

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу **Нгуен Хыу Хай**  
**«Повышение эффективности упрочнения цилиндрических  
деталей машин реверсивным выглаживанием»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.5.6. Технология машиностроения

### **Актуальность работы**

Среди большого многообразия деталей машин свыше 30 % занимают тела вращения, качество поверхностного слоя которых определяет ресурс изделий и оборудования машиностроения. Одним из способов повышения качества поверхности деталей машин является применение поверхностного пластического деформирования (ППД). Развитие методов поверхностного пластического деформирования деталей в процессе механической обработки является актуальным в долгосрочной перспективе.

Несмотря на работы ряда исследователей, посвященные упрочнению поверхностей стальных валов выглаживанием скользящим индентором различной конструкции, диссертационная работа Нгуен Хыу Хай является оригинальной в части совершенствования технологического процесса за счет применения принципиально новой кинематики движения инструмента и направлена на увеличение зоны контакта и измельчение структуры обрабатываемого материала путем реверсивного качательного движения одно- или двухрадиусного ролика без увеличения силы выглаживания.

### **Структура диссертации**

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, библиографический список, включающий 157 источников. Работа изложена на 196 страницах машинописного текста, включающих 11 таблиц, 98 рисунков и 4 приложения.

**Во введении** автор приводит обоснование необходимости совершенствования существующих технологических процессов выглаживания валов в

процессе механической обработки за счет применения дополнительного реверсивного (качательного) движения скользящего одно- или двухрадиусного тороидального ролика по обрабатываемой поверхности.

**В первой главе** содержится критический обзор научной литературы по тематике и проблемам проводимого исследования. Выполнен анализ большого количества литературных источников (порядка 118), отражающих современное состояние технологий упрочнения поверхностей стальных деталей различными инструментами и кинематикой процессов ППД. Кроме того, частично проанализированы методы упрочнения металлов за счет измельчения структуры до ультрамелкозернистого и наноструктурного состояния интенсивной пластической деформацией. Также соискателем проводится анализ развития методов моделирования и экспериментальных методов исследований напряженно-деформируемого состояния поверхностного слоя при ППД. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияния кинематики реверсивного выглаживания и геометрии рабочего инструмента на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя вала из стали 45.

Исследование выполнено с применением конечно-элементного моделирования процесса реверсивного выглаживания в программном пакете ANSYS Workbench. Приведены данные о параметрах и диаграмме деформирования материала, выбран тип контакта абсолютно жесткого инструмента и поверхности детали (*Frictional*) с коэффициентом трения, равным 0,1. Обосновано разбиение геометрической модели на конечные элементы и принята тетраэдрическая форма сетки вала. Обобщенно представлены граничные условия моделирования процесса, а также настройки решателей и процедуры расчета и анализа результатов расчетов деформаций и изменения напряжений во времени и по глубине упрочненного слоя. Приведена зависимость для определения остаточных напряжений в цилиндрическом образце по величинам главных компонентов вдоль трех осей.

Далее на сорока страницах текста приводятся результаты конечно-элементного моделирования процесса реверсивного выглаживания одно- и двухрадиусным роликом. Анализируется изменение интенсивности максимальных временных и остаточных напряжений при трех кинематических схемах скольжения одно- и двухрадиусного ролика, а также распределение пластической деформации по глубине слоя.

Рассмотрено влияние продольной подачи, частоты вращения заготовки и радиального натяга реверсивного выглаживания на интенсивность временных  $\sigma_{вр}$  и остаточных  $\sigma_{ост}$  напряжений. Установлено, что изменение подачи в пределах 0,1...0,25 мм/об, частоты вращения шпинделя от 60 до 240 об/мин и натяга от 0,025 до 0,2 мм не приводит к существенному изменению интенсивности напряжений  $\sigma_{вр}$  и  $\sigma_{ост}$ . Показано, что влияние реверсивной частоты поворота двухрадиусного ролика в пределах 60...280 дв. ходов/мин также практически не приводит к изменению  $\sigma_i^{вр}$  и  $\sigma_i^{ост}$ .

Представлены результаты исследования «упругопластических волн» деформируемого материала при конечно-элементном моделировании реверсивного выглаживания. Выявлено, что наплыв материала возникает в направлении продольной подачи при ее изменении только в пределах 0,1...0,3 мм/об. Аналогичный эффект напыла (упругопластической волны) имеет место при увеличении частоты поворота скользящего ролика только от 60 до 180 об/мин. Следует отметить и тот факт, что угол поворота ролика  $|\alpha_p|=15^\circ$  имеет наименьшее влияние на величину упругопластической волны в направлении продольной подачи.

Методом конечно-элементного моделирования выполнен комплекс исследований взаимосвязи контактной температуры с технологическими параметрами процесса. Диапазон изменения температуры составляет 80...200 °С. Сформулированы шесть выводов по данной главе, которые не в полной мере отражают результаты конечно-элементного моделирования.

**Третья глава** посвящена экспериментальной оценке качества цилиндрических деталей, упрочненных реверсивным выглаживанием. Соискателем создано уникальное устройство для реализации реверсивного жесткого выглаживания двухрадиусным роликом. Представлен выбор методик и измерительного оборудования для оценки шумов Баркгаузена, микротвердости, шероховатости, волнистости, микроструктуры упрочненных поверхностей и температуры в зоне контакта рабочего инструмента с заготовкой. Однако возникают вопросы по выбору методики установления корреляционной зависимости расчетных напряжений при изгибе и амплитуды шума (МП), измеряемого прибором Rollscan 300. Во-первых, поверхностный слой в процессе реверсивного выглаживания не испытывает изгиб. Во-вторых, для примене-

ния используемого прибора необходим плоский образец размером не менее 10x10 мм.

Также не обоснована методика измерения температуры в зоне контакта рабочего инструмента и заготовки с применением тепловизора FLIR серии SC7000. Фактически с помощью тепловизора можно измерять температуру на открытой поверхности после обработки и исключения влияния СОТС и практически не представляется возможным в контактной зоне. Это фактически и показано на стр. 142 диссертации. Контактную температуру скользящего индентора можно измерить, например, методом сминаемой термопары.

Далее в третьей главе приведены профилограммы шероховатости исходной и обработанных реверсивным выглаживанием поверхностей. В результате обработки на оптимальном режиме реверсивного выглаживания (угол поворота ролика  $\pm 15^\circ$ , натяг 0,075 мм, продольная подача 0,075 мм/об и частота вращения от 60 до 120 об/мин) достигнута средняя величина  $Ra$  от 0,5 до 1,33 мкм.

На стр. 118 приведены зависимости параметров волнистости  $S_w$  и  $W_z$  от продольной подачи  $S_{пр}$ , скорости поворота инструмента  $n_z$  и натяга после реверсивного выглаживания, которые изменяются в пределах от 600 до 1100 мкм и  $S_w$  – от 750 до 1300 мкм. Весьма значительные величины  $W_z$  и  $S_w$  при обработке детали длиной 230 мм безусловно связаны с используемой схемой жесткого выглаживания.

Представлены зависимости сжимающих остаточных напряжений от начального угла установки и амплитуды угла и частоты реверсивного вращения инструмента. Показано, что для получения максимальных сжимающих  $\sigma_{ост}$  должна быть минимальная подача 0,07...0,10 мм/об и максимально возможные для устройства реверсивного выглаживания величина натяга 0,25...0,28 мм, частота поворота инструмента 250...300 двойных ходов в минуту при начальном угле установки  $\alpha_n=90^\circ$  и угле реверса, равном  $\pm 55^\circ$ ... $\pm 60^\circ$ , что значительно больше угла  $15^\circ$ , который оптимален для обеспечения параметров качества поверхности.

На страницах 124-131 диссертации представлены результаты исследования взаимосвязи твердости ( $HRB$ ), микротвердости ( $HV$ ) и степени упрочнения  $CH$  поверхностного слоя и режимов реверсивного выглаживания слоя.

Выявлено, что уменьшение продольной подачи от 0,28 до 0,08 мм/об и увеличения частоты вращения заготовки с 60 до 300 мм/об и величины радиального натяга с 0,08 до 0,28 мм приводят к повышению микротвердости HV поверхностного слоя до 30,9 %. При этом непонятно использование термина «интенсивно деформированный слой» (глубина 140-150 мкм, микротвердость 450-470 HV). Известно, что пластическая деформация считается интенсивной при достижении степени  $\epsilon_{ист} \geq 1$ . Степень пластической деформации соискателем не определялась.

На приведенных графиках зависимостей микротвердости не указано усилие вдавливания пирамидки Виккерса.

В работе представлены также круглограммы исходной и упрочненной поверхности образца. Установлено, что минимальное отклонение от круглости цилиндрического образца достигается при величине натяга в пределах 0,07...0,1 мм. Однако при данном натяге упрочнения поверхностного слоя, согласно представленным ранее результатам, практически не будет.

Важнейшим доказательством упрочнения поверхностного слоя стали 45 реверсивным выглаживанием является выявление соискателем формирования мелкодисперсной структуры. Для сопоставления размеров зерен с микротвердостью поверхностного слоя были проведены измерения с помощью металлографического микроскопа МЕТ-2. Средний размер зерен в поверхностном слое образца на глубине 1,7 мм составил около 41,5 мкм с четко выраженными границами. После развития ротационно-сдвигового механизма деформации в результате реверсивного движения инструмента в поверхностном слое толщиной 140...150 мкм средний размер зерен составил 1,4 мкм. Эффект измельчения структуры и повышения микротвердости отмечен и на большей глубине, вплоть до 670 мкм. Однако на приведенных в работе изображениях структуры (Таблицы 3.3 и 4.1) не показаны размерные шкалы и нет соответствия направлениям осей детали.

Установлена регрессионная зависимость микротвердости HV от величины размера диспергированных зерен. Построен ряд зависимостей размера зерен и их относительного изменения от технологических параметров процесса.

Установленная взаимосвязь величины сжимающих остаточных напряжений с температурой в очаге деформации и величиной радиального натяга

является спорной (рис. 3.41), поскольку тепловизором измерялась температура поверхности после прохода инструмента и обильно покрытая СОТС.

**В главе 4** выполнено сопоставление способов ППД, проведена оценка износо- и коррозионной стойкости упрочненных поверхностей и представлены рекомендации по назначению режимов процесса реверсивного выглаживания. Сопоставлены кинематические схемы обкатывания тороидальным двухрадиусным роликом с реверсивным выглаживанием двухрадиусным роликом и определены достижимые параметры шероховатости, микроструктуры и микротвердости.

Исследования износостойкости упрочненных поверхностей проводились с применением специальной установки. Показано, что линейный износ поверхностей после реверсивного выглаживания и обкатки вращающимся двухрадиусным роликом практически одинаков и за 90 часов не превышает 5...7 мкм. Аналогичный характер имеет и коррозионная стойкость поверхности в среде серной кислоты  $H_2SO_4$  с концентрациями 20, 40 и 60% по массе. Наименьшее значение интенсивности коррозии  $V_{cp}$ , г/м<sup>2</sup> после реверсивного выглаживания при натяге 0,075 мм и скорости поворота инструмента 120 дв. ходов/мин.

Приведены результаты численного расчета и экспериментальных исследований изгибной жесткости обрабатываемой детали и поля распределения интенсивности временных  $\sigma_i^{BP}$  и остаточных напряжений при обкатке тороидальным роликом и реверсивным выглаживанием. Для решения задачи определения наилучших режимов реверсивного выглаживания и построения трехмерных поверхностей отклика параметров качества поверхностного слоя на технологические параметры процесса использованы среда разработки Microsoft Visual Studio 2012 и язык программирования Python.

**В заключении** обобщены результаты проведения исследований и представлены основные девять научно-практических выводов.

### **Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Основная научная значимость работы заключается в выявлении закономерностей формирования параметров качества, микроструктуры и свойств поверхностного слоя конструкционной стали, получаемого предложенным

соискателем технологическим процессом реверсивного выглаживания скользящим роликовым инструментом. В исследовании определены режимы реверсивного выглаживания, позволившие получать упрочненный поверхностный слой в первую очередь за счет измельчения структуры до размера зерен порядка 1,3...1,5 мкм ротационно-сдвиговым механизмом в результате скользящего движения и циклического поворота одно- и двухрадиусного роликового инструмента. Определено ключевое влияние продольной подачи, а также частоты и угла поворота роликового инструмента на микротвердость и величину остаточных сжимающих напряжений.

Основные научные положения, выносимые на защиту диссертационной работы, обоснованы в полной мере в части влияния параметров кинематики предложенного процесса ППД на формирование качества и эксплуатационные свойства поверхностного слоя деталей машин из конструкционных сталей.

Достоверность и обоснованность результатов исследований, выводов и рекомендаций обеспечивается корректностью постановки задач и использованием известных теоретических зависимостей, допущений и ограничений, применением современных методов и средств моделирования, численного анализа и экспериментальных исследований процесса и качества упрочненного поверхностного слоя и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов расчета и эксперимента.

Выводы и рекомендации, сформулированные диссертантом по предложенной научной работе, являются несомненно достоверными и новыми. В них отражена реальная проблематика и перспективы применения предложенного метода упрочнения поверхностей реверсивным выглаживанием.

### **Теоретическая значимость и практическая ценность результатов работы**

**Теоретическая значимость** работы состоит в пополнении общепризнанной базы знаний о технологических процессах выглаживания наружных поверхностей тел вращения скользящими роликовыми и тороидальными инденторами за счет их дополнительного реверсивного поворота на заданный угол и с требуемой скоростью.

В диссертационном исследовании выявлены новые связи и зависимо-

сти, полученные с применением современных программных средств конечно-элементного моделирования и методов экспериментальных исследований и открывающие перспективы дальнейших научных исследований предложенного процесса ППД.

**Практическая ценность** результатов работы состоит в сформулированных конкретных рекомендациях по применению реверсивного выглаживания для поверхностного упрочнения деталей машин

**Апробация работы:** опубликовано 14 статей в журналах из рекомендуемого перечня ВАК и 3 статьи в изданиях, включенных в международную базу Scopus, получено 5 патентов РФ на изобретения. Основные результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях в 2021-23 гг.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Учитывая возможности метода конечно-элементного моделирования, необходимо было провести исследование процесса при нескольких величинах коэффициента трения  $\mu$  в контакте незакаленной стали 45 и роликового инструмента из стали. Принятое значение  $\mu=0,1$  в таком контексте вызывает вопросы. Во-первых, в связи с реверсивным поворотом инструмента на различные углы от  $15^\circ$  до  $60^\circ$  и скольжением с различными скоростями при существенном натяге (нормальной силе выглаживания). Во-вторых, из работ других исследователей известно, что коэффициент трения в аналогичных контактах достигает величины  $0,3 \dots 0,4$ .

2. Не приведены параметры билинейной диаграммы деформирования стали 45 в состоянии поставки, необходимые для конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния.

3. При использовании программного пакета ANSYS Mechanical для моделирования контактной температуры не показаны используемые опции программного элемента Thermal-Stress, которые позволяют учитывать рассеивание тепла в инструменте и детали. Каким образом определялась мощность источника тепловыделения при отсутствии данных о нормальной силе в контакте? Известно, что температура в контактной зоне при выглаживании стальных поверхностей инструментом из твердых закаленных сталей и сплавов достигает  $300 \dots 600^\circ\text{C}$  и более. Таким образом, выявленная при модели-



ровании и экспериментальных исследованиях величина контактной температуры вызывает вопросы.

4. Применение метода измерения шумов Баркгаузена для установления корреляции с остаточными напряжениями, полученными при конечно-элементом моделировании процесса не обосновано. Почему не использовать надежный метод оценки остаточных напряжений при дифракции рентгеновских лучей?

5. В работе не рассмотрен важный параметр процесса выглаживания с позиций упрочнения – кратность нагружения инструментом элементарных объемов обрабатываемого поверхностного слоя. Разработанный метод имеет преимущества в повышении кратности нагружения за счет увеличения размера пятна контакта вследствие реверсивного движения скользящего роликового инструмента. При этом не изучен еще один положительный фактор применения реверсивного выглаживания как повышение производительности обработки поверхности. При высоких подачах (более 0,1 мм/об) за счет реверсивного движения инструмента ширина пятна контакта увеличивается до 2-х раз.

6. По размерам отпечатка (следа) за один оборот детали при различных натягах можно определить фактическую силу выглаживания путем простейшей статической динамометрии. В научном плане использование параметра «натяг» вместо нормальной силы некорректно.

Следует отметить, что указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на главные теоретические и практические результаты.

### **Заключение**

**Диссертация Нгуен Хыу Хай «Повышение эффективности упрочнения цилиндрических деталей машин реверсивным выглаживанием»,** представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения», представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором самостоятельно на высоком техническом уровне. В работе содержится научная новизна результатов и технологических решений в области упрочнения и повышения эксплуатационных свойств поверхностного слоя ответственных

стальных деталей машин методом поверхностного пластического деформирования с применением новой кинематики движения скользящего рабочего роликового инструмента, диссертация обладает теоретической и практической значимостью в области технологии финишной обработки тел вращения.

Соискателем выполнен значительный объем научных исследований и получен ряд новых результатов и выводов, которые обоснованы теоретически и экспериментально и опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Автореферат достоверно и полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация соответствует квалификационным требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении научных степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.), а ее автор, **Нгуен Хыу Хай**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения».

Даю согласие на обработку моих персональных данных.

Доктор технических наук по специальности  
05.02.07 –Технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки,  
профессор, профессор кафедры  
«Технология машиностроения,  
станки и инструменты»

Кузнецов Виктор Павлович  
18 января 2024 г

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Адрес: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19  
тел.: 8-863-002-47-77  
email: [v.p.kuznetcov@urfu.ru](mailto:v.p.kuznetcov@urfu.ru)

Подпись В.П. Кузнецов заверяю

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
УРФУ  
МОРОЗОВА В.А.

