

ОТЗЫВ

официального оппонента Швейкина Владимира Павловича на диссертационную работу Воропаева Владимира Валерьевича «Управление поверхностной закалкой кольцевых участков стали 20X13 при обработке трением с перемешиванием», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

Актуальность работы определяется необходимостью развития нового физико-механического процесса поверхностной закалки сталей в процессе обработки трением с перемешиванием сложных и прецизионных по геометрии участков и обеспечения равномерной твердости в пределах всего участка.

В настоящее время теоретических исследований в области управления поверхностной закалкой сталей трением в контакте вращающегося инструмента практически не существует. Отсутствуют сведения о совокупном влиянии параметров нормальной силы, коэффициента трения, скоростей вращения и подачи, а также траектории движения инструмента на термический цикл закалки и формирование заданной твердости и структуры в поверхностном слое сталей.

Для практической реализации оптимального управления процессом фрикционной поверхностной закалки кольцевых участков необходимо глубокое понимание взаимосвязи технологических параметров процесса с температурно-временными параметрами термического цикла при одно- и многопроходной обработке, что подробно рассмотрено в диссертационной работе. Предлагаемая технология является экологически чистой и может заменить операции наплавки с последующей термообработкой. Управление фрикционной поверхностной закалкой является многофакторной и многоэтапной задачей, решение которой весьма актуально для промышленного применения процесса обработки трением с перемешиванием.

Структура и основное содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5-ти 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 обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, показана степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи, представлены положения, выносимые на защиту, определены научная новизна, теоретическая и практическая

значимость, методология и методы исследования. Показаны средства и методы обеспечения достоверности и апробация полученных результатов, личный вклад соискателя, структура и объем диссертации.

В первом разделе диссертант представил глубокий аналитический обзор научной литературы, в котором проанализированы такие методы поверхностной закалки, как лазерная и плазменная, у которых схожее с методом фрикционной закалки воздействие тепловым пятном на обрабатываемый материал. Проанализированы параметры управления процессами и подходы к моделированию температурных полей, возникающих в обрабатываемом материале. Выявлено, что одной из основных проблем поверхностной закалки является обеспечение равномерной твердости при многопроходной обработке протяженных участков. Проведен системный обзор и анализ подходов к возможности реализации поверхностной закалки в процессе обработки конструкционных материалов трением с перемешиванием, который позволил четко сформулировать цель и задачи работы.

Второй раздел посвящен обоснованию выбора обрабатываемого и инструментального материалов и методов исследования процесса фрикционной закалки. Выбор обрабатываемого материала, стали 20X13, обоснован несколькими факторами: во-первых, данный материал является прямым аналогом стали AISI 420 и полученные диссертантом результаты могут быть сопоставлены с результатами исследований S. Dodds и B. Mahmoudi в области поверхностной закалки (стр. 14, 31); во-вторых, выбранная для исследования сталь имеет практическое применение при изготовлении запорных органов клиновой задвижки, уплотнительные поверхности которых имеют кольцевую форму. Диссертантом обоснован и выбор инструментального материала – мелкозернистого твердого сплава KMG303 фирмы ZCC СТ типа WC-Co, обладающего кратковременной тепловой стойкостью до температуры 1050 °С, что является крайне важным при закалке стали 20X13 с температурой нагрева 1000...1100 °С. Очень важно, что инструмент имеет простую геометрическую форму в виде цилиндра с плоским торцом и фаской. В качестве инструмента могут применяться отработавшие ресурс концевые фрезы. Разработана и представлена запатентованная конструкция державки инструмента, обеспечивающая задание нормальной силы до 4 кН и её поддержание в процессе обработки. Наибольший научный интерес представляют разработанные автором обобщенная модель и алгоритм решения многофакторной задачи управления термическим циклом поверхностной закалки на этапах предварительного разогрева, аустенизации и охлаждения стали 20X13 в процессе однопроходной обработки и при упрочнении

кольцевых участков с движением инструмента по концентрическим окружностям и веерной траектории.

Впервые научно обоснованы веерная траектория движения инструмента и способ поддержания стабильного температурного состояния материала за цикл обработки кольцевого участка путем охлаждения тыльной стороны заготовки.

Третий раздел посвящен конечно-элементному моделированию в пакете ANSYS WB 2019 R3. Моделирование позволило установить влияние технологических параметров процесса и коэффициента трения на изменение температуры в зоне контакта инструмента с поверхностью и по глубине заготовки на всех временных этапах термического цикла закалки при прямолинейном движении инструмента, а также при обработке кольцевого участка. Установлен оптимальный режим механического нагружения стали 20X13 (нормальная сила $F_H=3500$ Н и частота вращения инструмента $n=4000$ об/мин) для нагрева до температуры 1000...1100 °С. Определена оптимальная подача инструмента 100 мм/мин (стр. 80), которая обеспечивает требуемую для закалки температуры нагрева на глубине до 1,25 мм при движении инструмента. Установлено, что при коэффициенте трения $\mu=0,22$ скорость нагрева достигает 245 °С/с, а при $\mu=0,3$ – 500 °С/с. Моделирование закалки кольцевых участков стали 20X13 трением показало неэффективность применения траектории движения инструмента по концентрическим окружностям из-за проявления эффекта самоотпуска в зонах перекрытия дорожек трения. Впервые предложена веерная траектория, которая позволяет исключить самоотпуск и обеспечить равномерное упрочнение по ширине и глубине кольцевого участка поверхностного слоя. Представленные в работе конечно-элементные модели являются универсальными и могут быть использованы для реализации фрикционной закалки вращающимся инструментом других конструкционных сталей и сплавов.

В четвертом разделе приведены результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса обработки стали 20X13 на изменение коэффициента трения, температуры и микротвердости поверхностного слоя на этапе разогрева, а также аустенизации и охлаждения при однопроходной обработке.

Создан оригинальный измерительный комплекс для оценки величины коэффициента трения инструмента с поверхностью заготовки в процессе ОТП на этапе разогрева обрабатываемого материала и инструмента. Выявлено, что продолжительность разогрева в пределах от 4 до 15 с определяет стабилизацию величины коэффициента трения в контакте, а также глубину эрозионного износа поверхности. Проведены экспериментальные исследования взаимосвязи температуры поверхностного слоя стали 20X13 в контактной зоне инструмента и на глубине 0,5 мм при

подачах 175...25 мм/мин, которые подтвердили адекватность конечно-элементного моделирования процесса.

Исключительно качественный уровень экспериментальных исследований позволил установить, что в процессе обработки трением вращающимся инструментом с оптимальным режимом механического нагружения и подачи инструмента 100 мм/мин максимальная температура нагрева стали в контактной зоне достигает 1150 °С, а на глубине 0,5 мм – до 1000 °С. При этом время аустенизации, по данным экспериментальных исследований и моделирования, составляет, соответственно, 4,7 и 4,1 с, а скорость охлаждения 101,1...123,8 °С/с. Выявленные экспериментально температурно-временные параметры термического цикла подтверждают результаты моделирования и обеспечивают формирование в поверхностном слое стали 20X13 мартенситной структуры.

В пятом разделе представлены результаты экспериментальных исследований поверхностной закалки кольцевых участков поверхности шириной 18 мм в условиях движения инструмента по трем concentрическим окружностям с перекрытием 50 % предшествующей дорожки трения и по веерной траектории, выполненные с целью обоснования условий достижения равномерной микротвердости и мартенситной структуры упрочненного слоя, а также приведен пример реализации разработанной технологии при изготовлении клина задвижки.

Установлено, что траектория движения инструмента по concentрическим окружностям не может быть рекомендована, поскольку при пороговой микротвердости 500 HV_{0,05} индекс равномерности твердости *CU* по глубине слоя от 100 до 600 мкм изменяется от 0,5 до 0,3.

Установлено, что в пределах кольцевого участка шириной 17 мм величина твердости поверхностного слоя после обработки по веерной траектории без охлаждения изменяется в пределах 26...44 HRC, при охлаждении тыльной стороны заготовки с применением созданного устройства охлаждения (Приложение Е) достигает 42...49 HRC и распределена более равномерно по ширине кольцевой поверхности.

Выявлено, что после обработки по веерной траектории с охлаждением тыльной стороны заготовки индекс равномерности микротвердости *CU* для заданной пороговой величины 500 HV_{0,05}, соответствующей границе мартенситного превращения в пределах полной ширины обрабатываемого кольцевого участка 24,5 мм, составляет *CU*=0,70...0,81 и в пределах ширины 17 мм – 0,77...0,99.

Установлен переход в поверхностный слой на глубину до 10 мкм 0,46 At% вольфрама от нагретого инструмента, что связано с достижением температуры, близкой к температуре красностойкости применяемого твердого сплава, и пластической деформации в нем кобальтовой связи.

Возникает вопрос о применении новых инструментальных материалов, например, W-Re с более высокой температурой красностойкости.

Выполнена просвечивающая микроскопия двухсторонних фольг образца кольцевого участка после обработки по веерной траектории движения инструмента, результаты которой позволили установить, что на глубине 620 мкм формируется дисперсная мартенситная структура с признаками высокой деформации.

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

Теоретическая значимость работы. Результаты диссертационной работы вносят существенный вклад в развитие материаловедческих основ поверхностной закалки в процессе обработки трением с перемешиванием. На основе разработанного теоретического подхода к управлению термическим циклом поверхностной закалки и применения полученных результатов моделирования и экспериментальных исследований могут быть определены оптимальные параметры термомеханического фрикционного воздействия твердосплавного инструмента с плоским торцом на обрабатываемый материал, глубина упрочнения и равномерность твердости в ограниченном кольцевом участке.

Практическая значимость. Эффективность применения разработанного соискателем физико-механического процесса фрикционной поверхностной закалки при упрочнении кольцевых участков уплотнительных поверхностей запорных органов трубопроводной арматуры позволяет исключить дорогостоящие технологии наплавки. Полученные результаты могут быть использованы на предприятиях арматуростроения и нефтегазового машиностроения, в подшипниковой промышленности.

Результаты исследований автора прошли апробацию на 5-ти конференциях, опубликованы в 11-ти работах, из них 5 статей в журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ в том числе 3 статьи в журналах, индексируемых в базе данных Scopus, получено 2 патента РФ на изобретение и полезную модель.

По работе имеются следующие вопросы:

1. Можно ли сопоставить экспериментально измеренный коэффициент трения на этапе разогрева обрабатываемого материала с коэффициентом трения при движении инструмента?

2. На основании каких соображений выбрана скорость интегрального теплового пятна 100 мм/мин и реальная подача 588 мм/мин при движении инструмента по верной траектории?
3. Какие режимные параметры в наибольшей степени влияют на толщину закаленного слоя?
4. Какова стойкость твердосплавного инструмента и какие основные виды его разрушения могут происходить в процессе ОТП?

В качестве замечания можно отметить ошибку при оформлении рисунка 4.19 на стр. 96 диссертации и соответствующий рисунок 16 в автореферате. Непонятно, какой величине коэффициента трения ($\mu=0,26$ или $\mu=0,24$) соответствует кривая 4 расчетной зависимости глубины диффузии углерода h_D от подачи. Приведенное замечание не снижает общего высокого уровня оформления работы, которая написана грамотным научно-техническим языком.

Заключение

Считаю диссертационную работу «Управление поверхностной закалкой кольцевых участков стали 20X13 при обработке трением с перемешиванием» соответствующей всем требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ. Диссертация Воропаева Владимира Валерьевича является завершённой научно-квалификационной работой, обладает научной новизной и практической значимостью, по своим цели, задачам и содержанию полностью соответствует паспорту специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении). Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Считаю, что автор диссертационной работы Воропаев Владимир Валерьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

Заместитель директора по научной работе
ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН,
доктор технических наук, доцент

Швейкин Владимир Павлович

17 июня 2021г.

Почтовый адрес: 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34

E-mail: shveikin60@mail.ru

Тел. 8(343) 374-47-25



Я, Швейкин Владимир Павлович подтверждаю
секретарь ИМАШ УрО РАН
А. М. Поголоцкая