

На правах рукописи



СКОРОБОГАТОВ Андрей Сергеевич

**УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ
ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕМ
ВЫГЛАЖИВАНИИ С ТЕПЛОТВОДОМ**

05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре термообработки и физики металлов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
КУЗНЕЦОВ Виктор Павлович

Официальные оппоненты: **ПОТЕХИН Борис Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, профессор кафедры «Технология металлов»;

САВРАЙ Роман Анатольевич, кандидат технических наук, ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, заведующий лабораторией конструкционного материаловедения

Ведущая организация: ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

Защита состоится «21» июня 2018 г. в 15:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 640002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=278237>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Селиванова Ольга
Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Формирование уникальных свойств поверхностных слоев деталей трибосопряжений, изготавливаемых из традиционных конструкционных сталей, позволяет увеличить эксплуатационную надежность машин и оборудования без значительных капиталовложений. Перспективным направлением повышения прочности и износостойкости поверхностных слоев материалов является разработка и совершенствование физико-механических процессов, обеспечивающих получение нанокристаллических структур методами интенсивной пластической деформацией сдвига. Особенно актуально развитие данных процессов в условиях серийного и экологически чистого производства изделий.

Степень разработанности проблемы исследования. Фундаментальные основы наноструктурирования конструкционных материалов заложили Н. Gleiter, Р.З. Валиев, В.Е. Панин и др. Теоретические и прикладные вопросы формирования нанокристаллитов при трении и фрикционной обработке изучены в работах Л.Г. Коршунова, В.Р. Бараза, А.В. Макарова, А.В. Колубаева, С.Ю. Тарасова, X. Wang и других. Научные основы промышленной технологии наноструктурирующего выглаживания поверхностей деталей на станках с ЧПУ разработаны В.П. Кузнецовым.

Исследования наноструктурирования поверхностей сталей скользящим индентором в лабораторных условиях при фрикционной обработке и наноструктурирующем выглаживании на современных станках с ЧПУ показали возможность значительного повышения прочностных свойств в сочетании с пластичностью материала. Применительно к наноструктурирующему выглаживанию (НСВ) определены допустимые и достаточные условия фрикционного нагружения, контактного давления и скорости скольжения сферического индентора из сверхтвердого материала (синтетический поликристаллический алмаз PCD и кубический особопрочный нитрид бора DBN). Однако не были изучены закономерности формирования нанокристаллической структуры и свойств поверхностного слоя мартенситных сталей при скорости скольжения индентора более 20 м/мин. Невозможность проведения этих исследований обусловлена потерей сдвиговой устойчивости, рекристаллизацией и разрушением материала поверхностного слоя. Особый научный интерес к совершенствованию физико-механического процесса НСВ при высоких скоростях скольжения индентора представляет рассмотрение влияния отвода фрикционного тепла из контактной зоны инструмента для поддержания оптимального температурно-скоростного режима пластической деформации.

Работа выполнена в соответствии с основными направлениями научной деятельности кафедры «Термообработки и физики металлов» ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.

Ельцина» и грантов РФФИ № 14-38-50423 и № 15-08-01511А «Изучение механизмов наноструктурирования поверхности при пластическом деформировании выглаживанием с использованием комплексного многомасштабного подхода».

Целью работы является совершенствование физико-механического процесса наноструктурирующего выглаживания для формирования нанокристаллической структуры и повышения свойств поверхностного слоя мартенситных сталей при высоких скоростях скольжения индентора инструмента.

В работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1 Обосновать концепцию управления формированием нанокристаллической структуры и свойств поверхностного слоя мартенситных сталей при высокоскоростном наноструктурирующем выглаживании с теплоотводом.

2 Разработать математическую модель теплопередачи фрикционного тепла и расчетные зависимости параметров интенсивной пластической деформации и контактной температуры от скорости скольжения.

3 Создать инструмент, обеспечивающий эффективный отвод фрикционного тепла и провести экспериментальные исследования влияния скорости скольжения индентора на изменение контактных сил и температуры, степени и скорости пластической деформации при наноструктурирующем выглаживании мартенситных закаленных сталей 20X и 20X13.

4 Провести наноструктурирующее выглаживание инструментом с системой отвода фрикционного тепла и установить закономерности изменения размеров зерен, объемной фракции нанокристаллитов и толщины наноструктурированного слоя от скорости скольжения и параметра Зинера-Холломона.

5 Определить взаимосвязь физико-механических и трибологических свойств наноструктурированного слоя сталей 20X и 20X13 со скоростью скольжения индентора и эффективность применения инструмента с теплоотводом.

Научная новизна и теоретическая значимость работы состоит в том, что:

1 Впервые установлено, что зависимости объемной фракции нанокристаллитов и толщины наноструктурированного слоя от параметра Зинера-Холломона при наноструктурирующем выглаживании мартенситных сталей имеют экстремум, обусловленный наличием оптимального температурно-скоростного режима.

2 Обоснован подход к назначению скорости скольжения индентора инструмента при наноструктурирующем выглаживании поверхностей сталей на основе установления оптимальной величины параметра Зинера-Холломона по критериям размеров нанокристаллитов и толщины наноструктурированного слоя.

3 Созданы экспериментальные методы определения степени, скорости деформации и контактной температуры в зависимости от скорости скольжения индентора, позволяющие решать задачи управления отводом фрикционного тепла и температурно-скоростным режимом наноструктурирующего выглаживания.

4 Установлено, что отвод 66% и 80% фрикционного тепла из контактной зоны в инструмент при наноструктурирующем выглаживании, соответственно, сталей 20X и 20X13 со скоростью скольжения индентора 50 м/мин обеспечивает, в сравнении с обработкой без теплоотвода с предельной скоростью 15 м/мин, повышение истинной деформации с $\epsilon=3,5\dots3,8$ до $\epsilon=5,0\dots5,25$ и скорости деформации более, чем на порядок, с $\dot{\epsilon} = (2,8\dots3,7)10^3 \text{ с}^{-1}$ до $\dot{\epsilon} = (5,2\dots6,8)10^4 \text{ с}^{-1}$.

Практическая значимость:

1 Создан и запатентован инновационный инструмент с системой охлаждения индентора, позволяющий обеспечивать оптимальный температурно-скоростной режим наноструктурирующего выглаживания и формирование наноструктурного состояния поверхностного слоя мартенситных сталей при повышении скорости скольжения индентора в 3 раза до 50 м/мин (Патенты РФ №2635987, №150111).

2 Обеспечена экологичность процесса наноструктурирующего выглаживания с теплоотводом за счет применения в инструменте замкнутого контура жидкостного охлаждения на основе ТЭМ Пельтье.

3 Обеспечено достижение микротвердости поверхностного слоя закаленных сталей цементованной 20X до 1480 HV_{0,5} и 20X13 до 1310 HV_{0,5} при скорости скольжения индентора 50 м/мин.

4 Получен годовой экономический эффект в размере 2,157 млн. рублей от внедрения усовершенствованного физико-механического процесса наноструктурирующего выглаживания с системой отвода фрикционного тепла при производстве шпинделей MKTZ-300.25.012 и MKTS-100.25.004 для задвижек высокого давления на ООО «Предприятие «Сенсор».

Методология и методы диссертационного исследования. Методологической основой послужили труды ведущих отечественных и зарубежных ученых в области разработки физико-механических процессов формирования поверхностных слоев сталей и новых материалов с нанокристаллической структурой интенсивной пластической деформацией, научные основы материаловедения, трибологии, теплопередачи и тепловых сетей.

Для решения поставленных задач использовались современные методы просвечивающей и растровой электронной микроскопии, динамометрии, измерений твердости, трибологических испытаний поверхностного слоя, анализа структуры в программном пакете SIAMS 700 и компьютерного моделирования в программном пакете Multisim. Экспериментальные результаты были получены с использованием сертифицированных приборов и средств измерений.

На защиту выносятся основные положения и результаты:

1 Математическая модель теплопередачи фрикционного тепла из контактной зоны и расчетные зависимости температуры, степени и скорости пластической

деформации при наноструктурирующем выглаживании мартенситных закаленных сталей 20X и 20X13.

2 Методики и результаты экспериментальных исследований степени и скорости интенсивной пластической деформации, контактных сил и температуры в зависимости от скорости скольжения индентора.

3 Оптимальные значения параметра Зинера-Холломона и допустимый диапазон изменения контактной температуры, обеспечивающий формирование нанокристаллической структуры и уникальных физико-механических свойств поверхностного слоя при повышении скорости скольжения индентора.

4 Физико-механические и трибологические свойства поверхностного слоя термоупрочненных сталей 20X и 20X13 после наноструктурирующего выглаживания инструментом с системой отвода фрикционного тепла.

Степень достоверности результатов работы обеспечивается большим объемом и воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований, сопоставлением их между собой и с известными литературными данными, использованием современных методов исследования и аттестованных средств измерения и анализа структуры и свойств материала.

Апробация диссертационной работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на 9-ти конференциях, в том числе на X-й Международной научно-практической конференции «Нанотехнологии – производству» (Фрязино, 2014 г.), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного машиностроения» (Юрга, 2014 г.), IV Международной научно-технической конференции «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (Тольятти, 2015 г.), IX Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения (Томск, 2015 г.), XI-й Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению» (Москва, 2016), IV Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2017 г.), 3rd International Conference on Rheology and Modelling of Materials (Miskolc-Lillafüred, Hungary, 2017 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации, полученные результаты, выводы и рекомендации опубликованы в 14-ти научных работах, в том числе в 7-ми статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК и 7-ми статьях в сборниках трудов Международных научных конференций. Получены 1 патент РФ на изобретение и 1 патент РФ на полезную модель.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии в разработке способа отвода фрикционного тепла при наноструктурирующем выглаживании, создании специального инструмента и проведении всего комплекса теоретических и экспериментальных исследований по решению проблемы управления

формированием нанокристаллической структуры и уникальных свойств мартенситных сталей, обсуждении, анализе и подготовке публикаций полученных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка цитируемой литературы из 84 источников и 4 приложений. Работа изложена на 135 страницах, содержит 68 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, показана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация полученных результатов.

В первом разделе представлен аналитический обзор литературы по исследуемой теме. Выявлены ключевые факторы, влияющие на процесс диспергирования структуры при интенсивной пластической деформации и, в частности, при фрикционной обработке и наноструктурирующем выглаживании сталей. Сформулированы научная проблема повышения скорости скольжения индентора и определено направление её решения на основе отвода фрикционного тепла из контактной зоны.

Во втором разделе рассмотрены теоретические подходы к формированию наноструктурного состояния материала поверхностного слоя при наноструктурирующем выглаживании в условиях высокой скорости скольжения индентора и отвода фрикционного тепла из контактной зоны в инструмент. Разработана математическая модель теплопередачи фрикционного тепла и получены расчетные зависимости степени деформации, скорости деформации и контактной температуры от скорости скольжения индентора. Определены требования к системе охлаждения инструмента.

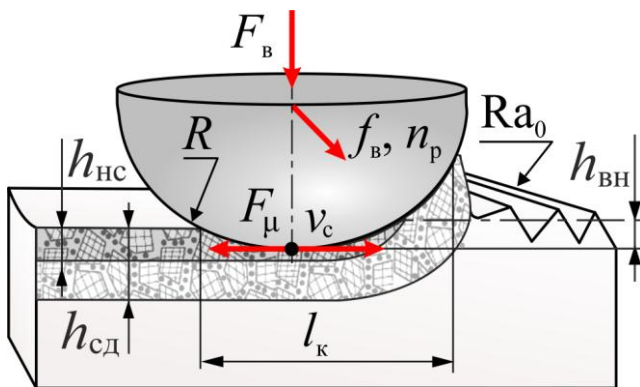


Рисунок 1 – Схема и технологические параметры наноструктурирующего выглаживания

нагружение поверхностного слоя обобщено интегральными параметрами: контактным давлением P_k , силой трения $F_\mu = \mu F_B$ и кратностью нагружения элементарных объемов деформируемого материала N_c определяемой как отношение

Наноструктурирующее выглаживание сферическим индентором управляется пятью технологическими параметрами: силой выглаживания F_B , подачей f_B , скоростью скольжения v_c , радиусом R и количеством рабочих ходов инструмента n_p (рисунок 1). Согласно работ В.П. Кузнецова, влияние технологических параметров на

длины пятна контакта l_k к величине подачи индентора инструмента f_b .

В основу концепции формирования нанокристаллической структуры положено решение задачи обеспечения благоприятного температурно-скоростного режима наноструктурирующего выглаживания на основе отвода фрикционного тепла и определения оптимального параметра Зинера-Холломона Z по критериям достижения максимальных значений объемной фракции нанокристаллитов δ и

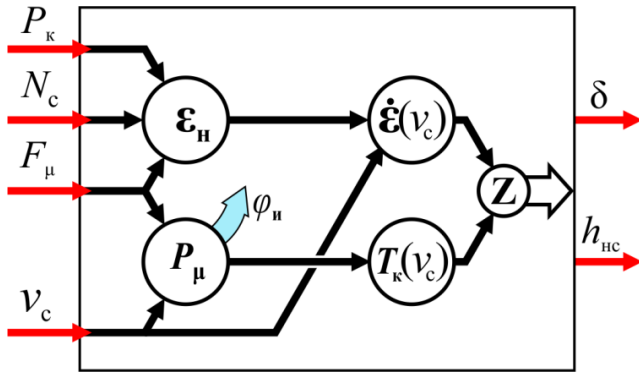


Рисунок 2 – Схема управления температурно-скоростным режимом наноструктурирующего выглаживания с отводом фрикционного тепла в инструмент

толщины наноструктурированного поверхностного слоя h_{nc} (рисунок 2). Управление теплоотводом основано на создании математической модели теплопередачи из контактной зоны, позволяющей определить параметры системы отвода тепла для поддержания режима «теплой деформации».

Процесс теплопередачи фрикционного тепла из контактной зоны индентора представлен в виде тепловой цепи объемных и контактных

тепловых сопротивлений тепловым потокам в инструмент φ_n , деформируемый материал φ_m и окружающую среду φ_o (рисунок 3). Вследствие быстро движущегося источника тепловыделения (коэффициент Пекле $Pe > 5$) конвективные тепло-

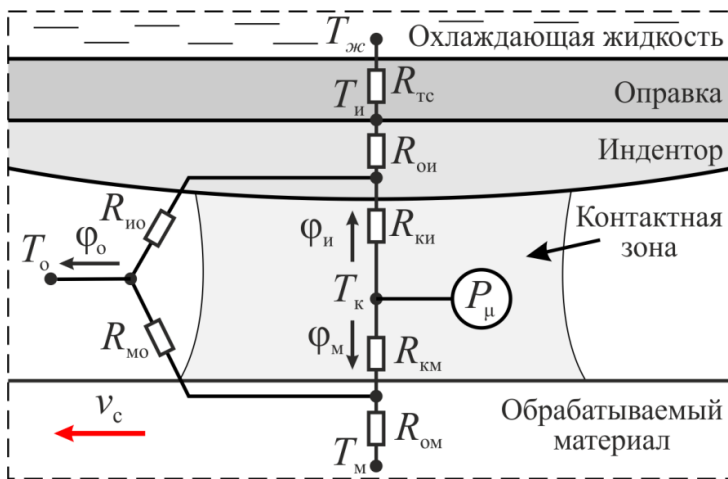


Рисунок 3 – Схема распределения тепла в контактной зоне при наноструктурирующем выглаживании инструментом с отводом фрикционного тепла

мируемый материал и инструмент может быть представлена в следующем виде:

$$P_\mu = \varphi_m + \varphi_n = \frac{T_k - T_m}{R_{км} + R_{ом}} + \frac{T_k - T_ж}{R_{ки} + R_{ои} + R_{тс}}, \quad (1)$$

где T_m – температура детали, определяемая температурой окружающей среды; $T_ж$ – температура охлаждающей жидкости в инструменте; $R_{тс}$ – суммарное теп-

ловые сопротивления $R_{ми}$ и $R_{ио}$ потоку тепла в наружную среду φ_o многократно превышают остальные и не оказывают влияние на изменение контактной температуры.

На основе метода электротепловой аналогии, развитого в работах J. Rech и K. Cheng при резании и Кузнецова В.П. при НСВ, математическая модель теплопередачи фрикционного тепла в дефор-

ловое сопротивление теплоотводящей системы инструмента: $R_{TC}=R_{oo}+R_{ож}$. Расчетные значения тепловых сопротивлений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные значения тепловых сопротивлений

Тепловое сопротивление	Расчетная зависимость	Значение [°C/Вт]	
		20X	20X13
Контактное обрабатываемого материала	$R_{км} = 1/\pi l_k \lambda_m$	30,24...56,73	23,74...81,09
Объемное обрабатываемого материала	$R_{ом} = \sqrt{3\lambda_m l_k / 2c_m \rho_m v_c} / \pi \lambda_m l_k^2$	19,59...120,04	9,1...104,8
Контактное индентора	$R_{ки} = 1/\pi l_i \lambda_i$	3,2...4	2,4...2,8
Объемное индентора	$R_{ои} = 4l_i / \pi d_i^2 \lambda_i$	0,796	2,716
Объемное оправки	$R_{оо} = 4l_o / \pi d_o^2 \lambda_o$	0,567	
Конвективное от оправки в охлаждающую жидкость	$R_{ож} = 4/\pi d_o^2 \alpha_o$	3,764...16,172	

λ_m , λ_i и λ_o – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, материала индентора и материала оправки индентора; α_o – коэффициент теплоотдачи от оправки в охлаждающую жидкость; l_k – длина пятна контакта; l_i и l_o – длина индентора и оправки; d_i и d_o – диаметр индентора и оправки; c_m и ρ_m – удельная теплоёмкость и плотность обрабатываемого материала; v_c – скорость скольжения индентора.

Для управления поддержанием контактной температуры в режиме «теплой деформации» предложено использовать коэффициент отвода фрикционного тепла η в инструмент, применяемый в работах X. Tian, J. Rech и др. при трении и резании. Коэффициент η с учетом теплового потока в материал детали φ_m и мощности тепловыделения $P_\mu(v_c)$ может быть описан следующей зависимостью:

$$\eta(v_c) = 1 - \varphi_m / P_\mu(v_c) = 1 - \varphi_m / F_b \mu v_c = 1 - \varphi_m / F_\mu v_c. \quad (2)$$

Например, для известных из работ Кузнецова В.П. условий фрикционного нагружения стали 20X13 при НСВ индентором из синтетического поликристаллического алмаза (PCD) зависимости коэффициента отвода тепла, обеспечивающие поддержание контактной температуры в режиме теплой деформации от 170 °C ($0,25 \cdot T_{пл}$) до 790 °C ($0,6 \cdot T_{пл}$), имеют вид поверхностей (изотерм) (рисунок 4). При скорости скольжения индентора 50 м/мин и силе трения 40 Н коэффициент отвода фрикционного тепла $\eta=0,53...0,97$. Для обеспечения установленной величины коэффициента η определена температура охлаждающей жидкости в инструменте $T_{ж}=+10 \pm 2$ °C. Для обеспечения формирования нанокристаллической структуры при скорости скольжения индентора 80 м/мин с учетом дополнительных тепловых потерь в системе отвода фрикционного тепла температура охлаждающей жидкости должна быть на уровне $T_{ж}=0 \pm 1$ °C.

Для определения параметра Зинера-Холломона:

1) разработан экспериментально-расчетный метод определения зависимостей накопленной деформации ε_n и скорости деформации сдвига от скорости

скольжения индентора $\dot{\varepsilon} = f(v_c)$;

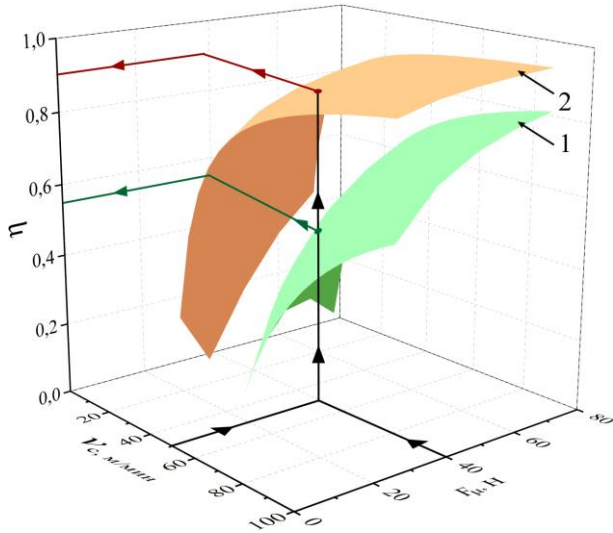


Рисунок 4 – Зависимости коэффициента отвода фрикционного тепла от скорости скольжения и силы трения: 1 – изотерма $T_k=0,6T_{пл}$; 2 – изотерма $T_k=0,25T_{пл}$

2) получена зависимость контактной температуры от скорости скольжения индентора и оптимальной величины параметра Зинера-Холломоны.

Относительную накопленную деформацию сдвига материала предложено определять как отношение длины валика пластически оттесненного металла, сформированного при многократном перемещении индентора в направлении векторов скорости v_c и подачи f_b с высокоточной остановкой к толщине сдвигаемого слоя (рисунок 5):

$$\varepsilon_n = \operatorname{tg} \varphi = \frac{l_{нв}}{h_{сд}}, \quad (3)$$

где φ – угол сдвига, $l_{нв}$ – длина накопленного валика, $h_{сд}$ – толщина сдвигаемого слоя. Связь скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ со скоростью скольжения индентора v_c может быть определена по следующей зависимости:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_n}{t_{\Sigma}} = \frac{\varepsilon_n \cdot v_c}{l_k \cdot N_c}, \quad (4)$$

где t_{Σ} – суммарная продолжительность контакта индентора с элементарным объемом при его смещении на величину пятна контакта l_k .

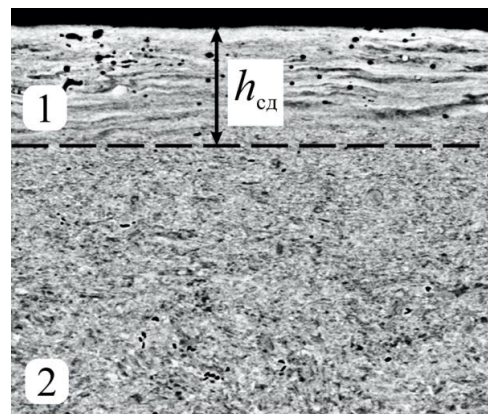
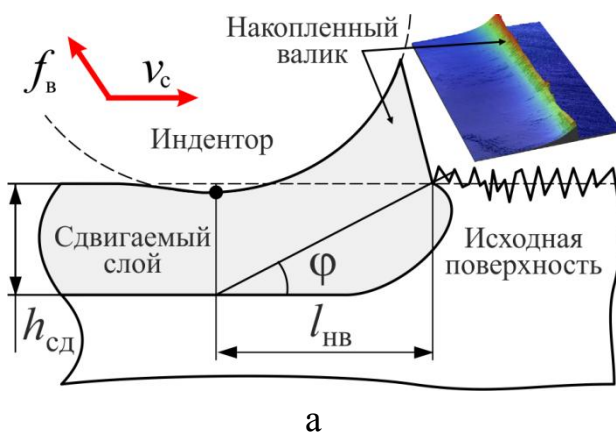


Рисунок 5 – Схема определения параметров интенсивной пластической деформации сдвига на основе 3D-профилометрии (а) и сканирующей электронной микроскопии (б)

На основе формулы параметра Зинера-Холломоны $Z = \dot{\varepsilon}(Q/RT)$ и его оптимального значения по критериям объемной фракции нанокристаллитов и толщины

наноструктурированного поверхностного слоя $Z_{\text{опт}} = \max(\delta, h_{\text{нс}})$ получена зависимость контактной температуры от скорости скольжения индентора:

$$T_k(v_c) = \frac{Q}{R(\ln Z_{\text{опт}} - \ln \dot{\epsilon}(v_c))}, \quad (5)$$

где Q – энергия активации, R – газовая постоянная.

В разделе 3 обоснована и создана конструкция выглаживающего инструмента с системой отвода фрикционного тепла (Патент РФ №150111) и проведены экспериментальные исследования влияния скорости сухого скольжения индентора инструмента на изменение контактных сил, контактной температуры, степени и скорость пластической деформации сдвига поверхностного слоя. Система отвода фрикционного тепла представляет собой два контура жидкостного охлаждения индентора и термоэлектрического модуля (ТЭМ) теплообменника (рисунок 6).

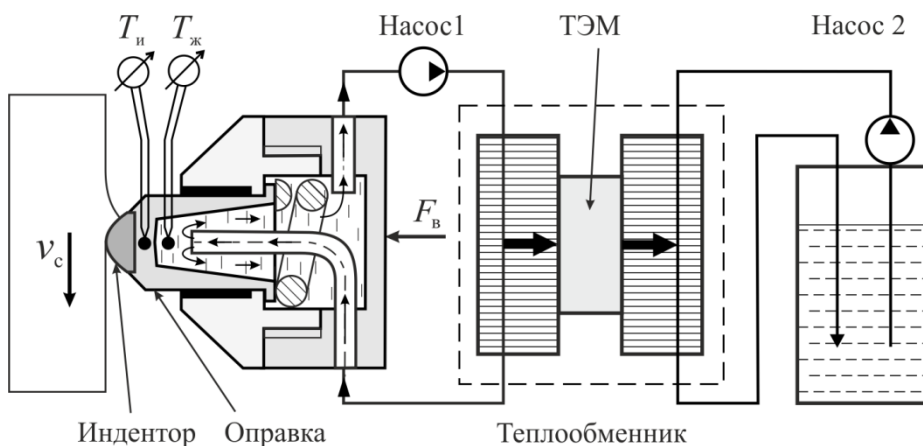


Рисунок 6 – Схема инструмента с системой отвода фрикционного тепла

Исследования проводились на образцах из стали 20X после газовой цементации, закалки при 830 °С в масле и отпуска при 250 °С и из стали 20X13 после закалки при 1050 °С в масле и отпуска при 150 °С. После термообработки образцы имели структуру речного мартенсита с шириной реек 150...300 нм и твердость, соответственно, 55...56 HRC и 45...46 HRC. После предварительного чистового точения на скорости 80 м/мин с подачей 0,08 мм/об и глубиной резания 0,2 мм среднее арифметическое отклонение профиля поверхности сталей 20X и 20X13 составляло, соответственно, Ra=0,31 мкм и Ra=0,38 мкм.

На основе результатов теоретических исследований были назначены два режима работы системы отвода фрикционного тепла: 1) поддержание $T_{\text{ж}} = 10 \pm 2$ °С; 2) поддержание $T_{\text{ж}} = 0 \pm 1$ °С. Для обеспечения требуемых температур охлаждающей жидкости в системе отвода фрикционного тепла использованы ТЭМ Пельтье ТВ-199-1,4-0,6 (Drift-0,6) производства фирмы Kryotherm. Для измерения температуры индентора и охлаждающей жидкости непосредственно в процессе наноструктурирующего выглаживания у торца индентора и во внутренней полости оправки устанавливались термопары типа K.

Для сравнения с результатами предшествующих исследований НСВ, выполненных Кузнецовым В.П., при обработке сталей 20X и 20X13 были исполь-

зованы инденторы из кубического нитрида бора DBN и поликристаллического твердого нитрида бора (ПНТБ) «Композит-09», соответственно.

Создана экспериментальная установка, позволившая впервые измерить контактные силы непосредственно при НСВ на токарном станке. Обрабатываемый образец 1 зажимался в патроне, инструмент 2 с системой отвода фрикционного тепла 3 устанавливался в высокоточный трехосевой динамометр Kistler 9257BA-4 (рисунок 7). Коэффициент трения в контакте индентора на основе данных динамометрии определялся по следующей зависимости:

$$\mu = \frac{\sqrt{F_y^2 + F_z^2}}{F_x}, \quad (6)$$

где F_x – нормальная сила, F_y и F_z – составляющие силы трения в направлениях, соответственно, подачи инструмента и скорости скольжения индентора.

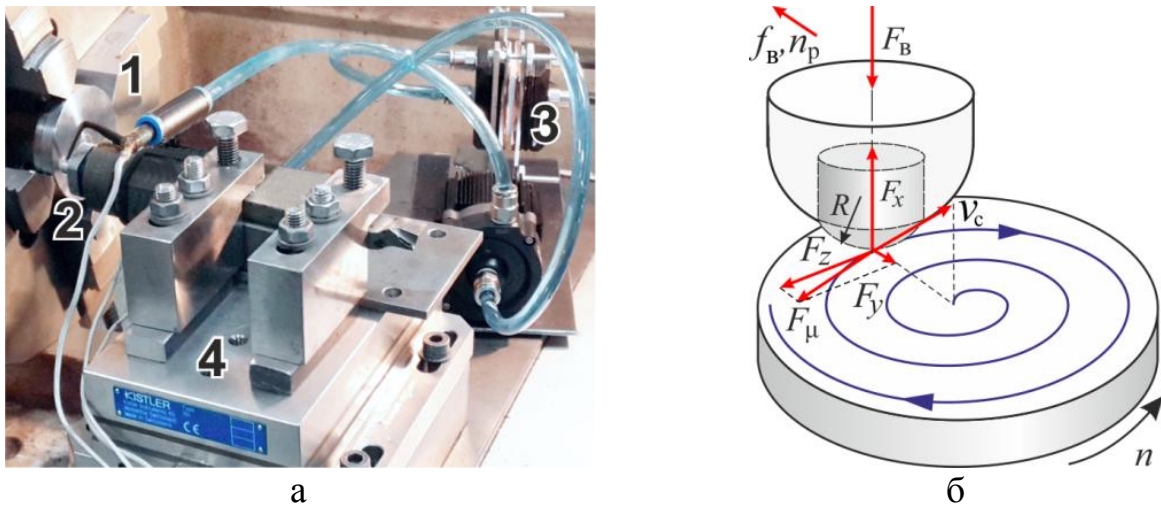


Рисунок 7 – Экспериментальная установка на токарном станке KNUTH V-Turn 410 (а) и схема определения контактных сил (б)

Полученные результаты показывают, что при обработке без теплоотвода коэффициент трения стабилизируется при скорости скольжения 7...11 м/мин (рисунок 8). При скорости выше 11 м/мин происходит скачкообразный рост коэффициента трения в ~1,8 раза для стали 20X и в ~1,7 раза для стали 20X13.

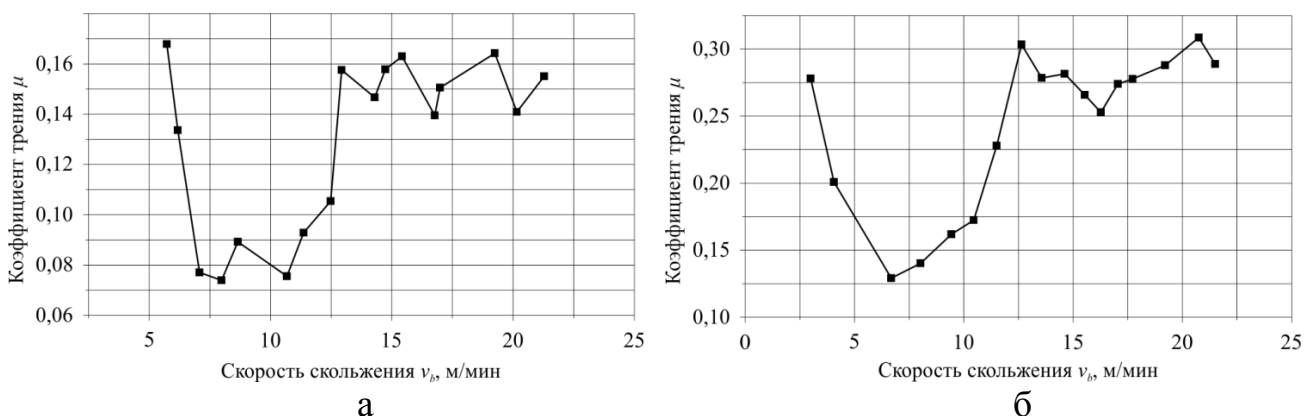


Рисунок 8– Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения индентора инструмента без теплоотвода: а – сталь 20X; б – 20X13

В случае обработки с системой отвода фрикционного тепла при $T_{ж}=10\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ стабильный коэффициент трения поддерживается при скорости скольжения индентора 32...38 м/мин для стали 20X и 34...40 м/мин – стали 20X13 (рисунок 9). Снижение температуры жидкости до $T_{ж}=0\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ привело к увеличению диапазонов скоростей скольжения индентора со стабильным коэффициентом трения до 28...47 м/мин и 40...47 м/мин, соответственно. При скорости более 47 м/мин происходит скачкообразное увеличение коэффициента трения в $\sim 1,13$ раза. Таким образом, рост коэффициента трения при использовании инструмента с системой отвода фрикционного тепла значительно снизился.

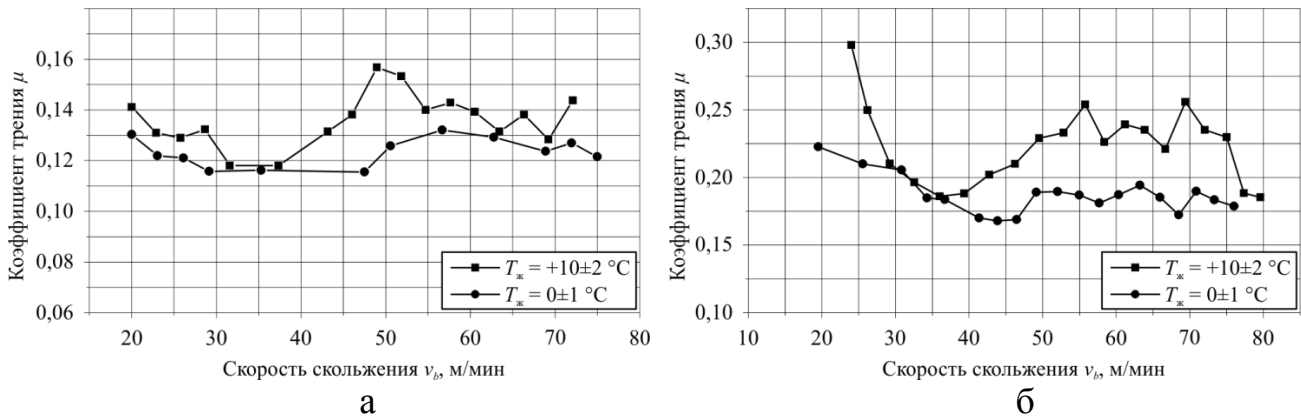


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента трения μ от скорости скольжения v_c индентора инструмента с системой отвода фрикционного тепла: а – сталь 20X; б – 20X13

Связь степени и скорости деформации материала поверхностного слоя со скоростью скольжения индентора была определена путем реализации разработанного метода, описанного в разделе 2 (рисунок 10). Показано, что при обработке инструментом с системой отвода фрикционного тепла истинная деформация материала поверхностного слоя $e = \ln(1 + \varepsilon_H)$ повышается в 1,37...1,46 раза. Также отвод тепла позволяет повысить скорость деформации на 2...3 порядка.

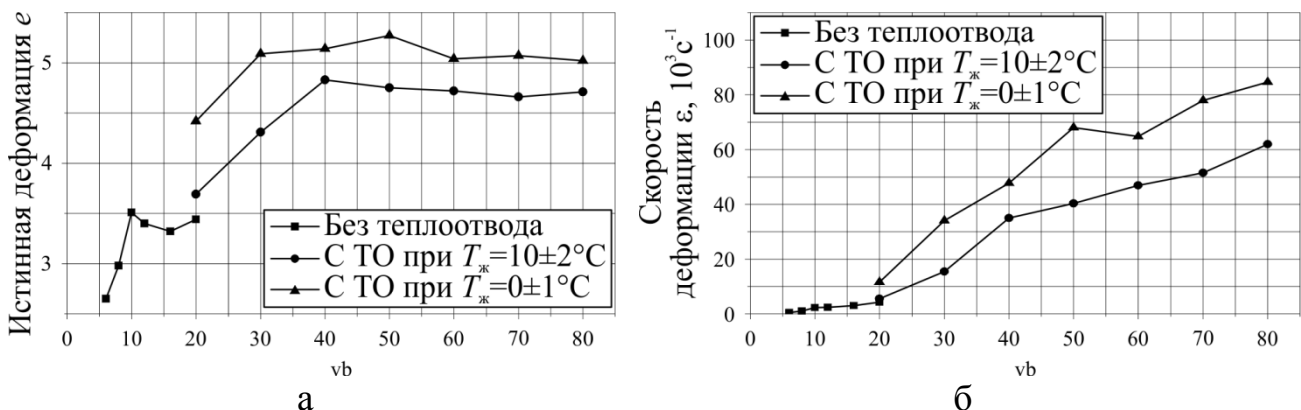


Рисунок 10 – Зависимости истинной деформации (а) и скорости деформации (б) стали 20X13 от скорости скольжения индентора

Контактная температура была исследована на основе разработанного метода сминаемой термодпары, которая представляет собой медный изолированный электрод, размещенный в образце, обрабатываемом на фрезерном станке (рису-

нок 11). При движении индентора по электроду происходит разрушение электрической изоляции с образованием точечного контакта, представляющего собой полуискусственную термопару. Для измерения сигнала ТермоЭДС использован дифференциальный усилитель ДУ и быстродействующий АЦП, подключенный к персональному компьютеру ПК. Термопары были оттарированы в диапазоне температур от 100 до 1000 °С и имели кусочно-линейные характеристики.

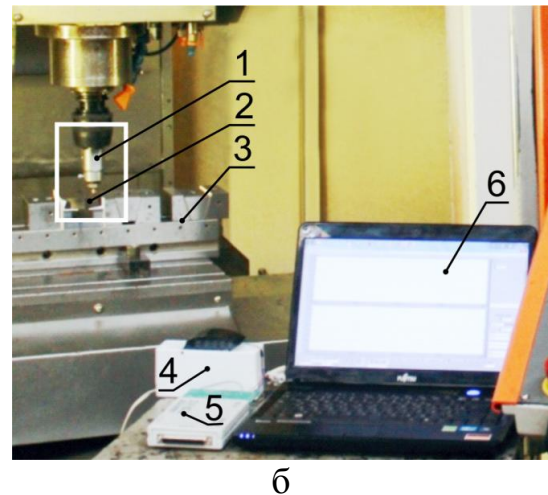
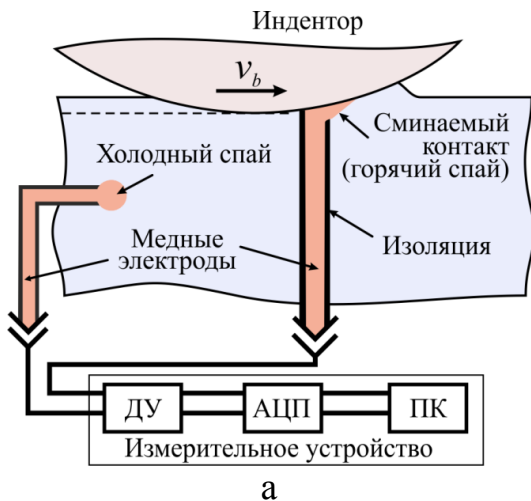


Рисунок 11 – Схема измерения контактной температуры полуискусственной термопарой (а) и экспериментальная установка на фрезерном станке (б)

Результаты экспериментального исследования контактной температуры и расчетов, выполненных на основе модели теплопередачи (1) имеют отклонение не более 9,7% на интервале скоростей скольжения от 6 до 50 м/мин (рисунок 12).

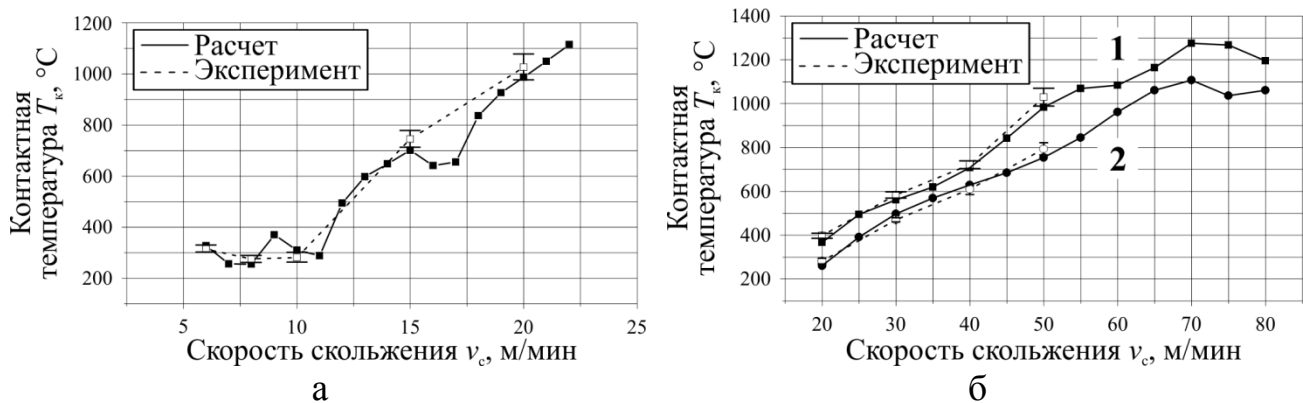


Рисунок 12 – Экспериментальные и расчетные зависимости контактной температуры от скорости скольжения индентора при наноструктурирующем выглаживании стали 20X13 инструментом без теплоотвода (а) и с системой отвода фрикционного тепла при температуре жидкости: 1) +10±2 °С; 2) 0±1 °С (б)

Установлено, что применение системы отвода фрикционного тепла с температурой жидкости 0±2 °С обеспечивает поддержание контактной температуры в режиме теплой деформации в интервале скоростей скольжения от 20 до 49 м/мин при обработке стали 20X13 (рисунок 12 б) и от 20 до 64 м/мин при обработке стали 20X. При обработке без теплоотвода режим «теплой деформации» поддерживается в интервале скоростей скольжения от 20 до 15 м/мин.

ции» выполняется только при скорости скольжения, соответственно, 6...15 м/мин и 6...14 м/мин. Адекватность математической модели теплопередачи (1) позволило использовать её при определении контактной температуры для оценки параметра Зинера-Холломона.

В четвертом разделе выполнен анализ результатов просвечивающей электронной микроскопии фольг с образцов сталей 20X и 20X13 после наноструктурирующего выглаживания инструментом с системой отвода фрикционного тепла, определены размеры зерен, толщина наноструктурированного слоя и оптимальные значения параметра Зинера-Холломона. Установлены границы допустимых температурно-скоростных режимов НСВ. Размеры зерен были определены на основе измерения площади отдельных элементов на темнопольных изображениях структуры в рефлексе α -фазы. При принятии допущения, что все зерна имеют сферическую форму, их размер δ может быть определен как:

$$\delta = \sqrt{\frac{4}{\pi} S_{\delta}} , \quad (7)$$

где S_{δ} – скорректированная площадь сечения зерна. Допущение о сферичности обуславливается ротационно-сдвиговым механизмом диспергирования зеренной структуры трением в условиях сжатия. Размерные фракции зерен для каждой исследуемой скорости скольжения были определены с использованием программного пакета SIAMS 700 при измерении площади сечений более 1000 зерен с ПЭМ трех фольг, изготовленных с участков трех опытных образцов, обработанных в условиях одной скорости скольжения. Таким образом, площадь $S_{\delta} = k_s S_h$, где S_h – площадь сечения зерна, измеренная по снимку, k_s – поправочный коэффициент, учитывающий произвольное рассеяние зерна при изготовлении фольги. На основе решения геометрической задачи рассеяния зерна в произвольном месте поправочный коэффициент $k_s = 1,5$ был определен как математическое ожидание отношения площади произвольного сечения к площади половинного сечения.

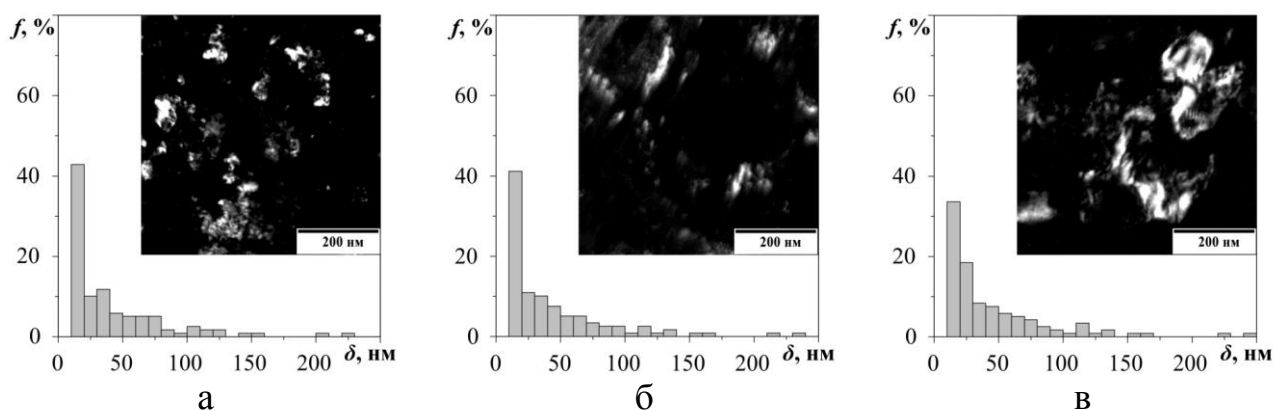


Рисунок 13 – Темнопольные изображения и распределение размеров зерен наноструктурированной поверхности стали 20X13 после обработки без теплоотвода при скорости скольжения индентора: а) 8 м/мин; б) 15 м/мин; в) 20 м/мин

Анализ изображений показал, что наиболее дисперсная структура формиру-

ется в диапазоне скоростей от 8 до 15 м/мин где средний размер зерна $\delta=36...47$ нм для стали 20X и $\delta=41...53$ нм для стали 20X13 (рисунок 13). Повышение скорости до 20 м/мин приводит к увеличению среднего размера зерна до 69 нм и 53 нм, соответственно. При этом отдельные зерна могут достигать размеров 0,6...1 мкм. НСВ стали 20X13 инструментом с системой отвода фрикционного тепла при $T_{ж}=0\pm 1$ °С в диапазоне скоростей от 30 до 50 м/мин обеспечило формирование нанокристаллической структуры со средним размером зерен 15...25 нм (рисунок 14 а, б). С повышением скорости до 70 м/мин произошло формирование смешанной структур, отдельные из которой достигают ~600 нм (рисунок 14 в).

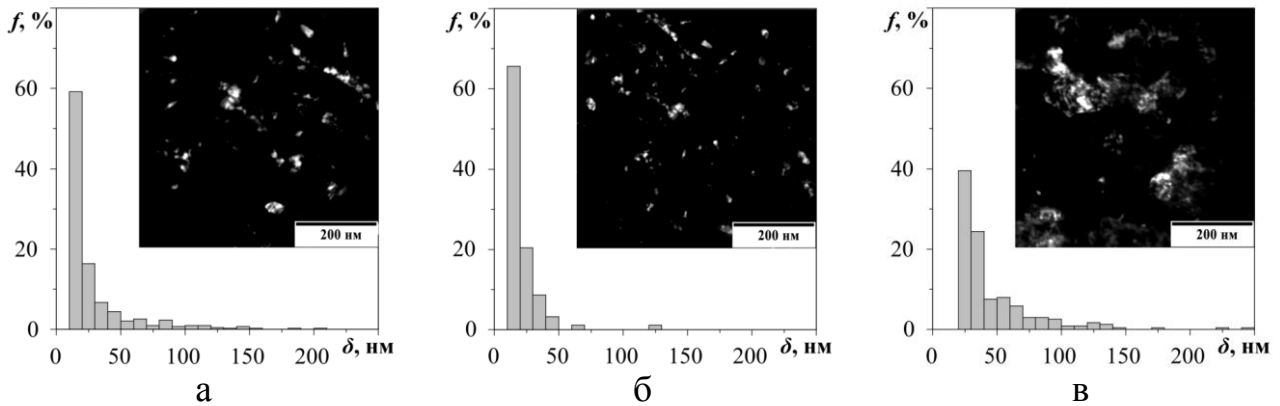


Рисунок 14 – Темнопольные изображения и распределение размеров зерен наноструктурированной поверхности стали 20X13 после обработки с системой отвода фрикционного тепла при скорости скольжения индентора: а) 30 м\мин; б) 50 м/мин; в) 70 м/мин.

На основе выполненного размерного анализа объем зерен может быть определен по следующей зависимости:

$$V_{\delta} = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{S_d}{\pi} \right)^{\frac{3}{2}} = \frac{4}{3} S_d \sqrt{\frac{S_d}{\pi}} . \quad (8)$$

Полученные зависимости объемной фракции нанокристаллитов от параметра Зинера-Холломона, имеющие ярко выраженный экстремум при $\ln Z \approx 70$ для стали 20X и при $\ln Z \approx 59$ для стали 20X13 (рисунок 15).

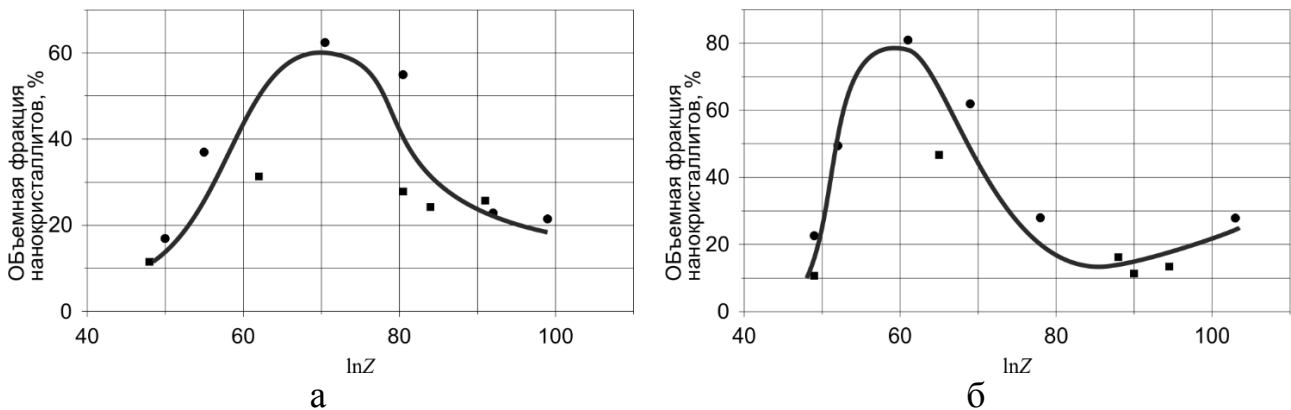


Рисунок 15 – Зависимости объемной фракции нанокристаллитов от параметра Зинера-Холломона в поверхностном слое сталей 20X (а) и 20X13 (б)

Исследования изменения толщины наноструктурированного слоя от ско-

рости скольжения индентора были выполнены на поперечных шлифах методом РЭМ на микроскопе Zeiss CrossBeam AURIGA (рисунок 16).

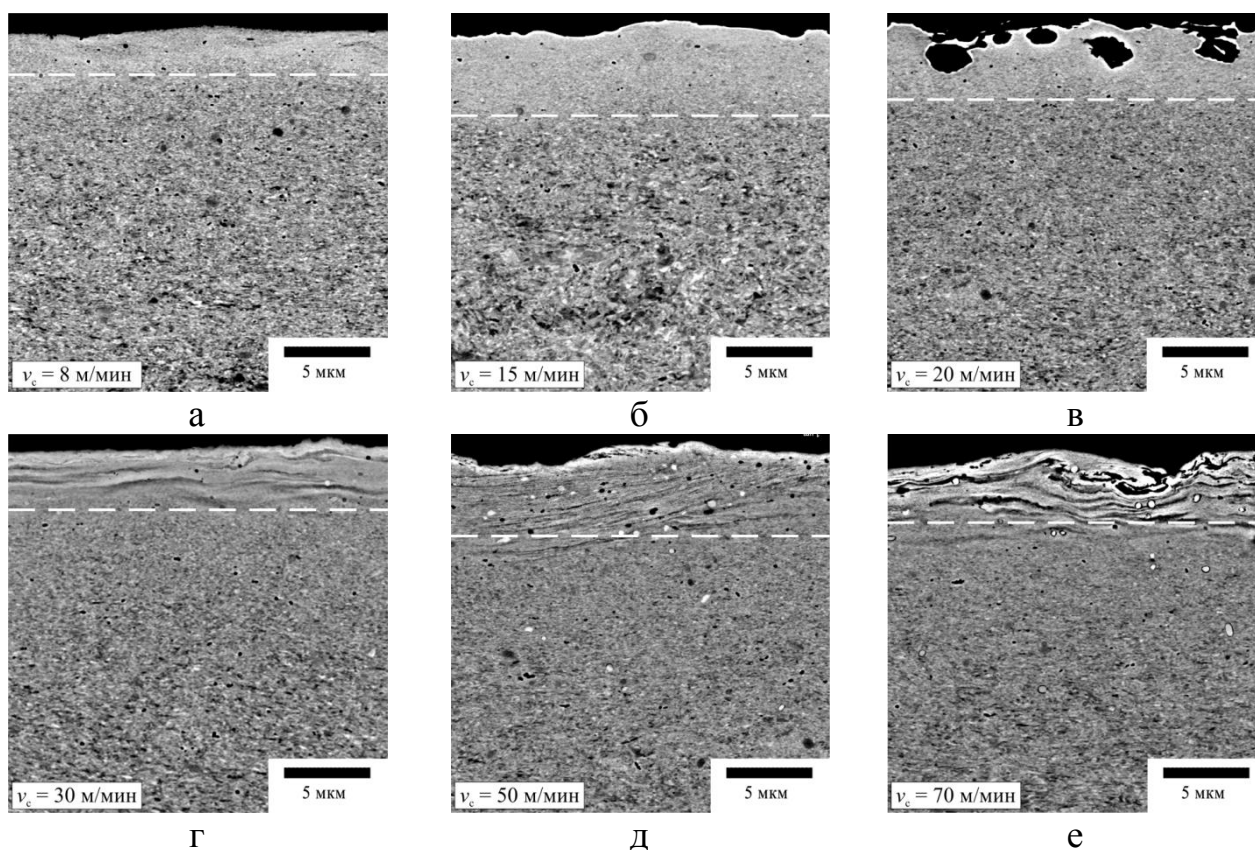


Рисунок 16 – Толщина и морфология наноструктурированного слоя стали 20X13 при обработке инструментом без теплоотвода (а – в) и с системой отвода фрикционного тепла (г – е)

Установлено, что наноструктурирующее выглаживание сталей 20X и 20X13 без теплоотвода при скорости скольжения до 15 м/мин обеспечивает формирование наноструктурированного слоя толщиной до 2,7...4,4 мкм. При повышении скорости скольжения до 20 м/мин появляются следы эрозии поверхностного слоя. Применение инструмента с системой отвода тепла при скорости скольжения 30 м/мин обеспечивает формирование наноструктурированного слоя толщиной 3,3...4,1 мкм. По мере повышения скорости скольжения до 50 м/мин толщина слоя увеличивается до 4,3 мкм. При увеличении скорости до 70 м/мин происходит локальное отделение тонких слоев наноструктурированного слоя.

На основе данных растровой электронной микроскопии были построены зависимости толщины наноструктурированного слоя от параметра Зинера-Холломона (рисунок 17), которые также имеют выраженный экстремум $\ln Z \approx 69$ для стали 20X и $\ln Z \approx 62$ для стали 20X13. Таким образом, оптимальный диапазон значений параметра Зинера-Холломона по критериям максимальной объемной фракции нанокристаллитов и максимальной толщины наноструктурированного слоя для стали 20X составляет $\ln Z = 69 \dots 70$, для стали 20X13 – $\ln Z = 59 \dots 62$.

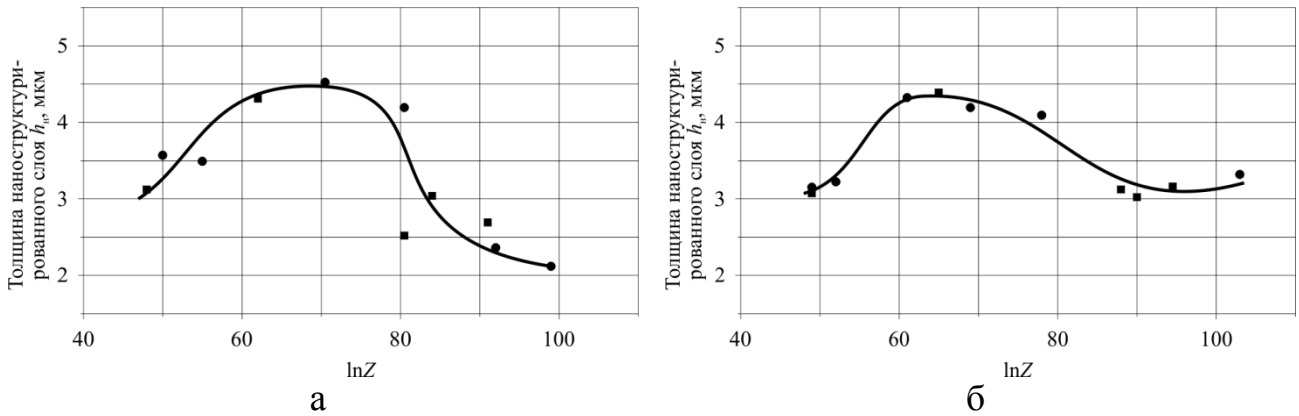


Рисунок 17 – Зависимости толщины наноструктурированного слоя, формируемого при наноструктурирующем выглаживании сталей 20X (а) и 20X13 (б), от параметра Зинера-Холломена

В соответствии с зависимостями (4) и (5) по установленным оптимальным значениями параметра Зинера-Холломена расчетным путем определены границы допустимого температурно-скоростного режима НСВ сталей 20X и 20X13 инструментом с системой отвода фрикционного тепла (рисунок 18). Полученные

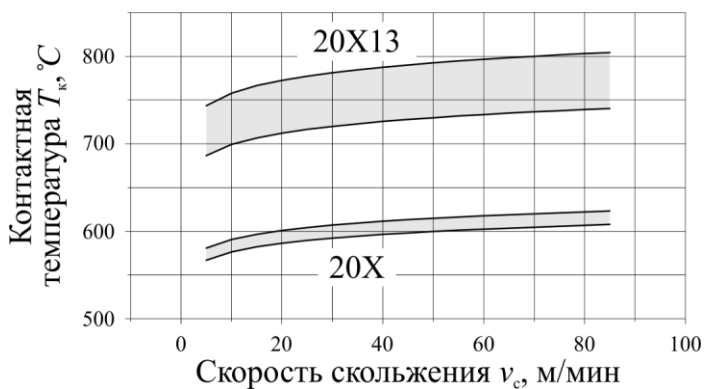


Рисунок 18 – Допустимые границы температурно-скоростного режима НСВ сталей 20X и 20X13

кривые соответствуют наиболее благоприятному режиму наноструктурирования мартенситных сталей с обеспечением объемной фракции нанокристаллитов от 60 до 80 % при толщине наноструктурированного слоя $4 \pm 0,5$ мкм. Таким образом, при изменении скорости скольжения индентора от 5 до 85 м/мин для формирования нанокристаллической структуры стали 20X и 20X13 допустимая контактная температура должна находиться в пределах от 570 до 620 °C и от 680 до 800 °C, соответственно.

В разделе 5 представлены результаты исследования физико-механических и трибологических свойств поверхностного слоя образцов мартенситных сталей после наноструктурирующего выглаживания инструментом без теплоотвода и с системой отвода фрикционного тепла. Исследование микротвердости было выполнено на микротвердомере Leica VMHT при десяти измерениях с каждого участка образца, соответствующего заданной скорости скольжения индентора. Установлено, что применение инструмента с системой отвода тепла обеспечивает упрочнение стали 20X до ~ 1480 HV_{0,5} и стали 20X13 – до ~ 1310 HV_{0,5}, что на 13% и 17% выше максимально достижимой микротвердости при обработке без теплоотвода (рисунок 19).

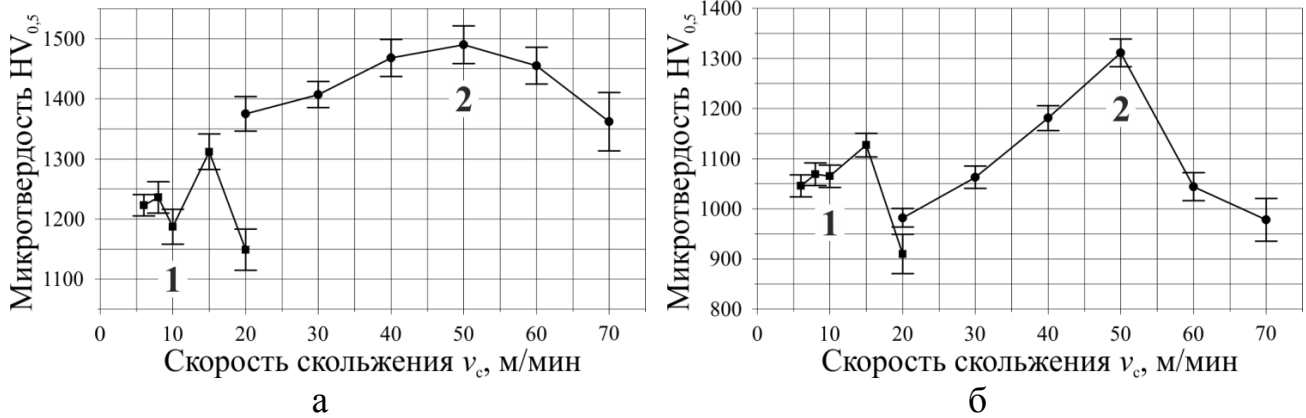


Рисунок 19 – Зависимости микротвердости поверхности сталей 20X (а) и 20X13 (б) от скорости скольжения индентора при наноструктурирующем выглаживании: 1 – без теплоотвода; 2 – с системой отвода фрикционного тепла

Установлена взаимосвязь микротвердости поверхностного слоя $HV_{0.5}$ и параметра Зинера-Холломона Z (рисунок 20). Из графиков следует, что максимальное упрочнение сталей 20X и 20X13 достигается при $\ln Z \approx 61$, что хорошо согласуется с оптимальными значениями Z , установленными в разделе 4.

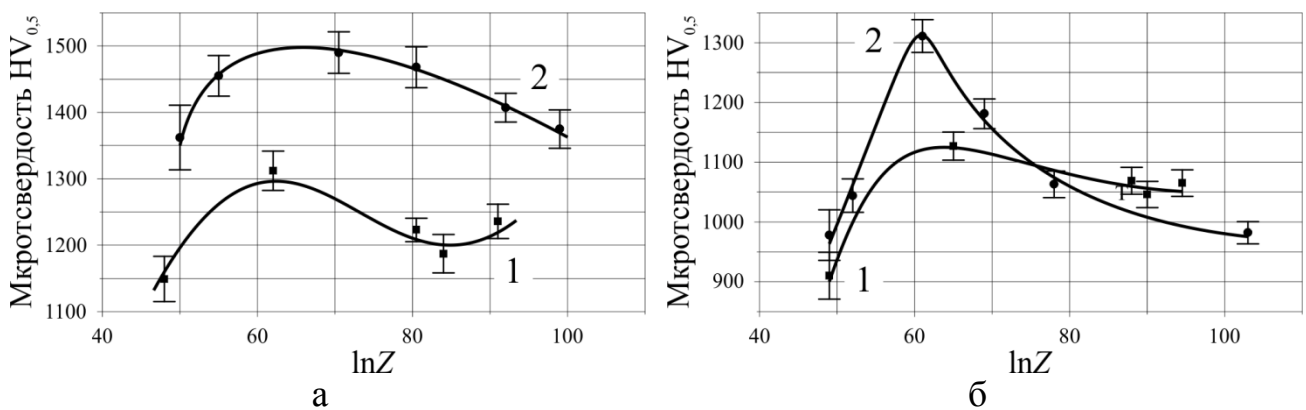


Рисунок 20 – Зависимости микротвердости поверхности сталей 20X (а) и 20X13 (б) от параметра Зинера-Холломона при наноструктурирующем выглаживании образца инструментов: 1 – без теплоотвода; 2 – с системой отвода фрикционного тепла

Кроме того, установлена взаимосвязь шероховатости обработанного поверхностного слоя со скоростью скольжения индентора v_c . Исследование выполнено методом VSI на оптическом 3D-проилметре WYCO NT1100 с участков площадью $0,353 \text{ мм}^2$. Погрешность определялась по измерениям с десяти участков, обработанных при одинаковых режимах. Показано, что применение инструмента с системой отвода фрикционного тепла обеспечивает снижение среднего арифметического отклонения профиля поверхности стали 20X до $Ra \approx 0,2 \text{ мкм}$ и стали 20X13 – до $Ra \approx 0,28 \text{ мкм}$ (рисунок 21). Стабильный уровень шероховатости поверхности с отклонением $\pm 0,1 \text{ мкм}$ поддерживается в диапазоне скоростей от 20 до 60 м/мин, в то время как наноструктурирующее выглаживание инструментом без теплоотвода приводит к существенному росту шероховатости и сдвиговой неустойчивости поверхностного слоя при скорости

скольжения индентора $v_c \geq 15$ м/мин.

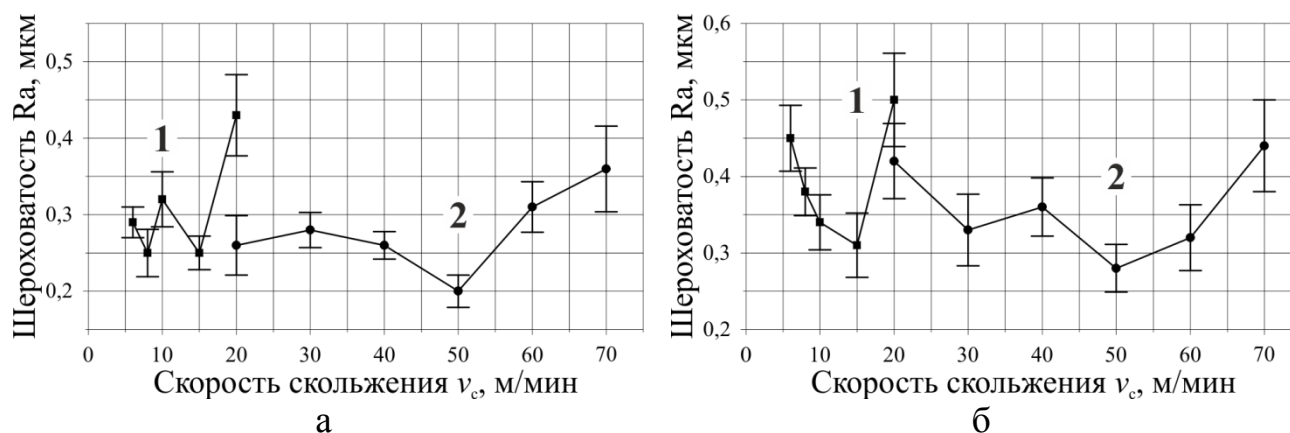


Рисунок 21 – Зависимости шероховатости поверхности сталей 20X (а) и 20X13 (б) от скорости скольжения индентора при обработке: 1 – без теплоотвода; 2 – с системой отвода фрикционного тепла

Выполнено исследование градиента микротвердости по глубине поверхностного слоя на образцах стали 20X13 после наноструктурирующего выглаживания со скоростью скольжения индентора 15 м/мин инструментом без теплоотвода и 50 м/мин инструментом с отводом фрикционного тепла.

Измерения микротвердости проведены на микротвердомере Leica VMHT при послойном утонении образцов в хлорно-уксусном электролите, каждое из которых длилось не более 10 секунд. Оценка микротвердости проводилась по результатам 20-ти измерений после каждого утонения. Результаты исследований

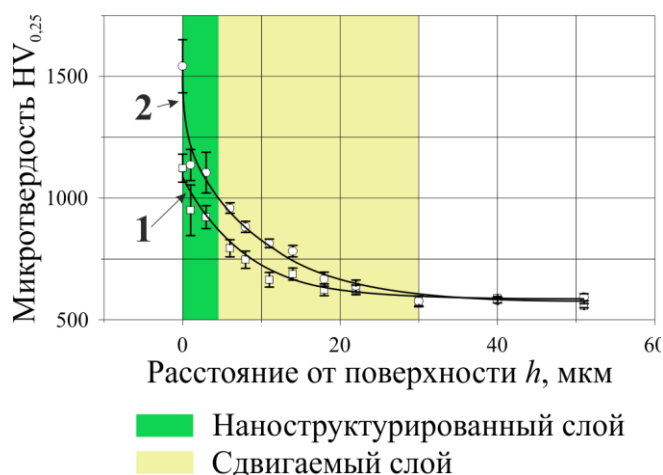


Рисунок 22 – Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя стали 20X13 после обработки при скорости скольжения 15 м/мин без теплоотвода (1) и 50 м/мин с отводом фрикционного тепла (2)

приведены на рисунке 22.

Как следует из графиков, наноструктурирующее выглаживание обеспечивает формирование поверхностного слоя с плавным градиентом микротвердости $HV_{0,25}$ по глубине до 40 мкм. Применение отвода фрикционного тепла из контактной зоны индентора увеличивает микротвердость в наноструктурированном слое в среднем на 25–30 %.

Трибологические свойства образцов после наноструктурирующего выглаживания инструментом с системой отвода фрикционного тепла при скорости скольжения индентора 50 м/мин были испытаны на трибометре CSM Instruments по схеме палец-диск. Испытания проводились в условиях сухого трения и при смазке ин-

дустриальным маслом И-20. В качестве контртела был использован сферический палец с радиусом 5 мм из корунда Al_2O_3 , нагрузка составляла 5 Н, линейная скорость относительного движения пары – 6 м/мин. Испытания завершались при прохождении пальцем фиксированного пути равного 400 м. Выбор материала контртела обусловлен использованием технологии НСВ для изготовления шпинделей задвижек высокого давления, работающих в средах с высоким содержанием абразивных частиц.

На основе анализа геометрических параметров дорожек износа (рисунок 23) в направлении, перпендикулярном направлению движения пальца при испытании, был определен объем изношенного материала:

$$V_{\mu} = 2\pi R S_{\mu}, \quad (9)$$

где R – радиус дорожки трения, S_{μ} – площадь дорожки износа в поперечном сечении.

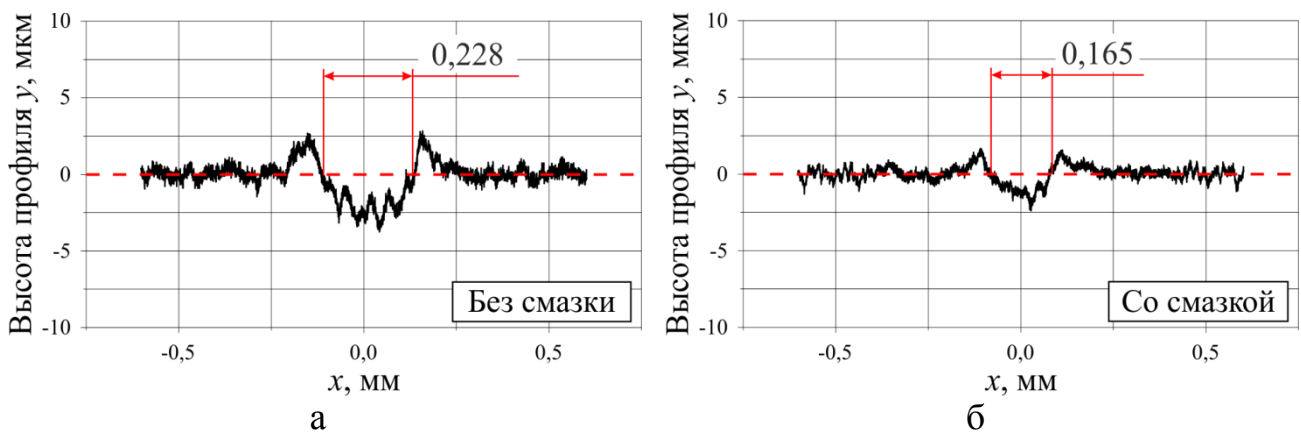


Рисунок 23 – Профилограммы дорожек износа наноструктурированных поверхностей сталей 20X13 при испытании без смазки (а) и с индустриальным маслом И-20 (б)

Площадь дорожки износа в поперечном сечении была определена как:

$$S_{\mu} = r^2 \arcsin\left(\frac{w_{\mu}}{2r}\right) - \frac{w_{\mu}}{4} \sqrt{4r^2 - w_{\mu}^2}, \quad (10)$$

где r – радиус сферической части корундового пальца, w_{μ} – ширина дорожки трения. По полученному объему изношенного материала с использованием классической формула Арчадра определена удельная интенсивность изнашивания:

$$k = \frac{V_{\mu}}{F l_{\mu}}, \quad (11)$$

где F – нагрузка на палец, Н, l_{μ} – путь трения, м.

Полученные результаты были сравнены с результатами предшествующих трибологических испытаний поверхностей после наноструктурирующего выглаживания без теплоотвода (рисунок 24), полученными Кузнецовым В.П. Показано, что интенсивность изнашивания поверхностей сталей 20X и 20X13 после наноструктурирующего выглаживания инструментом с системой отвода фрикционного тепла на 2...3 порядка ниже интенсивности изнашивания по-

верхностей после обработки без теплоотвода.

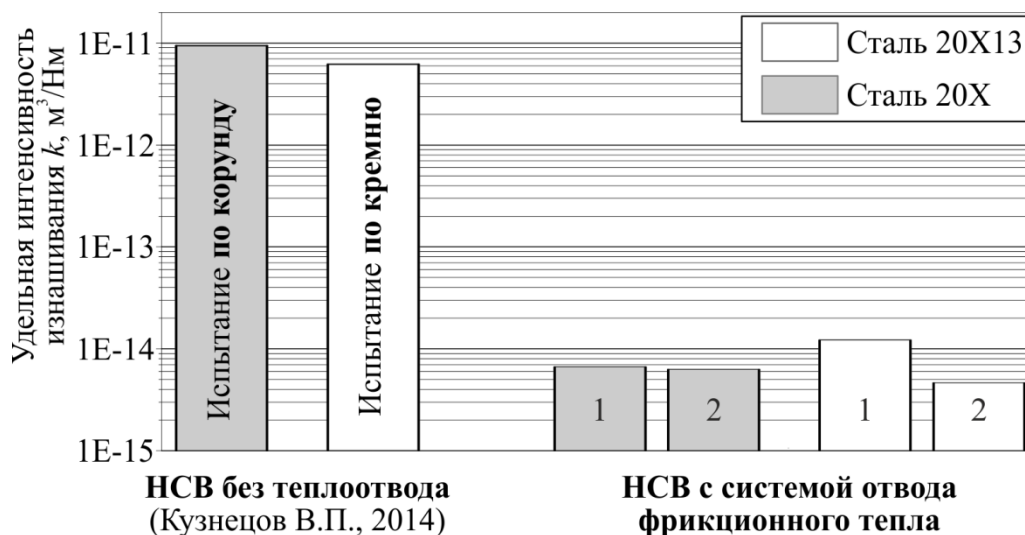


Рисунок 24 – Сравнение удельной интенсивности изнашивания поверхностей сталей 20X и 20X13 после наноструктурирующего выглаживания: 1 и 2 – испытания корундом всухую (1) и со смазкой (2)

Замена шлифовальных и полировальных операций при изготовлении шпинделей задвижек MKTZ1-300.25.012 из стали 20X13 на НСВ с системой отвода фрикционного тепла при скорости скольжения индентора 50 м/мин обеспечит снижение трудоёмкости на 22% и себестоимости производства на 15%. Годовой экономический эффект от внедрения технологии при производстве партии шпинделей из 1500 штук на ООО «Предприятие «Сенсор» составил 1'071'317,04 рубля.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Сформулирована концепция управления формированием нанокристаллической структуры при высокоскоростном наноструктурирующем выглаживании, основанная на отводе фрикционного тепла из контактной зоны в инструмент и поддержании оптимального температурно-скоростного режима деформации.

2 Разработана математическая модель теплопередачи из контактной зоны скользящего индентора, позволяющая определять необходимую долю (коэффициент) отвода фрикционного тепла и параметры теплоотводящей системы инструмента.

3 Создан и запатентован выглаживающий инструмент с системой отвода фрикционного тепла, позволяющий управлять температурным режимом наноструктурирующего выглаживания.

4 Разработан экспериментально-расчетный метод определения связи степени и скорости интенсивной пластической деформации сдвига со скоростью скольжения индентора на основе 3D-профилометрии валика пластически отесненного металла и сканирующей электронной микроскопии поверхностного слоя.

5 Установлены зависимости изменения коэффициента трения и контактной температуры от скорости скольжения индентора, позволяющие выполнить расчет параметра Зинера-Холломона при различных режимах наноструктурирующего выглаживания инструментом без теплоотвода и с системой отвода фрикционного тепла.

6 Определен допустимый температурно-скоростной режим наноструктурирующего выглаживания, обеспечивающий формирование нанокристаллической структуры поверхностного слоя сталей 20X и 20X13 на основе оптимизации параметра Зинера-Холломона по критериям объемной фракции нанокристаллитов и толщины наноструктурированного слоя.

7 Установлено, что наноструктурирующее выглаживание стали 20X инструментом с системой отвода фрикционного тепла при скорости скольжения 50 м/мин позволяет формировать наноструктурированный слой толщиной 4,5 мкм со средним размером зерна ~ 20 нм, микротвердостью до 1480 HV_{0,5} и шероховатостью до Ra=0,2 мкм, что обеспечивает снижение удельной интенсивности изнашивания в паре с корундом до $\sim 6 \cdot 10^{-15}$ м³/Нм.

8 Показано, что наноструктурирующее выглаживание стали 20X13 инструментом с системой отвода фрикционного тепла при скорости скольжения 50 м/мин позволяет формировать наноструктурированный слой толщиной 4,4 мкм со средним размером зерна 22 нм, микротвердостью 1310 HV_{0,5} и шероховатостью до Ra=0,28 мкм, что обеспечивает снижение удельной интенсивности изнашивания в паре с корундом до $\sim 5,6 \cdot 10^{-15}$ м³/Нм.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах и изданиях, определенных ВАК:

1 Скоробогатов А. С. Финишная технология наноструктурирующего выглаживания поверхностных слоев при обработке деталей машиностроения на многоцелевых станках / В. П. Кузнецов, В. Г. Горгоц, А. С. Скоробогатов // Нанотехника. – 2014. – №2. – С. 86-89. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

2 Скоробогатов А. С. Теория, практика и перспективы развития технологии наноструктурирующего выглаживания / В. П. Кузнецов, А. С. Скоробогатов // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2017. – №2(41). – С. 184–194. (0,7 п.л. / 0,4 п.л.)

3 Скоробогатов А. С. Моделирование поведения кристаллита с межзеренной границей в условиях локального сдвигового нагружения / Дмитриев А. И. и др. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №6. – <http://www.science-education.ru/120-15953>. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.)

4 Скоробогатов А. С. Повышение эффективности наноструктурирующего

выглаживания путем управления теплоотводом / А. С. Скоробогатов, В. П. Кузнецов, В. Г. Горгоц // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2017. – №2(41). – С. 174–180. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.)

5 Skorobogatov A. S. Mathematical Model of Thermal Physics of the Dual-cycle Cooling System of the tool for Pieces Nanostructuring Burnishing / V. P. Kuznetsov, A. S. Skorobogatov, V. G. Gorgots // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 770 (2015). – P. 449-455. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.)

6 Skorobogatov A. S. Finishing and Hardening of a Flat Surface Ring Area of a Workpiece by Rotary Burnishing / V. P. Kuznetsov, V. V. Voropaev, A. S. Skorobogatov // Key Engineering Materials. – Vol.743 (2017). – P. 245–247. (0,4 п.л. / 0,1 п.л.)

7 Skorobogatov A. S. The Analysis of speed increase perspectives of nanostructuring burnishing with heat removal from the tool / Kuznetsov V. P. et al. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012127. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.)

Патенты:

8 Выглаживающий инструмент с модулем охлаждения : пат. 150111 Рос. Федерация : МПК В24В 39/00. / Кузнецов В. П., Горгоц В. Г., Скоробогатов А. С. ; заявитель и патентообладатель ООО «Предприятие «Сенсор». – №2014130830/02 ; заявл. 24.07.2014 ; опубл. 27.01.2015, Бюл. №3. – 2 с.

9 Способ наноструктурирующего упрочнения поверхностного слоя прецизионных деталей выглаживанием и система для его осуществления : пат. 2635987 Рос. Федерация : МПК В24В 39/00 В82В 3/00 / Кузнецов В. П., Скоробогатов А. С., Попов А. А., Лобанов Н. Л., Горгоц В. Г. ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», ООО «Предприятие «Сенсор». – № 2016118448 ; заявл. 11.05.2016 ; опубл. 17.11.2017, Бюл. №32 – 9 с.

Публикации в других изданиях:

10 Скоробогатов А. С. Исследование влияния температуры и скорости наноструктурирующего выглаживания стали 20Х13 на параметры качества поверхностного слоя / Кузнецов В. П. и др. // Труды IV Международной научно-технической конференции «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (Резниковские чтения), (Тольятти, 27-29 мая 2015 г.): в 2 ч. / ред. кол. А.В. Гордеев и др. – Тольятти: ТГУ, 2015. – Ч.1. – С. 273-279. (0,45 п.л. / 0,1 п.л.)

11 Скоробогатов А. С. Теоретические основы отвода тепла из контактной зоны инструмента при наноструктурирующем выглаживании термоупрочненных сталей / В. П. Кузнецов, В. Г. Горгоц, А. С. Скоробогатов // Труды IV Ме-

ждународной научно-технической конференции «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (Резниковские чтения), (Тольятти, 27-29 мая 2015 г.): в 2 ч. / ред. кол. А.В. Гордеев и др. – Тольятти: ТГУ, 2015. – Ч.1. – С. 40-47. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.)

12 Скоробогатов А. С. Финишная технология наноструктурирующего выглаживания поверхностных слоев при обработке деталей машиностроения на многоцелевых станках / В. П. Кузнецов, В. Г. Горгоц, А. С. Скоробогатов // Нанотехнологии – производству : Тезисы докладов X Международной научно-практической конференции, 2-4 апреля 2014, г. Фрязино. – М.: Изд-во «Янус-К», С. 47-48. (0,15 п.л. / 0,05 п.л.)

13 Скоробогатов А. С. Математическая модель теплофизики двухконтурной теплоотводящей системы инструмента для наноструктурирующего выглаживания деталей / В. П. Кузнецов, А. С. Скоробогатов, В. Г. Горгоц // Актуальные проблемы современного машиностроения: сборник трудов Международной научно-практической конференции / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – С. 149–154. (0,4 п.л. / 0,15 п.л.)

14 Скоробогатов А. С. Теплофизическая модель инструмента с интегрированным охлаждением на основе элементов Пельтье / В. П. Кузнецов, А. С. Скоробогатов, В. Г. Горгоц // Труды IV Международной научно-технической конференции «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (Резниковские чтения), (Тольятти, 27-29 мая 2015 г.): в 2 ч. / ред. кол. А.В. Гордеев и др. – Тольятти: ТГУ, 2015. – Ч.1. – С. 34-40. (0,45 п.л. / 0,2 п.л.)

15 Скоробогатов А. С. Трибологические основы наноструктурирующего выглаживания / В. П. Кузнецов, А. С. Скоробогатов, Ю. Б. Червач // Трибология – машиностроению: Труды XI международной научно-технической конференции (1–3 ноября 2016 г). – М.: Институт компьютерных исследований, 2016. – С. 133–134. (0,15 п.л. / 0,05 п.л.)

16 Скоробогатов А. С. Трибологические свойства закаленных конструкционных сталей, подвергнутых наноструктурирующему выглаживанию / Скоробогатов А. С. и др. // Трибология – машиностроению: Труды XI международной научно-технической конференции (1–3 ноября 2016 г). – М.: Институт компьютерных исследований, 2016. – С.220–222. (0,2 п.л. / 0,1 п.л.)

Подписано в печать
Печать офсетная
Заказ

Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 1,0
Тираж 100 экз.

Бумага тип №1
Уч.-изд. л. 1,0