным движением инструмента со скоростью подачи $f = 200$ мм/мин

Глубина мкм	№ измерения	d1 мкм	d2 мкм	Микротвердость $HV_{0,05}$	Среднее значение микротвердости $HV_{0,05}$	Стандартное отклонение $\delta HV_{0,05}$
	1	10,03	11,58	794		
10	2	10,71	12,25	703	735,3	50,90
	3	10,81	12,06	709		
	1	10,52	11,58	760		
20	2	9,94	10,61	878	808,3	61,83
	3	10,23	11,48	787		
	1	10,71	11,00	787		
30	2	11,29	11,19	734	769,3	30,60
	3	10,42	11,29	787		
	1	11,19	11,19	740		
40	2	10,81	11,19	766	766,7	27,01
	3	10,32	11,29	794		

	1	11,00	11,48	734		
50	2	11,39	11,10	734	729,7	7,51
	3	11,10	11,58	721		
	1	12,06	11,87	648		
70	2	11,96	12,16	637	644,3	6,35
	3	12,54	11,39	648		
	1	12,16	12,16	627		
90	2	11,96	11,39	680	653,3	26,50
	3	11,96	11,87	653		
	1	12,35	12,16	618		
110	2	12,06	11,96	643	631,0	12,53
	3	12,83	11,39	632		
	1	11,29	12,06	680		
130	2	12,16	11,58	658	653,3	29,28
	3	12,35	12,06	622		
	1	11,77	12,54	627		
150	2	11,29	12,54	653	626,3	27,01
	3	12,25	12,64	599		
	1	12,74	11,77	618		
200	2	13,31	12,06	576	594,3	21,50
	3	12,45	12,64	589		
	1	12,16	12,83	594		
250	2	12,45	12,83	580	582,0	11,14
	3	12,64	12,83	572		
	1	12,93	12,64	567		
300	2	12,16	13,41	567	565,7	2,31
	3	12,74	12,93	563		

	1	11,96	13,03	594		
350	2	12,83	13,22	546	560,7	28,94
	3	13,12	13,03	542		
	1	13,03	12,93	551		
400	2	13,80	13,60	494	511,7	34,12
	3	13,31	14,18	490		
	1	13,51	13,51	508		
450	2	13,22	13,51	519	508,0	11,00
	3	13,51	13,80	497		
	1	13,70	13,70	494		
500	2	13,80	14,18	474	486,0	10,58
	3	13,60	13,89	490		
	1	13,31	13,89	501		
550	2	13,51	13,99	490	495,0	5,57
	3	13,80	13,60	494		
	1	13,22	14,18	494		
600	2	14,38	13,70	470	472,0	21,07
	3	14,38	14,28	452		
	1	14,57	14,09	452		
650	2	14,18	14,47	452	449,0	5,20
	3	14,67	14,28	443		
	1	14,47	14,38	446		
700	2	14,57	14,38	443	441,0	6,25
	3	14,57	14,67	434		
	1	14,86	14,76	423		
750	2	14,57	15,15	420	422,7	2,52
	3	14,57	14,96	425		
	1	15,24	15,34	396		

800	2	15,15	14,96	409	399,7	8,14
	3	15,53	15,15	394		
	1	14,86	15,05	415		
850	2	16,50	15,53	361	371,0	39,95
	3	17,17	16,02	337		
	1	17,27	17,95	299		
900	2	15,34	18,53	323	317,7	16,65
	3	16,21	17,27	331		
	1	20,94	20,17	220		
1000	2	18,72	21,03	235	225,3	8,39
	3	19,49	21,52	221		
	1	19,97	20,07	231		
1100	2	19,78	20,55	228	223,7	10,21
	3	19,97	21,81	212		

Исследование микротвердости по ширине участков кольцевой поверхности после
ОТП по кольцевым траекториям

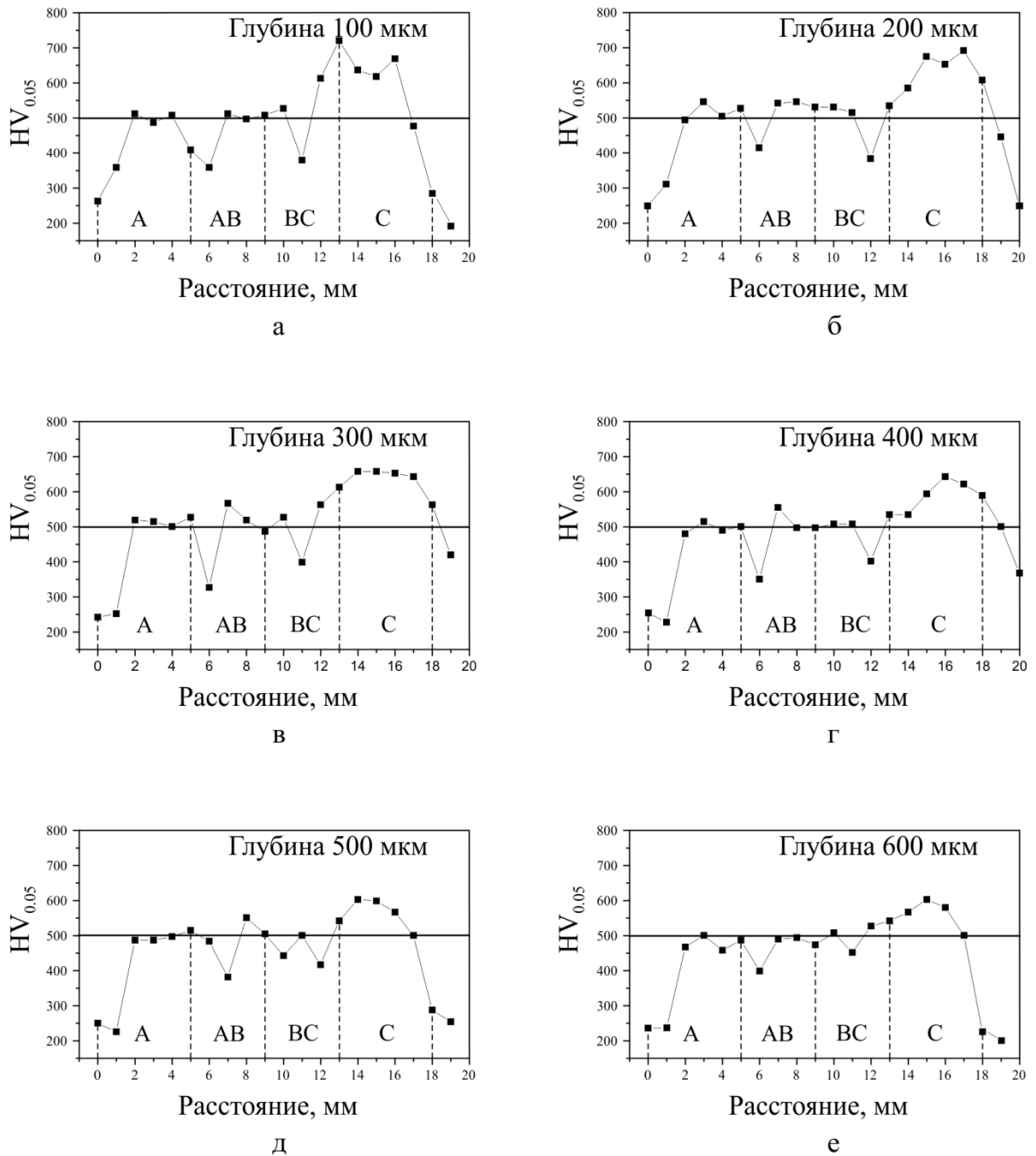


Рисунок Г.1 – Зависимость изменения микротвердости $HV_{0.05}$ по ширине участков кольцевой поверхности в сечении 1–1 на глубине: а – 100 мкм; б – 200 мкм; в – 300 мкм; г – 400 мкм; д – 500 мкм; е – 600 мкм

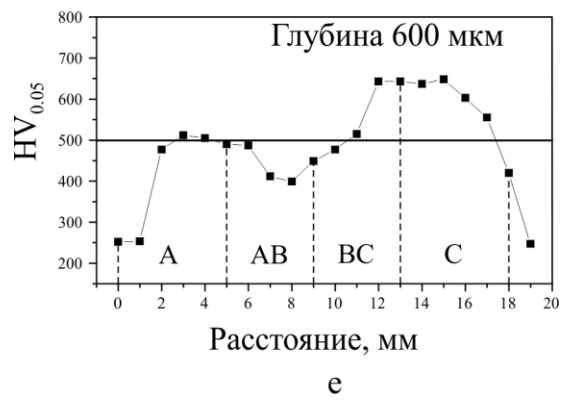
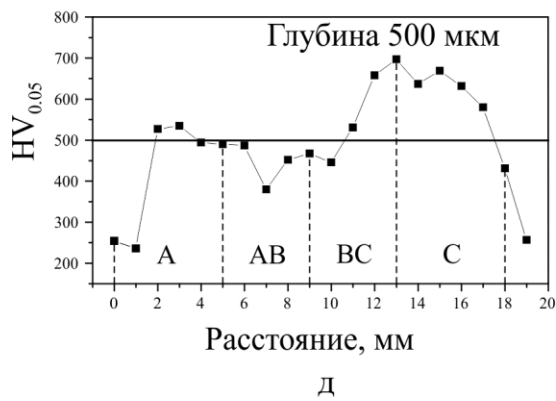
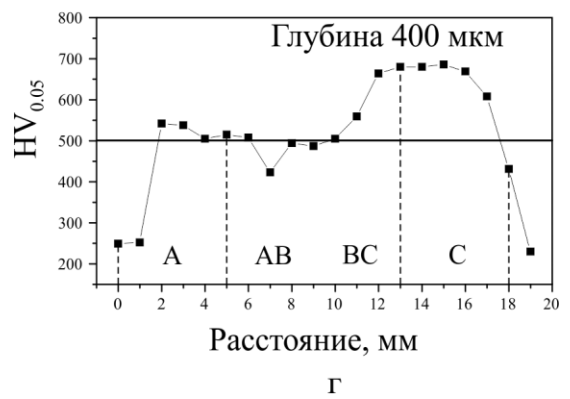
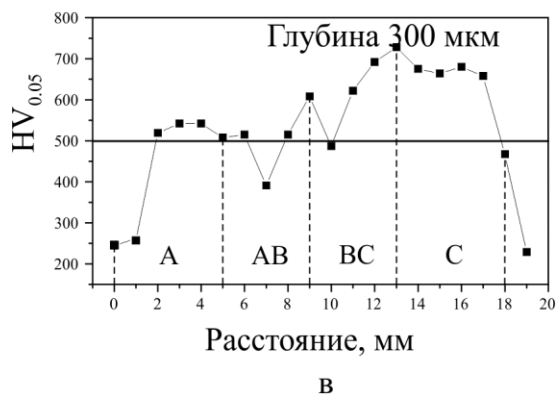
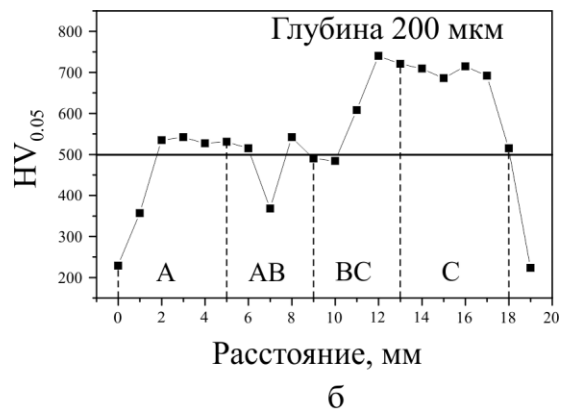
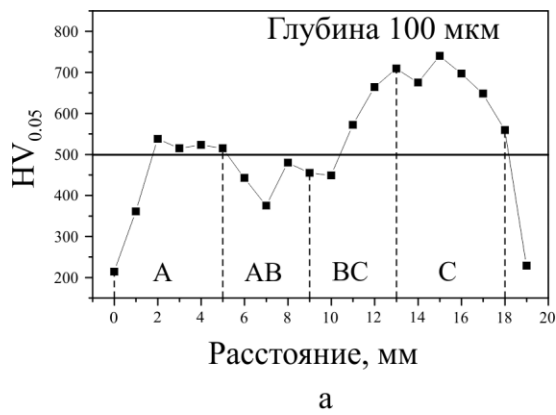


Рисунок Г.2 – Зависимость изменения микротвердости $HV_{0,05}$ по ширине участков кольцевой поверхности в сечении 1–1 на глубине: а – 100 мкм; б – 200 мкм; в – 300 мкм; г – 400 мкм; д – 500 мкм; е – 600 мкм

Исследование микротвердости по ширине участков кольцевой поверхности после
ОТП по верной траектории

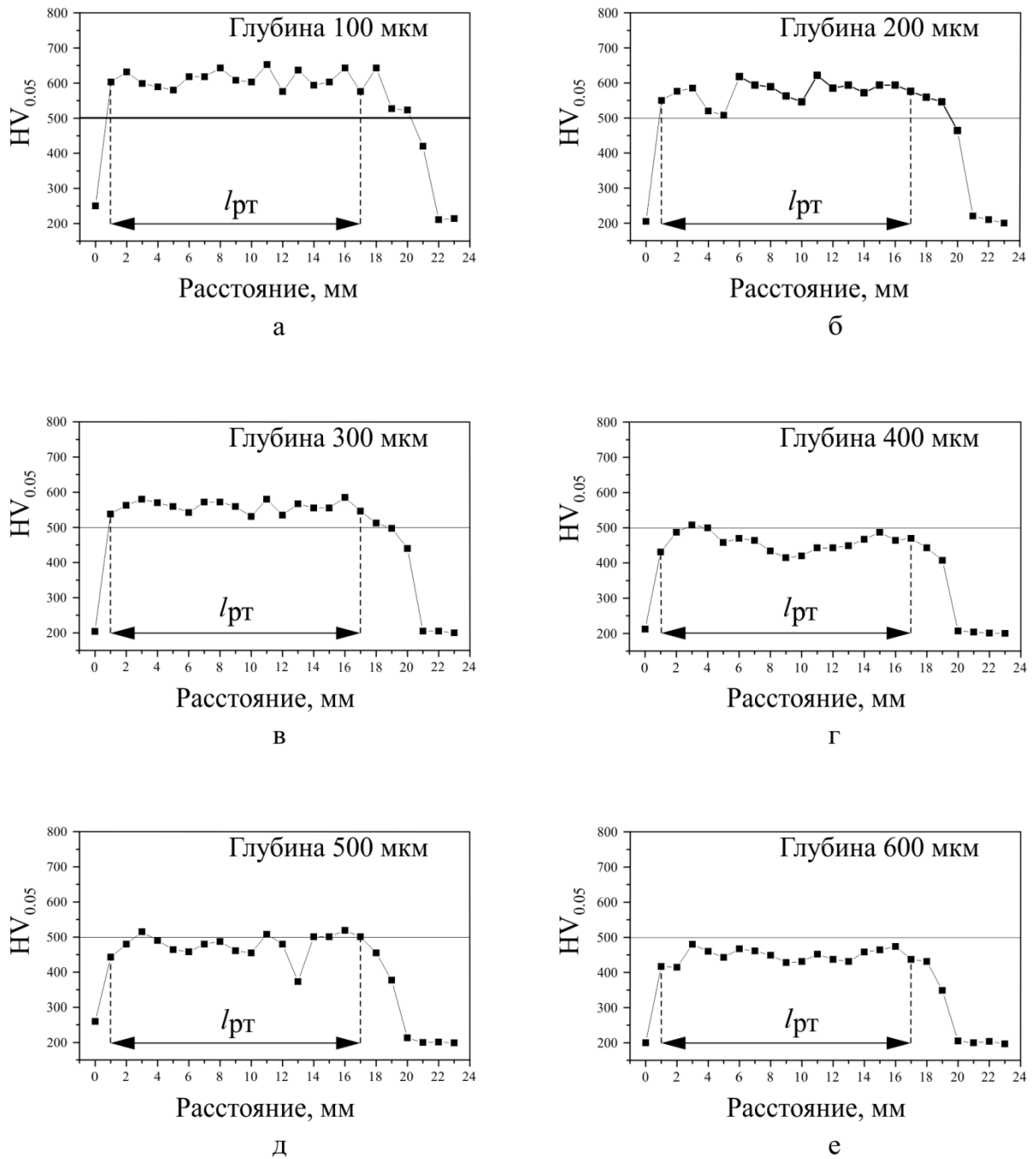


Рисунок Д.1 – Зависимость изменения микротвердости $HV_{0.05}$ вдоль линии b_1 на глубине: а – 100 мкм; б – 200 мкм; в – 300 мкм; г – 400 мкм; д – 500 мкм; е – 600 мкм

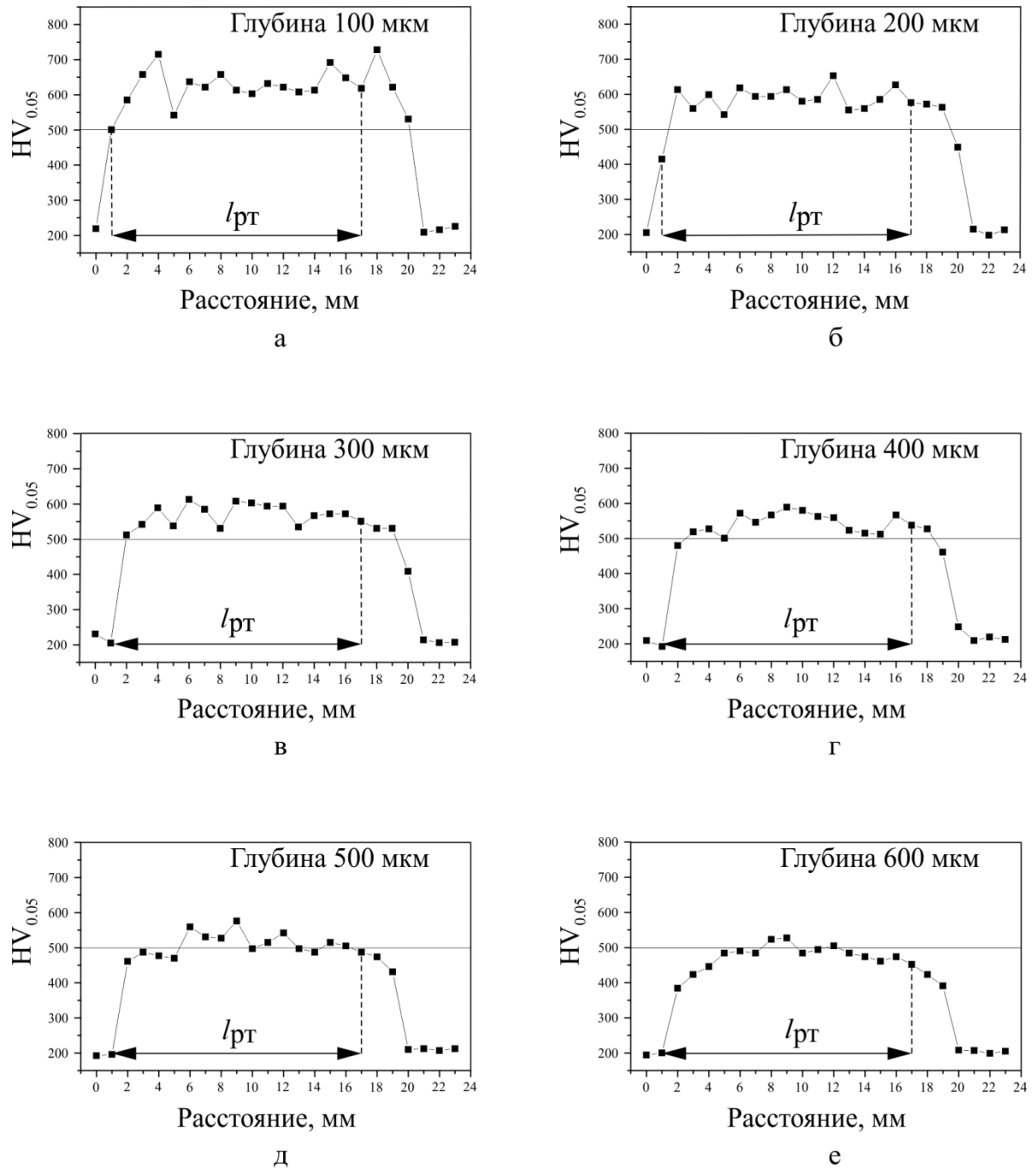
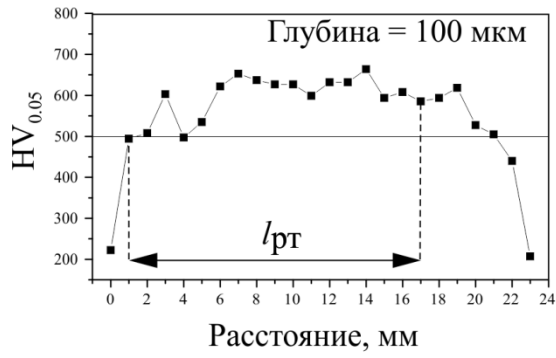
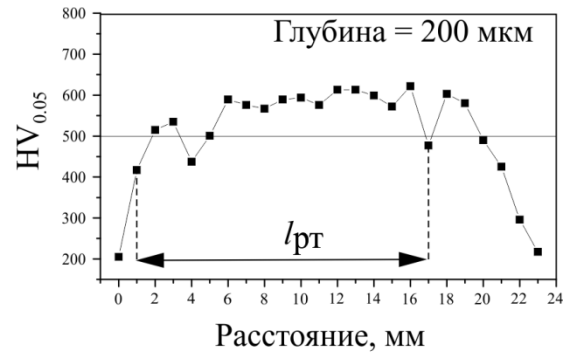


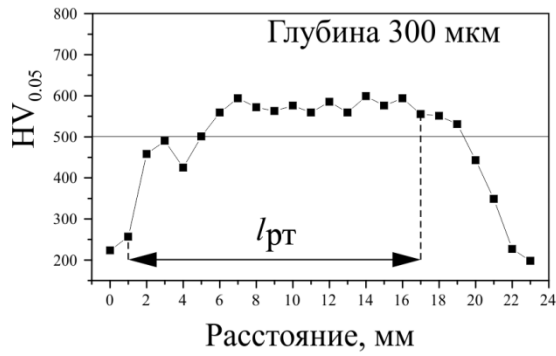
Рисунок Д.2 – Зависимость изменения микротвердости $HV_{0.05}$ вдоль линии b_2 на глубине: а – 100 мкм; б – 200 мкм; в – 300 мкм; г – 400 мкм; д – 500 мкм; е – 600 мкм



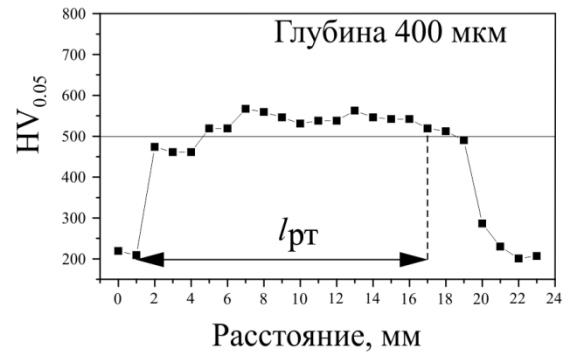
а



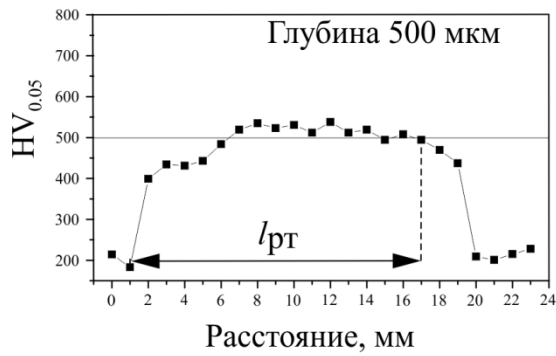
б



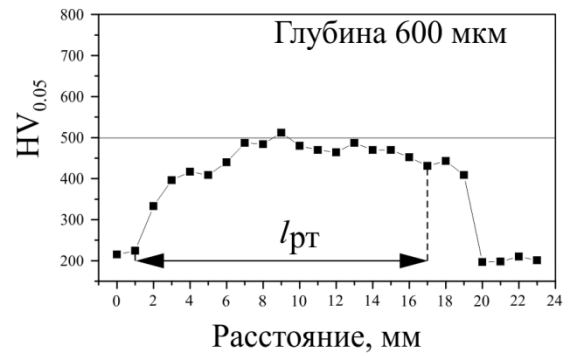
в



г

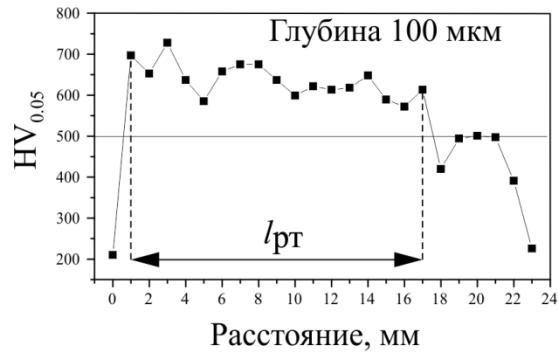


д

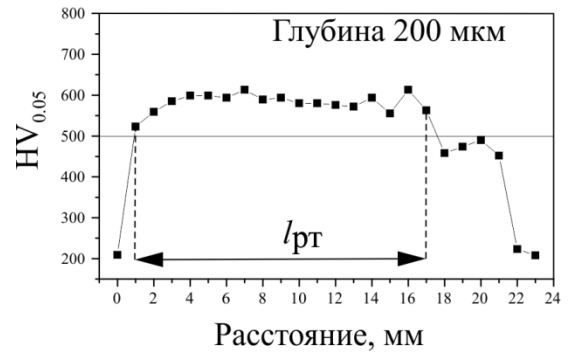


е

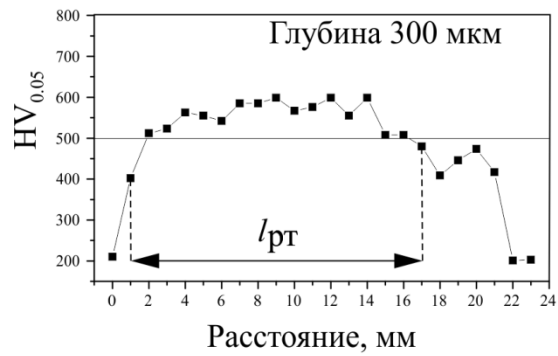
Рисунок Д.3 – Зависимость изменения микротвердости $HV_{0,05}$ вдоль линии c_1 на глубине: а – 100 мкм; б – 200 мкм; в – 300 мкм; г – 400 мкм; д – 500 мкм; е – 600 мкм



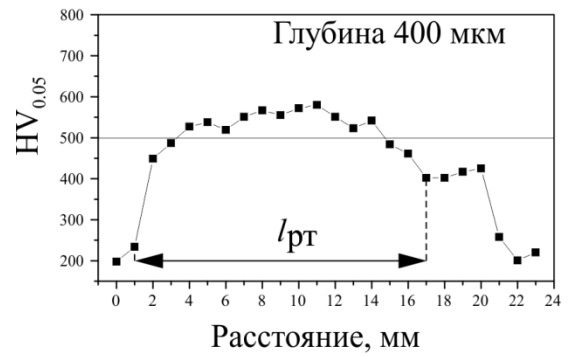
а



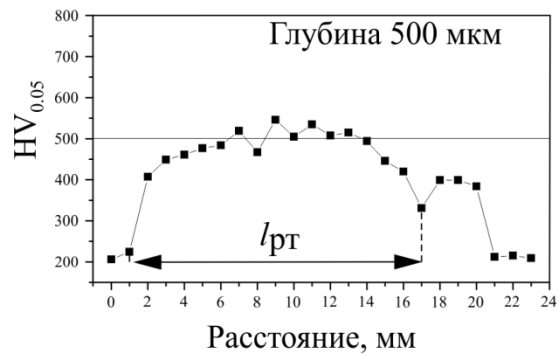
б



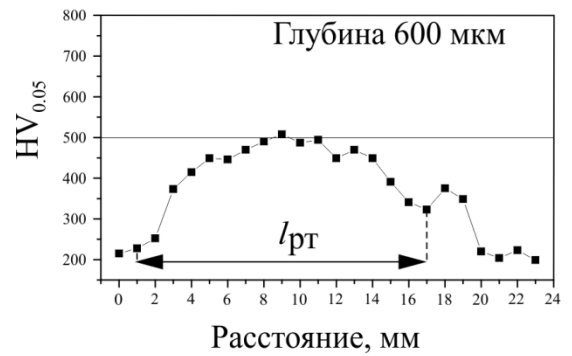
в



г



д



е

Рисунок Д.4 – Зависимость изменения микротвердости $HV_{0,05}$ вдоль линии c_2 на глубине: а – 100 мкм; б – 200 мкм; в – 300 мкм; г – 400 мкм; д – 500 мкм; е – 600 мкм

Устройство охлаждения тыльной стороны заготовки и расчет требуемого расхода жидкости

Устройство представляет собой фланец с полостью для охлаждения заготовки потоком жидкости в турбулентном режиме (рисунок Е.1). Охлаждающая жидкость при помощи насоса подается в устройство из бака под давлением. Герметичность устройства обеспечивается резиновым уплотнением.

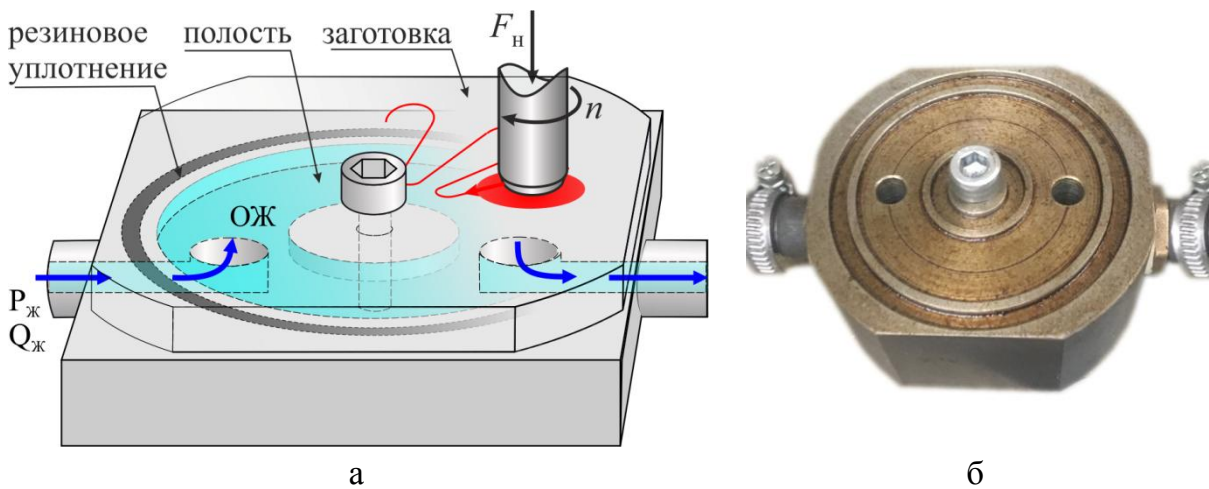


Рисунок Е.1 – Схема (а) и фотография (б) разработанного устройства охлаждения тыльной стороны заготовки

Турбулизация потока охлаждающей жидкости обеспечивается за счет изменения скорости потока на 90° и толщины полости под заготовкой не более 2 мм. Основным параметром устройства является расход охлаждающей жидкости $Q_{ож}$. Для определения требуемого расхода прежде всего учитывается тепловое сопротивление R_k конвективной теплоотдачи от охлаждаемой поверхности заготовки в жидкость (рисунок Е.2).

При условии, что тепловой поток в охлаждающую жидкость $\Phi_{ож} = \Phi_m - \Phi_v$, величина теплового сопротивления может быть определена как:

$$R_k = T_{оп} - T_{ож} / \Phi_m, \quad (E.1)$$

где $T_{оп}$ – температура охлаждаемой поверхности, $T_{ож}$ – температура охлаждающей жидкости.

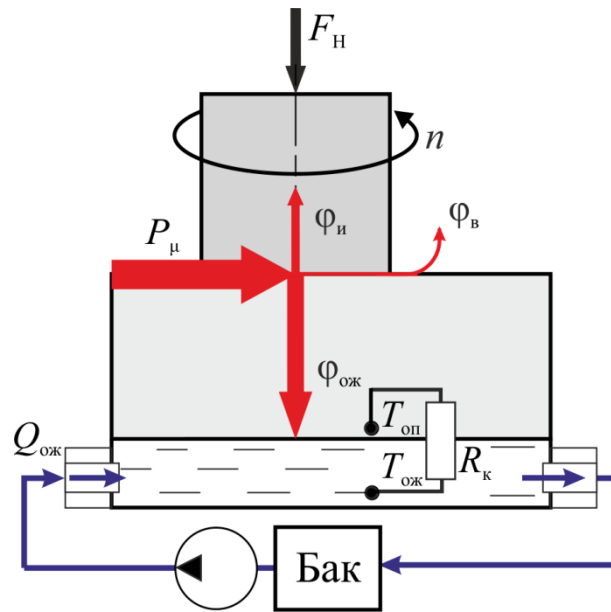


Рисунок Е.2 – Схема к расчету расхода охлаждающей жидкости

Считая величину теплового потока в воздух ϕ_B пренебрежимо малой величиной, в дальнейших расчетах принимаем $\phi_{ож} = \phi_M$. Установив величину теплового сопротивления R_k , необходимый расход охлаждающей жидкости для обеспечения требуемой температуры $T_{оп}$ можно определить на основе коэффициента конвективной теплоотдачи, который вычисляется по формуле

$$\alpha = 1/R_{конв} S_{оп} = \phi_{ож} / (T_{оп} - T_{ож}) S_{оп}, \quad (E.2)$$

где $S_{оп}$ – площадь тыльной поверхности заготовки, охлаждаемая жидкостью.

На основе величины коэффициента теплоотдачи α может быть определен критерий подобия Нуссельта:

$$Nu = \alpha l_k / \lambda_{ож} = \frac{\phi_{ож} l_k}{(T_{оп} - T_{ож}) S_{оп} \lambda_{ож}}, \quad (E.3)$$

где l_k – высота полости теплоотводящего устройства, $\lambda_{ож}$ – коэффициент теплопроводности охлаждающей жидкости. В свою очередь, для условий принудительного омывания поверхности турбулентным потоком жидкости число Нуссельта может быть описано следующим выражением:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (E.4)$$

где $Re = Q_{ож} l_k / \nu_{ож} A_k$ – число Рейнольдса, $Pr = \eta_{ож} C_{ож} / \lambda_{ож}$ – число Прандтля, $\nu_{ож}$ и $\eta_{ож}$ – кинематическая и динамическая вязкость охлаждающей жидкости, A_k – площадь поперечного сечения полости, $C_{ож}$ – удельная теплоёмкость охлаждающей жидкости.

Искомая зависимость необходимого расхода охлаждающей жидкости, полученная из приравнивания правых частей зависимостей (Е.3) и (Е.4), а также подстановки зависимостей чисел Рейнольдса и Прандтля, имеет следующий вид:

$$Q_{ож} = \left[\frac{\varphi_{ож} l_k^{0,2} (\nu_{ож}^{0,8} A_k^{0,8})}{0,023 (T_{оп} - T_{ож}) \lambda_{ож} S_{оп} Pr^{0,4}} \right]^{1,25} \quad (E.5)$$

Выполнены расчёты необходимого расхода жидкости $Q_{ож}$ для поддержания требуемой температуры $T_{оп} \approx 27^\circ\text{C}$ при условии теплового потока в жидкость $\varphi_{ож}$, равного 300, 400, 500 и 600 Вт. Полученные результаты показывают, что поддержание разницы температур между охлаждающей жидкостью и омываемой поверхностью заготовки в диапазоне от 5 до 10 °C может быть обеспечено при производительности насоса от 10 до 40 л/мин (рисунок Е.3).

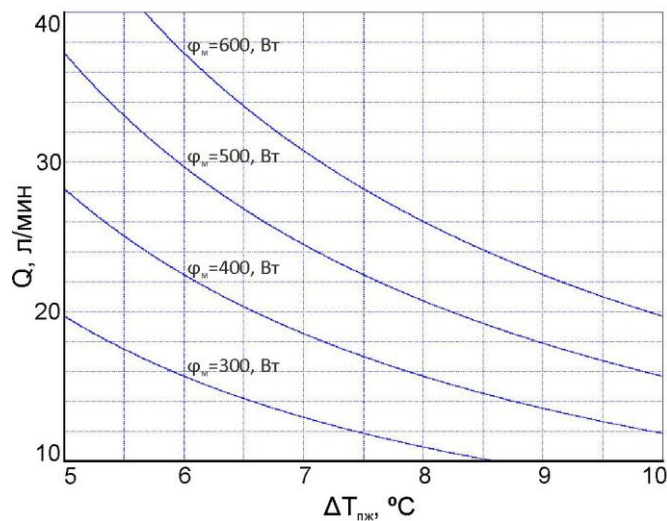


Рисунок Е.3 – Зависимость необходимого расхода охлаждающей жидкости от разности температур с тыльной стороны заготовки $\Delta T_{пж}$ при различных значениях теплового потока в жидкость $\varphi_{ож}$

Численные значения теплофизических и конструктивных параметров устройства охлаждения заготовки в процессе ОТП приведены в таблице Е.1.

Таблица Е.1 Теплофизические и конструктивные параметры устройства охлаждения заготовки в процессе ОТП

№	Обозначение	Наименование	Размерность	Численное значение
1	F_H	Нормальная сила	Н	3500
2	n	Частота вращения инструмента	об/мин	4000
3	μ	Коэффициент трения	-	0,25
4	R_H	Радиус инструмента	мм	4.5
5	P_μ	Мощность фрикционного тепловыделения	Вт	1099
6	Φ_M	Тепловой поток в материал	Вт	879,2
7	Φ_H	Тепловой поток в инструмент	Вт	219,8
8	η_M	Коэффициент разветвления теплового потока в материал	-	0,8
9	q_M	Плотность теплового потока в материал	Вт/мм ²	13,8
10	α	Коэффициент теплообмена заготовки с водой	Вт/(м ² ·К)	18000
11	$S_{оп}$	Площадь заготовки, омываемая водой	мм ²	2452,3
12	$T_{оп}$	Температура омываемой поверхности заготовки	°С	27...32
13	$T_ж$	Температура охлаждающей жидкости	°С	20
14	l_k	Высота канала	мм	2
15	$\lambda_{ож}$	Коэффициент теплопроводности жидкости	Вт/(м·К)	0,607
16	$Q_ж$	Расход охлаждающей жидкости	л/мин	15...40
17	$\nu_ж$	Кинематическая вязкость жидкости	м ² /с	$1,006 \cdot 10^{-6}$
18	$\eta_ж$	Динамическая вязкость жидкости	Па·с	$1004 \cdot 10^{-6}$
19	A_k	Площадь поперечного сечения канала	мм ²	34,5
20	$C_ж$	Удельная теплоемкость жидкости	Дж/(кг·К)	4180,6
21	Φ_k	Конвективный тепловой поток в воздух с обрабатываемой поверхности	Вт	43,11
22	$\Phi_{изл}$	Тепловой поток излучением с обрабатываемой поверхности	Вт	51,2

23	α_k	Коэффициент конвективной теплоотдачи	Вт/(м·К)	133,7
25	$\alpha_{изл}$	Коэффициент теплоотдачи излучением	Вт/м·К	158,9
26	A	Площадь поверхности заготовки отводящей тепло в воздух	м ²	$3 \cdot 10^{-4}$
27	ε	Степень черноты заготовки	-	0,85
28	T_M	Температура поверхности заготовки	°С	1100
29	T_B	Температура воздуха	°С	25
30	D	Диаметр заготовки	мм	100
31	h	Толщина заготовки	мм	13
32	$t_{обр}$	Время обработки кольцевой поверхности заготовки по верной траектории	с	85
33	t_p	Время разогрева упрочняемого материала	с	5
35	$T_{си}$	Температура краснотойкости инструмента	°С	1050
36	f_i	Подача инструмента	мм/мин	500
37	$T_{но}$	Объемный нагрев заготовки	°С	247
38	m	Масса заготовки	кг	0,82