ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора Потехина Бориса Алексеевича на диссертацию Воропаева В.В. «Управление поверхностной закалкой кольцевых участков стали 20Х13 при обработки трением с перемешиванием», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроение).

Актуальность работы связана с развитием экономичного и экологически чистого метода поверхностной закалки прецизионных участков сталей и сплавов в процессе обработки трением с перемешиванием (ОТП) на современном технологическом оборудовании.

Структура и основное содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературных источников, включающего 54 наименования. Общий объем диссертационной работы составляет 169 страниц. Диссертационная работа содержит 100 рисунков и 15 таблиц.

Во введении обосновано применение нового метода поверхностного упрочнения – обработка трением с перемешиванием, который предложил в 2000 г. R.S. Mishra, а позднее S. Dodds установил эффект закаливания поверхностного деформированного слоя. При этом R.S. Mishra, определил этот способ ОТП (FSP), как частный случай сварки трением (FSW).

По существу, рассматриваемый технологический процесс представляет собой высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО), при которой поверхностный слой нагревается трением.

Впервые теоретические основы ВТМО созданы В.Д. Садовским и Е.Н. Соколковым и экспериментально реализованы в 1952 г. Позднее на базе ВТМО, НТМО возникли различные обработки, в этот ряд входит и FSP (ОТП), а перемешивание в этой аббревиатуре недостаточно строго.

В первом разделе представлен литературный обзор, в котором рассмотрены проблемы, характерные для процесса ОТП и аналогичных процессов лазерной и плазменной закалки: неоднородность твердости при сканировании обрабатываемой поверхности с перекрытием дорожек трения, влияние толщины обрабатываемого объекта на теплоотвод и, соответственно, на структуру и однородность поверхностной закалки по глубине.

На основе анализа аналогичного процесса лазерной поверхностной закалки стали AISI 420 (20Х13) выявлено, что может быть получена микротвердость 700 HV с мартенситной структурой на глубине до 300 мкм, в

Вх. № 05-19/1-328
от 21.06.2021г

результате нагрева тепловым пятном и в том числе в следствии диффузии углерода в аустенитный поверхностный слой. Тем не менее, и для лазерного упрочнения проблема формирования равномерной твердости при многопроходном сканировании лазерным лучом не решена (см. рис. 1.12 и 1.14).

В названии раздела 1.1 фигурирует плазменная обработка, но в содержательной части параграфа эта технология освещена недостаточно подробно (только на стр. 17, 26, 27). Однако, как и при лазерной закалке выявлена проблема выбора траектории движения пятна плазменного воздействия при многопроходной обработке.

В разделе 1.3 литературного обзора рассмотрены уже достигнутые результаты и новые возможности процесса ОТП (FSP), а также проблемы, которые необходимо решать, в частности с выбором материала деформирующего инструмента, который нагревается при трении до 940 °С; совершенствовать инструментальные державки (рис. 1.16), есть предпосылки применения иного химического состава твердого сплава для повышения теплостойкости.

На базе литературного обзора корректно сформулирована цель и задачи, которые необходимо решить для управления поверхностной закалкой в процессе ОТП (стр. 36).

Во втором разделе обоснован выбор обрабатываемого материала – сталь 20Х13, из которой на ООО «Предприятие «Сенсор» (г. Курган) изготавливают запорные органы задвижек (см. рис. 2.1), рабочая поверхность которых будет упрочнена методом ОТП с использованием обрабатывающего центра модели МА-600 OKUMA (Япония). В качестве инструмента выбран W-Co сплав KMG 303 (Китай) в виде цилиндра Ø 10 мм с кратковременной тепловой стойкостью до 1050 °С.

Для крепления этого инструмента разработана и запатентована (Патент РФ № 197733) специальная инструментальная державка (рис. 2.2), при этом нет её описания, хотя бы, отличительной особенности в сравнении с известной (см. рис.1.16, стр. 30).

В разделе 2.1 предложена модель решения многофакторной задачи управления термическим циклом закалки в процессе ОТП инструментом с плоским торцом. Для её реализации использованы аналитические общепринятые зависимости: мощности фрикционного тепловыделения при контакте цилиндрического инструмента с плоским торцом (уравнение 2.1), плотности фрикционного теплового потока (уравнение 2.2), коэффициента

теплового потока в инструмент и в обрабатываемый материал (коэффициента разветвления), см. уравнение 2.3 (стр. 41).

В этом же параграфе предложена блок-схема алгоритма управления термическим циклом закалки во взаимосвязи с параметрами процесса ОТП (нормальной силой, скоростью подачи и частотой вращения инструмента) и временными этапами предварительного нагрева, аустенизации и охлаждения (рис. 2.5. стр. 44).

В третьем разделе решена задача конечно-элементного моделирования (КЭМ) процесса ОТП и определены оптимальные для поверхностной закалки стали 20Х13 величины технологических параметров. Для реализации КЭМ в программном пакете ANSYS приведены известные зависимости изменения коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности стали 20Х13 от температуры в пределах 0…2000 °С (стр. 59, рис. 3.4). Здесь же приведены собственные экспериментальные результаты оценки коэффициента теплопроводности и температуропроводности инструментального материала. Конечно-элементное моделирование процесса ОТП выполнялось для всех временных этапов поверхностной закалки. Во-первых с помощью КЭМ удалось установить требуемые для предварительного разогрева стали 20Х13 до температуры 1050…1100 °С частоту вращения инструмента n= 4000 об/мин и нормальную силу $F_н$= 3500 Н, выбор которых далее подтвержден экспериментально в главе 4. Далее выполнено моделирование влияния подачи инструмента на изменение температурных вспышек на поверхности и на глубине 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мм. Оптимальная величина подачи инструмента определялась для трех значений коэффициента трения μ= 0,2; 0,24; 0,28 по критерию обеспечения температуры на глубине 0,5 мм равной 1000 °С, что обеспечивает для стали 20Х13 формирование после охлаждения мартенситной структуры. Кроме того моделирование позволило определить время выдержки (аустенизации) $t_γ$ и скорость нагрева упрочняемого материала. Показано, что поверхностная закалка инструментом с плоским торцом при нормальной силе $F_н$= 3500 Н и частоте вращения инструмента n= 4000 об/мин должна выполняться с подачей f= 100 мм/мин. Оптимальность данной величины подачи подтверждена экспериментально в главе 4. Выявленные при моделировании зависимости времени выдержки $t_γ$ от подачи инструмента позволили с помощью известной формулы G. Gottstein определить глубину диффузии углерода в поверхностном слое. При этом коэффициент диффузии углерода в стали 20Х13 вычислялся по эмпирической зависимости М.И. Гольдштейна и В.В. Попова. Далее рассматривается, в частности, зависимости

глубины диффузионного фронта углерода h_D, от подачи при различных задаваемых значениях коэффициентов трения (μ = 0,2-0,3), которые представлены на рис. 3.10. По тексту диссертации возникает вопрос, что означает термин «глубина диффузионного фронта» (стр. 68)?

На рисунке 3.11 показаны, по существу, термокинетические зависимости охлаждения стали 20Х13, из которых следует, что подача и коэффициент трения не влияют на формирование закаленного поверхностного слоя стали 20Х13.

Конечно-элементное моделирование закалки поверхностного ОТП показало, что движение инструмента по концентрическим окружностям приводит к неравномерности твердости в зоне перекрытия дорожек трения. Установлено, что в процессе ОТП кольцевых участков с движением инструмента от центра к периферии последовательно по трем концентрическим окружностям с 50% перекрытием дорожек трения, в поверхностном слое возникают циклы трехкратного нагрева материала, приводящие на первой дорожке к среднему (~500 °С) и на второй к высокому (~620 °С) отпуску (рис. 3.14).

В связи с этим обосновано и предложено веерное сканирование обрабатываемой поверхности (см. рис. 3.17), которое позволяет исключить или уменьшить градиент температур на обрабатываемой поверхности в сравнении с кольцевым сканированием поверхности, что и приводит к равномерности твердости на обрабатываемой поверхности.

Выполненные теоретические оценки позволили определить (наметить) режимы и схему рациональной обработки ОТП, позволяющие сократить экспериментальную часть исследований.

В четвертом разделе приведены установленные экспериментально результаты влияния параметров ОТП на коэффициент трения и температуру в поверхностном слое на разных временных этапах закалки, на изменение микротвердости по глубине и шероховатость поверхности.

Для реализации этих задач на базе динамометра АЦД2С-05/1И разработано специальное трибометрическое устройство.

Установлено изменение коэффициента трения рис. 4.4 на стадии разогрева материала до требуемой температуры закалки от частоты вращения инструмента, то есть, от тепловложения (диапазон μ = 0,55 – 0,25), а шероховатость поверхности при этом изменяется от 24 до 2 мкм по мере уменьшения подачи (рис. 4.22).

Температура определялась с помощью термопар, установленных на расстоянии 0,5 мм от поверхности обработки ОТП.

Построена термокинетическая зависимость охлаждения от подачи (рис. 4.14), которая практически идентична, не отличима от таковой, рассчитанной теоретически в диапазоне подач 50-150 мм/мин (рис. 3.11), а при пониженной подаче 25 мм/мин, скорость охлаждения по-видимому недостаточна – закалки может и не быть.

Развернутые выводы по данному разделу позволяют констатировать факт, что удалось определить оптимальные режимы ОТП, а именно нормальную силу, частоту вращения, а также подачу инструмента.

Пятая глава посвящена изучению формирования твердости в кольцевом участке стали 20Х13, полученной в результате ОТП по веерной траектории движения инструмента (интегральная характеристика), структуры, шероховатости. Для обработки объектов с пониженной толщиной (≤ 15 мм), разработано специальное устройство, охлаждающее обрабатываемое изделие с тыльной стороны (рис. 5.5) для стабилизации температуры объемного нагрева заготовки.

Исследовано изменение индекса равномерности микротвердости на глубинах от 200 до 600 мкм по ширине кольцевых участков после обработки кольцевого участка поверхности с устройством охлаждения (рис. 5.4). Рисунок 5.7 иллюстрирует роль охлаждения тыльной стороны заготовки в формировании твердости, а именно: без охлаждения твердость не превышает 30 ед. HRc, индекс равномерности микротвердости CU на рабочей поверхности на глубине до 400 мкм высок (1,0-0,8), а на поверхности ≤ 100 мкм близок к 1, это именно тот результат, к которому стремится диссертант (см. рис. 5.10).

Доказательно впервые подтверждено реальное преимущество ОТП кольцевого участка, выполненного по веерной траектории движения инструмента, что решает проблему неоднородности твердости обрабатываемой поверхности.

Исследования микроструктуры показало, что исходный феррит стали 20Х13 после ОТП на глубине до 1 мм трансформируется частично в мартенсит. При реализации метода ПТО в структуре наблюдаются признаки ВТМО – высокотемпературной термомеханической обработки (рис. 5.4, 5.16).

В заключительной части данного раздела приведен полный цикл обработки клина задвижки DN 80 мм PN 16 МПа, а именно: после ОТП (n = 4000об/мин; F_H = 3500 Н, подача $f_и$ = 100 мм/мин) проведено тонкое

фрезерование рабочего участка поверхности на глубину 45 мкм, достигнута шероховатость Ra = 0,4 мкм, далее притирка алмазной пастой, затем промывка уайт-спиритом и просушка сжатым воздухом.

После проведения гидравлических испытаний задвижки было исследовано изменение шероховатости на профилометре WYKO NT 1100 и определены зоны повышенного износа, с целью его предотвращения в дальнейшем. Новая технология обеспечила 3240 циклов работы задвижки «открыто-закрыто» при норме 3000 до появления протечек.

Анализируя выполненное исследование в целом можно отметить, что форма и порядок изложения не традиционны, нет отдельного раздела «Материалы и методы исследования», фрагменты литературного обзора, например, иллюстрации встречаются в последующих главах.

С другой стороны, такая подача материала позволила сконцентрировать внимание на сложные многофакторные процессы теоретического и экспериментального исследования ОТП.

При решении поставленных задач использовано самое современное оборудование, измерительные приборы и инструменты последнего поколения, разработан и изготовлен ряд приспособлений и устройств, необходимых для прецизионных, как правило, измерений и исследований.

Это еще обусловлено тем, что данный способ FSP, аббревиатуру которого можно перевести и как ПВТМО, исследован и применен в России впервые, это уже предопределяет её *научную новизну и актуальность*, а успешная производственная проверка определяют *практическую значимость и перспективы* развития этой новой технологии.

Достоверность полученных результатов в ряде случаев оценена аналитическими методами, а также использованием аттестованного оборудования и приборов.

Не смотря на вышеизложенное по работе можно сделать замечания и задать вопросы:

1. В работе часто упоминается термин диффузия углерода, используется термин «фронт диффузии», «глубина диффузионного фронта», но нет собственно каких-либо экспериментальных оценок этого явления в конкретных случаях.

2. Для крепления инструмента разработана и использована оригинальная инструментальная державка (рис. 1.16), специальное трибометрическое устройство, устройство, позволяющее охлаждать

обрабатываемое изделие с тыльной стороны (рис. 5.5), однако нет описания, пояснений их работы.

3. При моделировании и реализации процессов ОТП, одним из ключевых параметров является коэффициент трения, он ответственен за теплообразование и зависит от температуры (см. рис. 4.4, стр. 85) и не зависит от оператора. Можно ли управлять в нужном направлении величиной коэффициента трения?

4. Исследована температурная зависимость плотности стали 20Х13, но как этот параметр может повлиять на что-либо?

Отмеченные недочеты не снижают *общей положительной оценки*. *Научная новизна работы несомненна*, это для России *пионерская* работа, в списке литературы не встречаются российские фамилии, кроме д.т.н. Кузнецова В.П. и его коллег. Остается вопрос, почему эта работа только сейчас осуществлена в России?

Выполненное исследование представляет собой *законченную научно-квалификационную работу*, соответствует паспорту специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроение), строго оформлена, хорошо опубликована, отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ», автор работы Воропаев Владимир Валерьевич вполне заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении).

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Потехин Борис Алексеевич
профессор кафедры «Технологические машины и технологии машиностроения», доктор технических наук
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Уральский государственный лесотехнический университет
620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37
тел.: 8-912-673-50-37; e-mail: pba-nn@yandex.ru

Подпись Потехина Б.А. заверяю
(ФИО)
Ведущий документовед
«16» 06 2021 г.
(ФИО)

_____ /Потехин Б.А./
«16» июня 2021 г.
г. Екатеринбург