



УТВЕРЖДАЮ
Ректор ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
Исследовательский технический университет»,
доктор технических наук
М.В. Корняков

« 08 » 06 2023г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»**

Диссертация Хо Минь Куан «Повышение качества нежестких цилиндрических деталей маятниковым поверхностным пластическим деформированием» выполнена на кафедре материаловедения, сварочных и аддитивных технологий.

В 2020 году Хо Минь Куан окончил с отличием обучение по специальности 23.05.02 «Транспортные средства специального назначения» с присвоением квалификации «инженер» в Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева министерства обороны Российской Федерации (филиал в г. Омск). и в 2020 г. поступил на обучение в очную аспирантуру Иркутского национального исследовательского технического университета на специальность 2.5.6 «Технология машиностроения».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов по истории и философии науки и иностранному языку выдано в 2021 году, справка о сдаче кандидатского экзамена по специальности – в 2023 году Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Научный руководитель – Зайдес Семен Азикович, заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

На объединенном заседании кафедр присутствовали:

Кафедра материаловедения, сварочных и аддитивных технологий:

1. Балановский Андрей Евгеньевич – к.т.н., заведующий кафедрой;
2. Зайдес Семен Азикович – д.т.н., профессор, заслуженный работник высшей школы РФ;

3. Вулых Николай Валерьевич – к.т.н., доцент;
4. Рыжиков Игорь Николаевич – к.т.н., доцент;
5. Тютрин Николай Орестович – к.т.н., доцент;
6. Саламатов Виктор Иванович – к.т.н., доцент;
7. Гусева Елена Александровна – к.т.н., доцент;
8. Астафьева Наталья Анатольевна – к.т.н., доцент;
9. Константинова Мария Васильевна – к.х.н., доцент;
10. Гречнева Мария Васильевна – к.т.н., доцент;
11. Нгуен Хыу Хай – аспирант кафедры МС и АТ;

Кафедра «Технология и оборудование машиностроительных производств»:

11. Кольцов Владимир Петрович – д.т.н., профессор;
12. Свинин Валерий Михайлович – д.т.н., профессор;
13. Пашков Андрей Евгеньевич – д.т.н., профессор; заведующий кафедрой;
14. Пономарев Борис Борисович – д.т.н., профессор;

Кафедра «Конструирования и стандартизации в машиностроении»:

15. Димов Юрий Владимирович – д.т.н., профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Представленная диссертация Хо Минь Куан обобщает самостоятельные исследования автора и является завершенным научным трудом, выполненным по специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения».

Актуальность и цель темы диссертационного исследования. В настоящее время особо остро встал вопрос о импортозамещении выпускаемой продукции. От ряда металлообрабатывающих отраслей потребовалось создание новых технологий, направленных на повышение качества деталей машин. В машиностроительном производстве поверхностное пластическое деформирование (ППД) является одним из наиболее эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки, который применяется для повышения качества и улучшения физико-механических свойств поверхности деталей.

При обработке нежестких цилиндрических деталей традиционные способы ППД исчерпали свои технологические возможности, так как длинномерные цилиндрические заготовки обладает малой изгибной жесткостью, при этом возникают определенные трудности по обеспечению заданного качества изделия, точности и производительности обработки.

В настоящее время одним из основных направлений совершенствования существующих способов упрочнения является разработка и изучение новых кинематик деформирующего инструмента, которые позволяют интенсифицировать напряженное состояние в очаге деформации, при этом повышаются механические

свойства и эксплуатационные характеристики поверхностного слоя упрочненных деталей. Техническая идея по повышению напряженного состояния в очаге деформации заключается в новой кинематике рабочего инструмента, основанного на маятниковом движении кругового сектора, которая приводит к повышению механических свойств материала.

Актуальность работы заключается в разработке нового метода ППД, базирующегося на параллельном комбинировании в едином процессе различных принципов механического взаимодействия (процесс качения и скольжения) деформирующего инструмента с обрабатываемой деталью, который обеспечивает интенсификацию напряженного состояния в очаге деформации, позволяет получить необходимую степень упрочнения при постоянном радиальном натяге и высокое качество поверхностного слоя упрочненных деталей.

Целью диссертационного исследования является повышение качества поверхностного слоя деталей машин путем интенсификации напряженного состояния в очаге деформации маятниковым поверхностным пластическим деформированием.

Основные научные результаты:

На основании проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Предложена новая кинематика отделочно-упрочняющей обработки с разработкой нового способа маятникового ППД, позволяющего обеспечить повышение напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в готовых деталях, улучшить механические, эксплуатационные свойства и геометрические характеристики микропрофиля обработанных поверхностей. Способ защищен патентами РФ (№ 2753807 и № 2757643).

2. Построена конечно-элементная модель маятникового ППД, позволяющая установить влияние технологических параметров предлагаемого способа упрочнения на показатели напряженно-деформированного состояния деталей. Установлено, что с уменьшением секториального и рабочего радиусов инструмента интенсивность временных и остаточных напряжений повышается на 30 – 40 %. Более значимые параметры, оказывающие существенное влияние на повышение интенсивности временных и остаточных напряжений, являются величина натяга и частота вращения заготовки. Установлена прямая зависимость интенсивности временных и остаточных напряжений от предела текучести материала при обработке некоторых черных и цветных металлов маятниковом ППД.

3. При упрочнении маятниковым ППД деталей из стали 45 даже с большой величиной натяга формируются максимальные растягивающие напряжения в

вершинах упругопластических волн (около 45–60 МПа), величина которых в 10–13 раз меньше предела прочности материала. Результаты определения величины подъема металла показали, что при упрочнении заготовок диаметрами от 10 до 20 мм подъем металла (Δ) можно сопоставить с точностью диаметральных размеров по 2–3 качеству, а при обработке заготовок диаметрами от 40 до 60 мм - с точностью по 1 качеству.

4. Результаты моделирования термопроцесса показали, что при маятниковом ППД в очаге деформации формируется максимальная температура, значение которой изменяется от 75 до 130°C. Установлена критическая температура для деталей из стали 45 (135-150°C), превышение которой приводит к снижению интенсивности сжимающих остаточных напряжений. Расхождение результатов определения температуры в зоне контакта, полученных численным расчетом моделирования и экспериментальным определением не превышает 15%. С использованием технологической смазки в очаге деформации обеспечивается благоприятный тепловой режим, изменение которого находится в интервале 38-41 С°.

5. Результатами экспериментальных исследований установлено, что после маятникового ППД на поверхности заготовки формируются достаточно большие сжимающие остаточные напряжения (около 340 МПа) по сравнению с традиционными способами ППД. Полученные положительные результаты подтверждают техническую идею проведенных исследований по повышению напряженного состояния в очаге деформации за счет усложнения кинематики процесса упрочнения.

6. Экспериментально установлено влияние технологических параметров ППД на показатели качества и эксплуатационные характеристики упрочненных деталей. Маятниковое ППД способствует повышению механических свойств поверхностного слоя упрочненных деталей, при этом твердость увеличивается в 9-12%, микротвердость упрочненного слоя увеличивается в 1,5-1,6 раза. Шероховатость и волнистость поверхности после маятникового ППД снижаются в 4-8 раз. Отклонение от круглости обработанных деталей уменьшается в 2,1-3,7 раза. Коррозионная стойкость упрочненных деталей повышается на 25-35%.

7. После обработки маятниковым ППД наблюдается существенное уменьшение средних размеров зерен, причем степень уменьшения размеров зерен в поперечном сечении составляет 55-75%, а в продольном – 45-65%. Средние размеры зерен составляют 15-30 мкм в поперечном сечении и 25-40 мкм в продольном. Искажение формы зерен после упрочнения увеличивается на 50-60%. Глубина наклепа находится в интервале 0,81-1,1 мм. Плотность дислокаций кристалличе-

ских решеток после маятникового ППД повышается в 2,2 – 2,5 раза (около $2,2 \cdot 10^8$ см⁻²).

8. Спроектировано и изготовлено устройство для реализации процесса маятникового ППД секториальным рабочим инструментом, позволяющее увеличить число факторов, влияющих на характер кинематического процесса упрочнения и расширить возможности по усилению напряженно-деформированного состояния обрабатываемой поверхности по сравнению со традиционными способами ППД. Устройство защищено патентами РФ (№ 2751947 и 2763061).

9. В результате множественной регрессии определены оптимальные режимы маятникового ППД, обеспечивающие получение наилучших показателей качества поверхности, причем оптимальные режимы упрочнения для геометрических и эксплуатационных показателей следующие: $t = 0,1$ мм; $s = 0,07$ мм/об; $n_{\text{заг}} = 80$ об/мин; $n_{\text{ин}} = 60$ дв.х/мин; $\alpha = 15^\circ$. Для получения максимальных значений показателей НДС и механических характеристик установлены следующие режимы: $t = 0,15$ мм; $s = 0,11$ мм/об; $n_{\text{заг}} = 150$ об/мин; $n_{\text{ин}} = 120$ дв.х/мин; $\alpha = 30^\circ$.

10. Сопоставлена эффективность упрочнения маятниковым ППД в повышении напряженного состояния в очаге деформации с традиционными способами ППД (по схеме качения и скольжения). Выявлено, что при одинаковой величине радиального натяга временные напряжения в случае маятникового ППД формируются значительно большие, чем в случае упрочнения по схеме качения и скольжения соответственно на 35% и 25%. При этом глубина наклепа при маятниковом ППД составляет около 1,4 мм, которое выше, чем упрочнения по схеме качения и скольжения соответственно на 50 и 30%.

Научная новизна работы:

1. Впервые теоретически обоснована возможность создания более сложной кинематической схемы упрочнения поверхностного слоя секториальным рабочим инструментом для интенсификации напряженного состояния очага деформации, базирующейся на комбинации двух процессов: качения и скольжения рабочего инструмента. (п. 4 паспорта специальности 2.5.6).

2. Создана конечно-элементная модель маятникового ППД, позволяющая выполнять численные расчеты показателей напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и упрочненного поверхностного слоя. Выявлены законы изменения внеконтактной деформации, а также степени упругой разгрузки металла после окончания упрочнения. (п. 3 и 4 паспорта специальности 2.5.6).

3. С использованием шумов Баркгаузена проведены экспериментальные исследования по определению влияния маятникового ППД на формирование сжимающих остаточных напряжений в цилиндрических деталях из стали 45.

Установлена математическая зависимость механических напряжений от амплитуды шумов Баркгаузена. (п. 7 паспорта специальности 2.5.6).

4. Установлены связи между результатами измерения микротвердости и средними размерами зерна, между шероховатостью и коррозионной стойкостью деталей после маятникового ППД. Разработаны модели регрессии для исследуемых показателей качества упрочненных деталей маятниковым ППД. (п. 7 паспорта специальности 2.5.6).

Конкретное личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации. Предложен новый способ обработки маложестких цилиндрических деталей ППД, разработана конечно-элементная модель процесса маятникового ППД с применением секториального рабочего инструмента, спроектировано и изготовлено устройство для маятникового ППД цилиндрических деталей типа валов и осей, выполнены экспериментальные исследования, проведен анализ и обобщение полученных результатов, сформулированы выводы и положения, выносимые на защиту.

Достоверность результатов обеспечена обоснованным изучением достаточного объема научной литературы, использованием современных средств и методик проведения исследований, и подтверждается согласованностью теоретических выводов с результатами их моделирования и реальной экспериментальной проверки.

Практическая значимость:

1. Разработана технология маятникового поверхностного пластического деформирования с применением секториального рабочего инструмента, обеспечивающая повышение качества нежестких цилиндрических деталей машин типа валов и осей. Определены основные технологические параметры и режимы обработки, обеспечивающие эффективность процесса упрочнения маятниковым ППД.

2. Разработаны конструкции технологических устройств для реализации маятникового ППД.

3. Разработаны технологические рекомендации для внедрения маятникового ППД на производстве.

4. Результаты диссертационной работы рекомендованы для использования в учебном процессе при проведении занятий по дисциплинам «Технология машиностроения», «Отделочно-упрочняющая обработка ППД», а также будут полезны аспирантам и научным работникам, занимающихся вопросами ППД.

Внедрение научных результатов:

Результаты диссертационного исследования по теме «Повышение качества нежестких цилиндрических деталей маятниковым поверхностным пластическим

деформированием» выполненного на кафедре материаловедения, сварочных и аддитивных технологий внедрены в учебном процессе по направлению 15.03.01 – Машиностроение на основании решения кафедры.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения»:

Диссертация соответствует пунктам области исследования №3 (Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения), №4 (Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска), №7 (Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин).

Полнота изложения диссертации в работах, опубликованных автором:

Основные результаты диссертационной работы полностью отражены в следующих научных работах автора:

Статьи в изданиях, включенных в международную базу Scopus:

1. Zaides S.A., **Ho Minh Quan**. Pendulum Surface Plastic Deformation of Cylindrical Blanks // *Steel in Translation*, 2022, 52(5), pp. 487–494.
2. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование цилиндрических заготовок // *Izvestlya Ferrous Metallurgy*, 2022, 65(5), pp. 344-353.
3. Zaides S.A., **Ho Minh Quan**. Non-contact deformation during pendulum surface plastic deformation of structural steel // *Chernye Metally*, 2022(9), pp. 55–60.
4. Zaides S.A., **Ho Minh Quan**. Stress–Strain State of Components Hardened by Plastic Deformation under Cyclic Loading // *Russian Engineering Research*, 2022, Vol. 42, No. 11, pp. 1125-1132.
5. Zaides S.A., **Ho Minh Quan**. Evaluation of the effect of thermal fields on the strain stress state of parts in the case of pendulum surface plastic deformation // *Steel in Translation*, 2022, Vol. 52, No. 9, pp. 885-890.
6. Zaides S.A., **Ho Minh Quan**. Optimization of modes of pendular surface plastic deformation for intensification of the stress-strain state of carbon steel parts // *Chernye Metally*, 2023(1), pp. 58-66.
7. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Степень упрочнения и глубина наклепа при маятниковом поверхностном пластическом деформировании углеродистой стали // *Izvestlya Ferrous Metallurgy*. 2023, 66(3), pp. 272-282.

В журналах из рекомендуемого перечня ВАК РФ:

8. Zaides S.A., **Ho Minh Quan**, Mai Duc Nghia. Effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface // *Ipolytech Journal* // 2021. Т. 25. № 6. С. 696-707.

9. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Определение напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей при круговой осцилляции секториального рабочего инструмента // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2022, Т18, №1(205), С.6-13.

10. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Зависимость напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей от маятникового воздействия секториального рабочего инструмента// *Технология металлов*. 2022, №6, С.24-34.

11. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Исследование напряженно-деформированного состояния деталей, упрочненных пластическим деформированием при циклическом нагружении// *Вестник машиностроения*, 2022, №8, С.28-35.

12. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Оценка влияния тепловых полей на НДС деталей при маятниковом поверхностном пластическом деформировании // *Сталь*, 2022, №9, С.32-36.

13. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**., Лэ Х.К. Отклонение от круглости цилиндрических деталей при маятниковом поверхностном пластическом деформировании // *Упрочняющие технологии и покрытия* // 2023, Т18, №3(219), С.105-110.

14. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Оценка величины упругой разгрузки при маятниковом поверхностном пластическом деформировании // *Наукоемкие технологии в машиностроении*, 2023, №2(140), С.8-14.

15. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Определение температуры в зоне контакта при маятниковом поверхностном пластическом деформировании конструкционной стали // *Технология металлов*, 2023, №4. С.9-16.

16. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Определение волнистости цилиндрических деталей при маятниковом поверхностном пластическом деформировании // *Технология металлов* // 2023, №5. С.8-16.

17. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Влияние маятникового поверхностного пластического деформирования на коррозионную стойкость деталей машин // *Известия Вузов. Машиностроение*. 2023, №7(760). С.54-63.

Патент РФ на изобретение:

18. Патент № 2751947, Российская Федерация, МПК-В24В 39/04. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. № 2021103014; заявл. 09.02.2021, опубл. 21.07.2021. Бюл. № 21.

19. Патент № 2753807, Российская Федерация, МПК-В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования цилиндрических деталей / Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. № 2021102252; заявл. 02.02.2021, опубл. 23.08.2021. Бюл. № 24.

20. Патент № 2757643, Российская Федерация, МПК-В24В 39/04. Способ поверхностного пластического деформирования наружной поверхности детали в виде тела вращения / Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. № 2021102484; заявл. 04.02.2021, опубл. 19.10.2021. Бюл. № 29.

21. Патент № 2763061, Российская Федерация, МПК-В24В 39/04. Устройство для образования маятникового движения рабочего инструмента / Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. № 2021116866; заявл. 10.06.2021, опубл. 27.12.2021. Бюл. № 36.

Статьи в прочих изданиях:

22. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Определение напряженного состояния при воздействии секториального радиуса рабочего инструмента на цилиндрическую поверхность // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XXVIII Междунар. научно-техн. конф. (г. Севастополь, 13-19 сентября 2021 г.). – Севастополь: Изд-во ДНТУ, 2021. – №28. – С. 195-204.

23. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Маятниковое поверхностное пластическое деформирование при отделочно-упрочняющей обработке цилиндрических деталей транспортной техники // Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология: сборник трудов III Междунар. научно-практич. конф. (г. Якутск, 16 апреля 2021 г.) – Якутск: Изд-во ЯИВТ, 2021. – С.154-159.

24. **Хо Минь Куан**, Зайдес С.А. Определение напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей при маятниковом воздействии секториального рабочего инструмента // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы XI Всерос. научно-практич. конф. с международным участием (г. Иркутск, 21–23 октября 2022 г.). – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2021. – С. 69-82.

25. **Хо Минь Куан**. Особенности моделирования процесса поверхностного пластического деформирования цилиндрических деталей с помощью компьютерной программы ANSYS // Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции: сборник трудов II Всерос. научно-практич. конф. (г. Омск, 26 октября 2021 г.) – Омск Изд-во ОИВТ, 2021. – Ч. 1. – С.178-183.

26. Зайдес С.А., **Хо Минь Куан**. Влияние геометрии секториального рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя цилиндрических деталей // Прогрессивные технологии и системы машиностроения, г. Донецк, 2022, №1(76), С.19-28.

27. Зайдес С.А., Хо Минь Куан. Определение величины подъема металла при маятниковом поверхностном пластическом деформировании // Инновации в машиностроении: материалы доклада XIII Междунар. научно-практич. конф. (г. Барнаул, 23-25 ноября 2022 г.) – Якутск: Изд-во АлГТУ, 2022. – С.154-159. г. Барнаул, 2022, С. 223-229.

28. Зайдес С.А., Хо Минь Куан. Механические свойства поверхностного слоя при маятниковом поверхностном пластическом деформировании // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющих и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара технологов - машиностроителей, (г. Ростов-на-Дону, 28 февраля 2023 г.) – Ростов-на-Дону: Изд-во Донской ГТУ, 2023. – С.46-51.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным в п. 9 «Положение о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация Хо Минь Куан, выполненная на тему «Повышение качества нежестких цилиндрических деталей маятниковым поверхностным пластическим деформированием» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения».

Заключение принято на объединенном заседании кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий 08.06.2023. Результаты голосования за предоставления диссертации к защите – единогласное.

Заведующий кафедрой МС и АТ
кандидат техн. наук, доцент

 А.Е. Балановский

Научный руководитель
доктор тех. наук, профессор

 С.А. Зайдес

