

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Потехина Б.А. на диссертационную работу Скоробогатова Андрея Сергеевича «Управление формированием структуры и свойств поверхностного слоя мартенситных сталей при высокоскоростном наноструктурирующем выглаживании с теплоотводом», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – «Материаловедение (в машиностроении)».

Диссертационная работа Скоробогатова Андрея Сергеевича представляет собой комплексное исследование, посвященное разработке эффективной технологии наноструктурирующего выглаживания, обеспечивающего формирование нанокристаллической структуры и свойств поверхностного слоя мартенситных сталей.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и 4-х приложений. Работа изложена на 135 страницах, содержит 68 рисунков и 4 таблицы, список литературы включает 101 наименование.

В литературном обзоре рассмотрены основные принципы наноструктурирования конструкционных сталей. Подробно описана проблема повышения скорости скольжения индентора при фрикционной обработке и наноструктурирующем выглаживании, связанная с изменением коэффициента трения и существенным увеличением контактной температуры, приводящих к разрушению поверхностного слоя.

На основе обзора научной литературы диссертантом выявлены и систематизированы ключевые параметры, влияющие на физико-механический процесс диспергирования структуры поверхностного слоя трением, среди которых выделена роль скорости деформации и температуры. Рассмотрены пути управления формированием нанокристаллической структуры на основе параметра Зинера-Холломона.

Проанализированы возможность поддержания контактной температуры при повышении скорости скольжения индентора и пути отвода выделившегося в контактной зоне фрикционного тепла для поддержания режима «теплой деформации». Обосновано суждение о том, что наиболее перспективным является обеспечение отвода тепла в выглаживающий инструмент на основе системы внутреннего охлаждения индентора.

Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, которые в полной мере направлены на решение проблемы повышения скорости скольжения индентора и производительности наноструктурирующего

выглаживания, приводящего к повышению служебных свойств соответствующих изделий.

В разделе 2 определены основные теоретические подходы к решению поставленной проблемы и сформулирована концепция управления формированием нанокристаллической структуры при высокоскоростном наноструктурирующем выглаживании. Концепция основана на установлении допустимых границ изменения температурно-скоростного режима процесса путем определения оптимизации параметра Зинера-Холломона по критериям объемной фракции нанокристаллитов и толщины наноструктурированного слоя.

Для решения поставленных задач диссертантом разработана математическая модель теплопередачи фрикционного тепла в обрабатываемую деталь и инструмент, позволяющая определять контактную температуру и параметры теплоотводящей системы инструмента. Разработанная модель теплопередачи фрикционного тепла реализована на основе метода электротепловых аналогий в виде цепи контактных, объемных и конвективных тепловых сопротивлений обрабатываемого и инструментального материала. С использованием модели определена доля фрикционного тепла, которую необходимо отвести для поддержания режима «теплой деформации» в условиях существенного повышения скорости скольжения индентора. Также спрогнозирована необходимая температура охлаждающей жидкости в теплоотводящей системе инструмента, обеспечивающая поддержание режима «теплой деформации» в деформируемом материале.

Разработана расчетно-экспериментальная методика определения степени и скорости пластической деформации сдвига, необходимых для определения параметра Зинера-Холломона, основанная на применении 3D-профилометрии и растровой электронной микроскопии поверхностного слоя.

В этом разделе *содержательно и наглядно* приведены схемы и параметры проведения фрикционно-механической обработки, деформационные и тепловые процессы, её составляющие, а вот методы определения коэффициента трения, степени и скорости деформации поверхностных слоёв, методика последующих металлографических исследований, оборудование и его характеристики не предоставлены. В соответствующих разделах и приложениях некоторых сведений не достаточно.

Раздел 3 посвящен экспериментальным исследованиям физико-механического процесса наноструктурирующего выглаживания мартенситных

сталей, приведен химический состав, структура и механические свойства исследуемых термоупрочненных сталей: цементованной 20X и 20X13. Выбор сталей обусловлен их широким применением в производстве высокоресурсных трибосопряжений нефтегазопромыслового оборудования. Обоснован выбор и представлены механические и теплофизические свойства инструментальных материалов, использованных при фрикционной обработке.

Диссертант принял участие в разработке и патентовании инструмента с замкнутой системой охлаждения индентора, позволяющего реализовать в процессе наноструктурирующего выглаживания различные условия отвода фрикционного тепла.

С использованием высокоточного трехосевого динамометра Kistler 9257BA впервые установлены зависимости коэффициента трения от скорости скольжения индентора в реальных условиях наноструктурирующего выглаживания без теплоотвода и с системой отвода тепла. Экспериментально установлена взаимосвязь контактных сил и коэффициента трения со скоростью скольжения индентора. Выявлена допустимая (предельная) скорость скольжения индентора при трении, установлен скачкообразный рост и нестабильность коэффициента трения при превышении этой скорости. Использование инструмента с системой отвода фрикционного тепла в значительной степени обеспечивает стабилизацию коэффициента трения и мощности тепловыделения при повышении скорости до 48 м/мин.

Разработан метод «сминаемой» термопары и экспериментально установлены изменения контактной температуры от скорости скольжения индентора. Впервые показано, что отвод фрикционного тепла из контактной зоны позволяет повысить степень пластической деформации сдвига в поверхностном слое мартенситных сталей до 4,5...5 и скорость деформации до $85 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, что выше аналогичных значений при равноканальном угловом прессовании и кручении под высоким давлением.

В разделе 4 выполнен структурный анализ поверхностного слоя исследуемых сталей для соответствующих скоростных и тепловых режимов наноструктурирующего выглаживания. Формирование нанокристаллической структуры доказано представлением значительного количества микрофотографий с замкнутыми кольцами Дебая. На основе полученных результатов выполнен расчет объемов зерен и установлены зависимости объемной фракции нанокристаллитов от параметра Зинера-Холломона,

определенного для соответствующих значений скорости деформации и контактной температуры.

Следует отметить, что использование диссертантом термина «зерно» при описании нанокристаллической структуры достаточно спорно. Вероятно, лучше было бы использовать термин фрагмент или кристаллит.

В этом разделе также проведено определение толщины наноструктурированного слоя на основе растровой электронной микроскопии поперечных шлифов. Определение толщины наноструктурированного слоя как расстояния от поверхности до условной границы раздела с исходной и ультрамелкозернистой структурой, осуществляли визуально, что не обеспечивает высокую точность полученных результатов. Однако значения толщин, установленные для различных скоростных режимов обработки, могут быть использованы для сравнительного анализа.

На основе анализа взаимосвязи объемной фракции нанокристаллитов $\delta_{об}$ и толщины наноструктурированного слоя $h_{нс}$ с параметром Зинера-Холломона установлены его оптимальные значения, соответствующие максимумам $\delta_{об}$ и $h_{нс}$. Полученные оптимальные значения параметра Зинера-Холломона использованы для вычисления допустимой контактной температуры в зависимости от скорости скольжения индентора. Показано, что при наноструктурирующем выглаживании сталей 20X и 20X13 в диапазоне скоростей скольжения от 5 до 85 м/мин контактная температура должна находиться в пределах от 570 до 620 °С и от 680 до 800 °С, соответственно.

В пятом разделе представлены результаты упрочнения поверхности при наноструктурирующем выглаживании (рис. 5.1) при этом инструмент (головка) с теплоотводом фрикционного тепла допускает высокую скорость скольжения, до 50 м/мин, при которой наблюдается максимум упрочнения, величина которого на 200-250 ед. $HV_{0,5}$ выше, чем после обработки неохлаждаемым выглаживающим инструментом. Шероховатость поверхности обеих сталей также ниже при обработке инструментом с отводом фрикционного тепла.

Далее рассмотрено влияние смазки на коэффициент трения, время приработки и формирование дорожек износа (рис. 5.12). Выполнена оценка износостойкости – наиболее важной характеристики, обеспечивающей надежность и долговечность трибосопряжений. Показано, что отвод фрикционного тепла при выглаживании обеспечивает повышение износостойкости на 2-3 порядка относительно обработки без теплоотвода.

Разработанная технология реализована в серийном производстве на ООО «Предприятие «Сенсор» с реально достигнутым экономическим эффектом более 1 миллиона рублей/год.

Выполненное исследование показывает весьма *убедительное совпадение результатов теоретических оценок оптимизированных параметров Зинера-Холломона со значениями, полученными по критериям объемной доли нанокристаллитов и толщины наноструктурированного слоя, полученного выглаживанием.*

Создан и запатентован оригинальный инструмент для выглаживания с отводом фрикционного тепла, обеспечивающий повышенную степень наноструктуризации поверхности, не то что образцов, а реальных изделий, при этом установлены тепловые (скоростные) ограничения, *обеспечивающие стабильность созданной технологии наноструктурирующего выглаживания.*

Рассмотренная работа представляет собой *законченное исследование, внесшее существенный научный вклад в развитие и использование в практических целях эффективных и экономичных технологий наноструктурирования рабочих поверхностей изделий.*

Суждения диссертанта, выводы и заключения *достоверны и в должной мере обоснованы.* Обращает на себя внимание факт широкого использования специальных литературных источников на английском языке 55 из общего числа ссылок 101.

Однако по работе следует высказать замечания, задать вопросы:

1. В работе фактически отсутствует раздел «материалы и методы исследования», а сведения о методах исследования структуры, коэффициента трения и износостойкости разрознены по разным разделам и приложениям, что затрудняет восприятие некоторых разделов, нет сведений по режимам цементации стали 20Х.

2. В названии диссертации и в тексте работы стали 20Х и 20Х13 отнесены к мартенситным сталям, правомерно ли это для стали 20Х, ведь это сталь перлитного класса?

3. Страницы разделов параграфов в оглавлении (стр. 2–4) не соответствуют таковым в тексте, например, Раздел 3 в оглавлении указан на странице 40, а в тексте – на странице 42; Приложение Д – на странице 127, а фактически – 129.

Указанные недочеты не влияют на общую *положительную* оценку работы, которая *строго* оформлена в соответствии с действующими стандартами, хорошо опубликована, по содержанию полностью соответствует специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении), является научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям п.9 «Положения ВАК о присуждении ученых степеней» и её автор Скоробогатов Андрей Сергеевич вполне заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Профессор кафедры «Технология металлов» Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», доктор технических наук

^) /Потехин Борис Алексеевич/

620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37.

30.05.18.

Тел.: +7 (343) 262-96-38, +7 (343) 254-65-06.

E-mail: general@usfeu.ru, pba-mn@yandex.ru

