

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО

«Кузбасский государственный технический

университет им. Т.Ф. Горбачева»



к.ф.-м.н., доцент

А. Н. Яковлев

« 27 » декабря 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 темы диссертационной работы

Важнейшей задачей современного машиностроения является повышение качества выпускаемых изделий, которое во многом зависит от состояния поверхностного слоя и эксплуатационных свойств отдельных деталей.

Цилиндрические детали типа валов и осей применяются во многих машинах и механизмах. Они изготавливаются обычно из конструкционных среднеуглеродистых и легированных сталей. При эксплуатации на валы действуют переменные силовые и температурные воздействия, силы трения и разнообразные внешние факторы. Под их действием валы в целом или отдельные их поверхности подвержены деформации, различным видам изнашивания и разрушениям.

В производственной практике повысить качество поверхностного слоя ответственных деталей машин типа валов и осей можно финишными и отделочно-упрочняющими методами обработки, в том числе поверхностным пластическим деформированием (ППД), позволяющим увеличить прочность поверхностного слоя, сгладить микронеровности, сформировать в поверхностных слоях сжимающие остаточные напряжения. Сущность процесса ППД заключается в обработке поверхностного слоя деталей деформирующим инструментом

(шарики, ролики, гладилки), при которой не образуется стружка, а происходит пластическое деформирование тонкого поверхностного слоя заготовки. В результате деформационной упрочняющей обработки повышается усталостная прочность, износо-и коррозионная стойкость, снижаются силы трения в зоне контакта трущихся пар и т. д.

В связи с мероприятиями по экономии материальных ресурсов в машиностроительных отраслях стали проектировать и изготавливать детали с меньшими размерами поперечных сечений, например, цилиндры с более тонкими стенками, валы и оси с меньшими диаметральными размерами, панели с более тонкими перегородками и ряд других изделий, которые получили название нежестких деталей. Такие детали обычно являются нетехнологичными, так как при обработке возникают проблемы по сохранению их формы и размеров. Например, при механической обработке нежестких валов они легко изгибаются, что не позволяет обеспечить заданную форму и размеры деталей. При обработке таких деталей поверхностным пластическим деформированием сложно получить стабильное качество по длине обработки – это касается и твердости, и шероховатости, и остаточных напряжений. Если снизить величину радиальной нагрузки, т. е. уменьшить величину радиального натяга рабочего инструмента, то не удастся обеспечивать заданные показатели качества поверхностного слоя деталей машин.

Техническая идея по решению указанной проблемы основана на усложнении кинематики технологического процесса, которая позволяет повысить напряженно-деформированное состояние в очаге упругопластической деформации без изменения радиального натяга рабочего инструмента.

В связи с вышеизложенным актуальность темы исследования заключается в необходимости интенсификации напряженного состояния в зоне деформации без увеличения силы внешнего воздействия и повышении качества поверхностного слоя упрочненных деталей. Для решения поставленной задачи предлагается использовать реверсивное выглаживание. Особенность данного способа заключается в новой кинематике рабочего инструмента, реализующей реверсивное круговое движение тороидального ролика.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности упрочнения цилиндрических деталей машин путем интенсификации напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя реверсивным выглаживанием.

Структура и содержание работы

Материалы диссертации изложены на 196 страницах машинописного текста, включающих 11 таблиц, 98 рисунков и 4 приложения.

Основная часть диссертации состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 157 наименований.

Во введении приведена общая характеристика диссертационной работы: обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, обозначена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны методы и оборудование для исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена структура диссертации.

В первой главе рассмотрены проблемы при механической обработке жестких цилиндрических деталей и пути повышения их качества; проведен анализ влияния способов ППД и их кинематических схем на физико-механические свойства упроченных деталей, который позволил выявить перспективные направления по повышению качества поверхностного слоя деталей машин. В заключение первой главы сформулированы цель диссертационной работы и задачи исследования, необходимые для ее достижения.

Во второй главе представлена кинематическая схема реверсивного выглаживания и изложены результаты конечно-элементного моделирования ППД с разной кинематикой рабочего инструмента. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, остаточных напряжений и глубины упрочнения в поверхностном слое в зависимости от основных параметров реверсивного выглаживания и геометрии рабочего инструмента.

В работе установлено, что физико-механические свойства обрабатываемого материала заготовки значительно влияют на напряженно-деформирующее состояние поверхностного слоя цилиндрических образцов при реверсивном выглаживании. Максимальные интенсивности временных и остаточных напряжений наблюдаются у металлов, имеющих более высокий предел текучести (конструкционная среднелегированная сталь 30ХГСА и титановый сплав ВТ6). Установлено, что чем выше предел текучести материала, тем больше интенсивность временных и остаточных напряжений.

Определено влияние кинематики деформирующего инструмента и параметров реверсивного выглаживания на формирование упругопластической волны. Результаты моделирования показывают, что в направлении главного движения вокруг рабочего инструмента создаются упругопластические волны, обладающие практически одинаковой формой и размерами. При этом в направлении продольной подачи упругопластические волны, образующиеся в зоне обработанной и необработанной поверхностей, имеют разные геометрии и отличаются от упругопластических волн в направлении главного движения большими размерами высоты h_1 и длины l_1 . Это объясняется не только наличием продольной подачи, но и ориентацией РИ при ППД.

Показано влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на максимальную температуру в очаге деформации заготовки и зависимость максимальной интенсивности временных и остаточных напряжений от величины максимальной температуры при реверсивном выглаживании. Установлено, что при температуре в очаге деформации до 155 °С интенсивность временных и остаточных напряжений практически не изменяется. При дальнейшем увеличении температуры от 155 °С и выше интенсивность временных и остаточных напряжений начинает снижаться.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по оценке важнейших показателей качества поверхностного слоя упрочненных деталей в зависимости от основных технологических параметров реверсивного выглаживания.

Экспериментальным путем определено влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на качество поверхности и упрочненного поверхностного слоя цилиндрических деталей. Способ реверсивного выглаживания значительно снижает микрогеометрические параметры поверхности цилиндрических деталей, при этом параметры шероховатости Ra и Rz уменьшаются в 8,3 и 4,4 раза, высота Wz и шаг Sw неровности поверхности уменьшаются на 64 % и 47 %, соответственно, отклонение от круглости поверхности деталей снижается в 3,6 раза.

При реверсивном выглаживании формируются зерна в интенсивно деформированном поверхностном слое, которые в 25÷35 раз меньше зерен в недеформированном металле.

Экспериментальными результатами установлено, что после реверсивного выглаживания в поверхностном слое деталей формируются достаточно большие сжимающие остаточные напряжения ($\sigma^{ост} \sim 340 \div 345$ МПа) по сравнению с другими способами ППД. Полученные положительные результаты подтверждают техническую идею по повышению напряженного состояния в очаге деформации за счет усложнения кинематики процесса упрочнения. Реверсивное выглаживание способствует повышению не только микротвердости, но и глубины наклепа поверхностного слоя цилиндрических деталей, при этом твердость и микротвердость деталей повышаются в среднем на 12 % и 45 % по сравнению с величиной исходной твердости и микротвердости. Глубина наклепа поверхностного слоя детали достигает величины около 1,65 мм, и при изменении режимов реверсивного выглаживания степень упрочнения поверхностного слоя детали варьируется в интервале 55÷80 %. При реверсивном выглаживании и использовании технологической смазки, температура на поверхности детали при упрочнении варьируется от 42 °С до 123 °С.

В четвертой главе изложены результаты экспериментального исследования износостойкости, коррозионной стойкости, изгибной жесткости упрочненных деталей и определение рациональных режимов для реализации реверсивного выглаживания.

В результате экспериментальных исследований эксплуатационных показателей деталей, упрочненных реверсивным выглаживанием, установлено, что по сравнению с обкаткой тороидальным роликом износостойкость повышается в 3,1 раза, скорость коррозии снижается на 47,0 %, изгибная жесткость повышается на 47,5 %. Экспериментальные результаты показывают, что высотные показатели шероховатости и скорость коррозии достаточно тесно связаны между собой (коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,99$).

По результатам множественной регрессии определены рациональные режимы реверсивного выглаживания, обеспечивающие наилучшие показатели качества поверхности деталей.

Научная новизна работы:

1. Предложена новая кинематика отделочно-упрочняющей обработки реверсивным круговым вращением рабочего инструмента, обеспечивающая повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей машин типа валов и осей.

2. Разработана конечно-элементная модель процесса реверсивного выглаживания, позволяющая определить напряженно-деформированное состояние в очаге деформации, сжимающие остаточные напряжения поверхностного слоя упрочненных деталей и величину температуры в зоне деформации в зависимости от основных технологических параметров реверсивного выглаживания.

3. На основании экспериментальных исследований и численных расчетов установлено влияние основных технологических параметров реверсивного выглаживания на качество поверхностного слоя упрочненных деталей. Теоретически обоснована и экспериментально апробирована технология реверсивного выглаживания, отличающаяся локальным способом нагружения поверхностного слоя, обеспечивающая высокую микротвердость (до 470 $HV_{0,1}$) с получением мелкозернистой структуры (1,3÷1,5 мкм), при исходном размере зерна (38,2÷44,7 мкм) без разрушения поверхностного слоя упрочненных деталей.

4. Установлены корреляционные зависимости между микротвердостью и средними размерами зерен упрочненного поверхностного слоя, между сжимающими остаточными напряжениями и температурой в зоне контакта рабочего инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Практическая значимость:

1. Разработана технология упрочнения реверсивным выглаживанием, обеспечивающая повышение качества цилиндрических деталей типа валов, осей. Определены рациональные режимы обработки для получения минимальной шероховатости поверхности и максимальных механических свойств упрочненного слоя.

2. Спроектировано и изготовлено устройство для реверсивного выглаживания цилиндрических деталей типа валов, осей. Разработаны новые конструкции других устройств для реверсивного движения рабочего инструмента.

3. Разработаны технологические рекомендации для внедрения реверсивного выглаживания на производстве.

Методы исследования и достоверность результатов

При разработке конечно-элементного моделирования использована компьютерная программа *ANSYS Workbench 19.2*. Для проведения расчетов, создания графиков и чертежей был задействован программный пакет *Microsoft Excel*, КОМПАС – 3D V11, *Microsoft Visual Studio 2012* и др.

Экспериментальные исследования проведены с использованием современных средств измерения:

– для определения параметров шероховатости и волнистости поверхности упрочненных деталей использован профилометр *Form Talysurf i200* производства компании *Taylor Hobson* с компьютерным управлением;

– для измерения отклонения от круглости обработанных цилиндрических образцов использовали портальную координатно-измерительную машину (КИМ) *CONTURA G2*;

– для определения остаточных напряжений на поверхности упрочненных деталей использован метод на основе шумов Баркгаузена. Измерения проводили с помощью цифрового анализатора шумов Баркгаузена *Rollscan 300*;

– для подготовки металлографических шлифов и определения твердости, микротвердости и микроструктуры упрочненных деталей использованы специальный отрезной станок модели *Labotom-5*, автоматический пресс ПОЛИЛАБ С50А, шлифовально-полированный станок модели *Tegramin-25*, металлографический микроскоп *MET-2*, твердомер *HBRV-187,5* и микротвердомера *HMV-G21*;

– для измерения температуры на цилиндрической поверхности опытных образцов использован тепловизор *FLIR* серии *SC7000*;

– для испытания на изгиб использована универсальная машина двухколонного напольного типа модели 5980 (*INSTRON*).

Достоверность результатов обеспечена обоснованным использованием теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью выбранных методов исследования, применением известных численных методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов расчетов с экспериментальными данными.

Полнота публикаций

Результаты работы отражены в 31 (тридцати одной) публикации. Из них в журналах рекомендуемого перечня ВАК РФ опубликовано 14 статей, в изданиях, включенных в международную базу *Scopus* – 3 статьи, получены 5 патентов РФ на изобретение.

Объем публикаций и апробация результатов диссертационной работы позволяют дать определенную оценку ее значимости.

Полнота и достоверность опубликованного материала не вызывает сомнений.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе отсутствует обоснование формы принятого двухрадиусного ролика, а также необходимость определения напряженного состояния в очаге деформации.

2. Принята без обоснования гипотеза о повышении напряженного состояния в очаге деформации за счет усложнения кинематики деформирующего инструмента.

3. В диссертационной работе не рассмотрены недостатки и ограничения предлагаемого способа реверсивного выглаживания.

4. Коэффициент трения скольжения автор взял из литературных данных, а по-хорошему надо было проводить эксперименты для определения коэффициента трения для пары материалов рабочего инструмента и заготовки.

5. Отсутствует алгоритм описания методики определения рациональных параметров реверсивного выглаживания.

Заключение

Диссертация **Нгуен Хыу Хай** является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научно обоснованные технологические решения, обладающие практической значимостью и имеющие существенное значение для металлообрабатывающей промышленности страны.

