

## О Т З Ы В

### официального оппонента

на диссертацию Воропаева Владимира Валерьевича  
«Управление поверхностной закалкой кольцевых участков стали 20Х13  
при обработке трением с перемешиванием», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.16.09 — Материаловедение (в машиностроении)

Диссертационная работа В.В. Воропаева посвящена разработке физико-механического процесса для управления поверхностной закалкой кольцевых изделий из стали 20Х13. При этом автором реализована математическая модель тепловых и физических превращений при обработке поверхностей стали 20Х13 трением с перемешиванием, численно и экспериментально решен комплекс важных задач, обеспечивающий достижение поставленной в диссертационном исследовании цели.

Принципиальная возможность использования метода трения с перемешиванием для поверхностной закалки сталей показана за рубежом достаточно недавно. Поэтому нахождение технологических режимов этого метода, обеспечивающих их оптимальное сочетание для термического цикла закалки с формированием твердости и структуры в поверхностном слое сталей, является открытой проблемой, требующей своего решения. Важность решения таких задач обусловлена потребностью в экологически чистых и относительно недорогих технологиях обработки высокоточных деталей трибосопряжений, которые могут быть упрочнены закалкой в процессе обработки трением с перемешиванием на современных обрабатывающих центрах.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ и направлений совместных научных исследований кафедры термообработки и физики металлов Уральского федерального университета с промышленным партнером – ООО «Предприятие «Сенсор», что очень важно с точки зрения практического применения результатов диссертации.

Это дает основание утверждать, что **выбранная тема диссертации, является актуальной.**

Анализ публикаций диссертанта показал, что основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 печатных работах в российских научных журналах, материалах всероссийских и международных конференций, в том числе в 2 статьях в журнале «Вестник РГТА имени П.А. Соловьева», 1 статье в журнале «Key Engineering Materials» и по 1 статье в сборниках материалов конференций «AIP Conference Proceedings» и «Journal of Physics: Conference Series», входящих в **Перечень ВАК**, по результатам работы получены **два патента** Российской Федерации.

Материалы диссертационной работы прошли апробацию на пяти научных конференциях различного уровня (международных и региональных) в Томске, Рыбинске, Екатеринбурге.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, шести приложений и имеет общий объем 169 страниц. Список литературы содержит 54 источника. В приложениях приведены подробные данные экспериментальных измерений и описание устройства охлаждения тыльной стороны заготовки с расчетом требуемого расхода жидкости.

**Первый раздел** диссертации посвящен литературному обзору теоретических и экспериментальных исследований поверхностной закалки конструкционных материалов с применением методов лазерной и плазменной технологий, а также возможному применению развитых моделей к обработке трением с перемешиванием.

Во **втором разделе** диссертации изложены результаты исследований по обоснованию выбора материала инструмента и подвергаемой обработке стали, оборудования, а также разработан теоретический подход к управлению термическим циклом поверхностной закалки в процессе обработки трением с перемешиванием во взаимосвязи с технологическими параметрами и коэффициентом трения, формированием структуры и свойств упрочняемого поверхностного слоя. В нем описывается обобщенная модель и алгоритм решения многофакторной задачи управления термическим циклом на всех временных этапах поверхностной закалки в процессе обработки трением с перемешиванием, предложена веерная траектория движения инструмента в процессе обработки широкого кольцевого участка поверхности и показаны ее преимущества по сравнению с обработкой по концентрическим окружностям для обеспечения равномерной твердости слоя.

**Третий раздел** содержит результаты теоретического исследования термического цикла поверхностной закалки стали 20X13 на основе конечно-элементного моделирования одно- и многопроходного процесса обработки трением с перемешиванием. Основное внимание уделено численному решению методом конечных элементов тепловых задач на разных этапах обработки кольцевых поверхностей трением с перемешиванием и изучению распределения температуры по глубине поверхностного слоя в условиях прямолинейного движения инструмента с различными коэффициентами трения и подачами. Установлены оптимальные значения величины нормальной силы и частоты вращения инструмента, а также подачи инструмента. Наибольший интерес представляет моделирование поверхностной закалки кольцевого участка стали 20X13 для двух траекторий движения инструмента при многопроходной обработке с перекрытием

дорожек трения. Результатами конечно-элементного моделирования убедительно показаны преимущества веерной траектории движения инструмента по сравнению с движением инструмента по кольцевым концентрическим окружностям, позволяющей исключить самоотпуск на соседних дорожках трения, обеспечив равномерное упрочнение по ширине и глубине поверхностного слоя.

**Четвертый раздел** посвящен экспериментальным исследованиям процесса обработки трением с перемешиванием стали 20X13 на этапе разогрева инструмента и при формировании одной дорожки трения. Исследования проведены для выявления закономерностей изменения коэффициента трения при различном тепловложении в обрабатываемую сталь, которое задавалось изменением частоты вращения инструмента. Результатами проведенных экспериментов подтверждена адекватность выбора коэффициента трения и оптимальной комбинации технологических параметров, установленных конечно-элементным моделированием.

В заключительном **пятом разделе** изложены результаты экспериментальных исследований микроструктуры и прочностных свойств поверхностных слоев на кольцевых участках стали, обработанных трением с перемешиванием при разных траекториях движения обрабатывающего инструмента. Выявлено, что после обработки поверхности кольцевого участка поверхности стали 20X13 с движением инструмента по концентрическим окружностям индекс равномерности твердости изменяется от 0,3 до 0,5, а по веерной траектории с охлаждением тыльной стороны заготовки индекс равномерности твердости составляет 0,77...0,99. Приведены результаты внедрения технологии поверхностной закалки.

Соискателем получен ряд результатов, обладающих **научной новизной и имеющих важное научное и практическое значение**, среди которых я выделил следующие:

1. Предложена и обоснована обобщенная модель и алгоритмы решения многофакторной задачи управления термическим циклом поверхностной закалки стали 20X13 в процессе однопроходной обработки трением с перемешиванием.

2. Предложен вариант веерной траектории движения инструмента для обеспечения равномерной твердости кольцевых участков поверхностей в процессе обработки трением с перемешиванием и приведено его научное обоснование на основе комплекса конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований.

3. Определены оптимальные параметры величины нормальной силы и частоты вращения инструмента для нагрева стали 20X13 до заданных температур, а также величина подачи инструмента, которые обеспечивают требуемые при закалке

скорость охлаждения, время аустенизации и формирование мартенситной структуры на глубине до 1 мм. Установленные параметры получены численным моделированием и подтверждены экспериментально.

Следует подчеркнуть, что предложенные автором идеи и разработки в области управления термическим циклом поверхностной закалки кольцевых участков стали 20Х13 в процессе обработки трением с перемешиванием твердосплавным WC-Co инструментом **являются, несомненно, новыми и проведены действительно впервые.**

В работе очень подробно изложен подход к моделированию процесса и практической реализации поверхностной закалки кольцевых участков стали с применением веерной траектории движения инструмента со стабилизацией объемной температуры заготовки с помощью разработанного устройства охлаждения. При таком изложении не составляет труда воспользоваться разработками автора диссертации и другим исследователям, развивающим метод фрикционной закалки применительно к другим материалам. Это, безусловно, является достоинством работы и обеспечивает ее практическую ценность.

Существенную **значимость для проведения научных исследований и практики** имеют также и разработанные в ходе работы технологические режимы обработки трением с перемешиванием. Применение подобных наработок показано в подразделе 5.3 на примере изготовления клина задвижки DN 80 мм, PN 16 МПа на станке MA-600 (Okuma).

**Корректность** физической и математической постановки задач в области конечно-элементного моделирования не вызывает сомнений. **Достоверность** полученных в диссертации как численных, так и экспериментальных результатов убедительно доказана хорошим согласием результатов конечно-элементного моделирования с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований, с теоретическими результатами и экспериментальными данными других авторов.

**Обоснованность научных положений, сделанных выводов и рекомендаций** убедительно доказана многочисленными данными проведенных расчетов и экспериментов, аккуратно и доходчиво представленными в графическом виде и в таблицах.

Вместе с тем, работа не лишена недостатков. По тексту диссертации имеются следующие **замечания**:

1. В разделе 3 написано, что решается нелинейное уравнение теплопередачи (правильнее его назвать уравнением теплопроводности), при этом нелинейность

подразумевает учет зависимостей плотности, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности от температуры. В диссертации приведена графическая информация о виде зависимостей для этих параметров для аналога стали 20X13 – стали AISI 420 из зарубежных литературных источников, а в другом месте (в автореферате) написано, что эти данные были взяты из коммерческой базы данных SYSWELD. Вызывает также вопрос о точности описания пика при фазовом переходе на зависимости теплоемкости от температуры в этих данных и насколько это может повлиять на получаемые решения.

2. В работе не указана связь между заданием в контактной зоне тепловыделения с постоянной мощностью согласно формулы (2.1) и мощностью внутреннего тепловыделения  $Q_{int}$  в формуле (3.1). Дело в том, что формула (2.1) определяет мощность тепловыделения по всей круговой площади контакта трения с перемешиванием, а в формуле (3.1) требуется задать плотность мощности тепловыделения на единицу площади. Возникает вопрос: принималось ли в расчетах, что плотность мощности тепловыделения однородна по площади контакта, или считалось, что распределена как-то неоднородно?

3. При описании конечно-элементного моделирования в разделе 3 указано, что цилиндрический инструмент имеет диаметр 10 мм и фаску 0,5 мм, однако это не отражено в сеточной модели – на представленных рисунках конечно-элементной сетки фасок не видно.

4. Имеются также замечания по оформлению. На рисунке 2.7 *в* (и рисунке 2 *в* автореферата) точки обозначены  $1x, 2x, 3x, 1y, 2y, 3y$ , а в тексте они упоминаются как  $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$ , что несколько затрудняет понимание. Ни в подписях к рисункам 3.11 и 4.14 (рисунки 7 и 14 автореферата), ни в тексте диссертации не указано, что означают кривые и обозначения М, К и Ф+К на диаграммах охлаждения. На части рисунков, графически представляющих экспериментальные данные, отсутствует обозначения для разброса или точности измерений (например, рисунок 4.4 *б* диссертации и рисунок 11 *б* автореферата).

Отмеченные замечания не снижают научной ценности выполненных в диссертационной работе исследований и не позволяют усомниться в достоверности полученных результатов.

Более того, производит большое впечатление и вызывает огромное уважение объем проведенных изысканий диссертанта в области численного моделирования и экспериментальных исследований.

Оценивая содержание работы в целом, следует отметить, что данная диссертация представляет собой завершённое исследование, выполненное на высоком научном

уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Диссертация написана подробно, доходчиво, хорошо оформлена, содержит большое количество иллюстративного материала и таблиц.

**Автореферат достаточно полно отражает содержание, основные идеи и выводы диссертации.**

Считаю, что диссертационная работа Воропаева Владимира Валерьевича «Управление поверхностной закалкой кольцевых участков стали 20Х13 при обработке трением с перемешиванием» соответствует паспорту специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении), выполнена на высоком научном уровне и **представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены новые научно-обоснованные технические, технологические и иные решения, имеющие существенное значение для развития страны. Работа отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» и всем критериям, предъявляемым этим Положением к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Воропаев Владимир Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении).**

18.06.2021

Согласен на обработку персональных данных.

Заведующий лабораторией нелинейной механики метаматериалов и многоуровневых систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физ.-мат. наук, доцент

 Смолин Игорь Юрьевич

634055, г. Томск, просп. Академический, д. 2/4,  
тел. 8(3822) 286875, e-mail: smolin@ispms.ru

Подпись Смолина И.Ю. подтверждаю  
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН  
кандидат физико-математических наук



 Матолыгина Наталья Юрьевна