



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» на диссертационную работу

Митрофановой Кристины Сергеевны

на тему «Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя деталей машин методом поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – Технология машиностроения

На отзыв представлены:

- диссертационная работа объемом 255 страниц, состоящая из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 282 наименований и 2 приложений;
- автореферат диссертации на 19 страницах, включая список из 34 основных публикаций по теме диссертационной работы, из которых 1 патент, 5 статей в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 4 статьи в изданиях, входящих в перечень Scopus и Web of Science.

Актуальность темы диссертационной работы

Одной из ключевых задач современного машиностроения является повышение качества поверхностного слоя и эксплуатационных свойств ответственных деталей машин.

Кемеровская область – Кузбасс является лидером по добыче угля в России, и до недавнего времени на предприятиях угольной промышленности преобладало импортное оборудование. Практически все виды горно-шахтного оборудования (ГШО) являются гидрофицированными ввиду высокой газоопасности угольных пластов; при этом основой горнодобывающих комплексов является силовая гидравлика: гидроцилиндры, гидродомкраты, гидрораспределители, а также валы вентиляционных насосов и другие. Штоки, как наиболее ответственные компоненты силовой гидравлики, изготавливаются из конструкционных сталей (стали 45, 40Х, 30ХГСА и др.); рабочие поверхности этих штоков должны иметь точность 7-8 квалитета, шероховатость Ra 0,4-0,8 мкм, поверхностный слой должен быть упрочнен до глубины 4-5 мм при высокой степени

упрочнения (до 40% и более). Достичь требуемые параметры качества возможно методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Однако, традиционные статические и динамические методы ППД не обеспечивают требуемую глубину и степень упрочнения поверхностного слоя до 4-5 мм и более 40% соответственно, из-за физических особенностей. Чтобы получить большие значения глубины упрочнения и степени необходимо увеличивать усилие обкатывания (натяг деформирующих инструментов). Однако существуют ограничения, связанные с возникновением впереди деформирующего инструмента пластической волны, которая разрушается при превышении натягов свыше 0,05 мм.

Анализ результатов исследований позволил выявить направления интенсификации процессов статического ППД, включая создание схем обработки с применением сложнопрофильных инструментов, сочетающих в одной наладке несколько деформирующих инденторов. Одним из таких инструментов является мультирадиусный ролик (МР-ролик, патент РФ № 2557377), разработанный на кафедре «Технология машиностроения» КузГТУ (Россия, г. Кемерово). МР-ролик позволяет создать требуемую схему нагружения даже при натягах свыше 0,15 мм, обеспечить высокие сжимающие напряжения в очаге деформации и обеспечить требуемые параметры качества поверхностного слоя.

Несмотря на эффективность данной схемы нагружения, которая характеризуется возможностью накопления больших деформаций и одновременным повышением качества ПС, остаётся ряд нерешенных задач. К числу таковых относятся: отсутствие теоретического обоснования процесса, стабильных результатов исследования качества поверхностного слоя, развитых проектных моделей, позволяющих проектировать данную технологию и другие. Отсутствие этих научных результатов сдерживает широкое внедрение процесса в промышленность. Необходимость проведения системных и комплексных исследований по обозначенным выше вопросам предопределяет **актуальность диссертационного исследования** автора, основной целью которого явилось повышение качества поверхностного слоя деталей путем создания высокого гидростатического давления в очаге деформации при ППД мультирадиусным роликом (МР-роликом).

Структура и объём диссертационного исследования

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение, библиографический список, включающий 282 источника. Работа изложена на 255 страницах, содержит 105 рисунков, 43 таблицы, 2 приложения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, основная идея и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость результатов работы, основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ результатов отечественных и зарубежных исследований в области поверхностного пластического деформирования (ППД), который позволил выявить перспективные направления, установить направления интенсификации режимов и повышения качества поверхностного слоя (ПС), обеспечивающие высокую долговечность в условиях приложения

эксплуатационных циклических нагрузок. Выявлено перспективное направление развития метода ППД, позволяющее нивелировать технологические ограничения путем создания оригинальной схемы нагружения, предполагающей наличие высокого гидростатического давления в очаге деформации поверхностного слоя обрабатываемой детали. Реализация данной схемы основана на применении сложнопрофильного деформирующего инструмента – мультирадиусного ролика (МР-ролик, патент РФ № 2557377). В заключение первой главы сформулированы цель, научная гипотеза и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены разработанные структурная, феноменологическая и конечно-элементная (МКЭ) модели процесса ППД мультирадиусным роликом и выполнен расчет напряженно-деформированного состояния очага деформации и упрочненного поверхностного слоя на основе механики технологического наследования (ТН). Для обобщения и систематизации большого объема информации, решения поставленных задач была разработана структурная модель формирования поверхностного слоя детали на стадии ППД МР-роликом на основе механики (ТН). На основании существующих положений теории технологического наследования разработана феноменологическая модель процесса ППД МР-роликом. Выявленные закономерности пластического течения металла в ОД при обработке ППД МР-роликом положены в основу последующего решения задач методом конечных элементов (МКЭ) в категориях механики технологического наследования. Решена аналитическая задача механики деформирования, позволившая определить напряженно-деформированное состояние очага деформации и зон перекрытия, упрочненного поверхностного слоя, рассчитать смещения частиц металла, деформации и скорости деформации, а также накопленные в результате обработки МР-роликом свойства поверхностного слоя. Показана возможность накопления больших деформаций без разрушения поверхностного слоя вследствие создания в очаге деформации высокого гидростатического давления.

В третьей главе изложены программа и методики экспериментальных исследований, включающие в себя: выбор и обоснование исследуемого материала, технологического оборудования и оснастки, современных приборов и иных технических средств измерения, методики пробоподготовки и исследования образцов. Определены режимы предварительной обработки резанием и обкатывания ППД МР-роликом на токарном станке с ЧПУ. Для изучения геометрических характеристик упрочненных образцов, параметров шероховатости, микротвердости и пробоподготовки металлографических шлифов для оптических и рентгеноструктурных исследований, применены оборудование и приборы лаборатории «Качество поверхностного слоя деталей машин» (КузГТУ, г. Кемерово) и применены оборудование и приборы лаборатории «Физики прочности» (Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск).

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований геометрических параметров очагов деформации, влияния режимов процесса ППД МР-роликками с различной геометрией рабочей части инденторов на качество поверхностного слоя (шероховатость, упрочнение, микроструктуру, остаточные напряжения). Освещены результаты оптической и атомно-силовой микроскопии (ОМ и АСМ), рентгеноструктурного анализа (РСА). Представлены

экспериментальные результаты проверки и подтверждена адекватность феноменологической и МКЭ-моделей реальному процессу. Дано обоснование выбора режимов обкатывания, обеспечивающих комплекс требуемых параметров качества поверхностного слоя. Выполнена статистическая обработка и доказана состоятельность предлагаемых экспериментальных зависимостей.

В пятой главе содержатся сведения о практическом применении результатов исследований. Проведена промышленная апробация результатов исследования в условиях ООО «ОКС» (г. Кемерово) при разработке технологических процессов изготовления деталей горно-шахтного оборудования и технологической оснастки. Проведена промышленная апробация технологии на примере валов и защитных втулок вентиляционных насосов, применяемых на опасных производственных объектах химического и горно-шахтного профиля (предприятие ООО «МАШСЕРВИС», г. Кемерово).

Основные научные результаты

Научная новизна проведённых исследований:

1. Теоретически обоснована и экспериментально апробирована технология поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом (МР-роликом), отличающаяся оригинальной схемой нагружения поверхностного слоя, обеспечивающей высокое гидростатическое давление (до -960 МПа) в очаге деформации с получением высокого уровня накопленных деформаций (касательные компоненты тензора полных деформаций ε_{xy} и пластических деформаций $\varepsilon_{плxy}$ от -0,916 до -0,787) и остаточных сжимающих напряжений (от -756 до -910 МПа), мелкозернистой структуры ($8 \pm 1,5$ мкм, при исходном размере зерна $55 \pm 4,5$ мкм) без разрушения поверхностного слоя детали (п. п. 3, 4 паспорта научной специальности 2.5.6).

2. Методами оптической (ОМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеноструктурного анализа (РСА) установлен характер влияния обработки ППД МР-роликом на формирование структурно-фазового состояния металла поверхностного слоя, выявлено (на примере стали 45) существенное увеличение остаточных напряжений второго рода (σ_{II} , от -1106 до -1408 МПа); увеличение микродисторсии (микроискажений) кристаллической решетки ($\langle \varepsilon^2 \rangle^{1/2}$, 10^{-3} от 1,6 до 2,2) с одновременным существенным уменьшением области когерентного рассеивания (ОКР) (D , нм, с 71 до 40 нм) в зонах перекрытия зон очага деформации с преобладающим высоким гидростатическим давлением (п. 7 паспорта научной специальности 2.5.6).

3. Установлен вид связи между микротвердостью, глубиной упрочнения, размерами зерна и режимами обработки ППД МР-роликом (п. п. 2, 7 паспорта научной специальности 2.5.6).

Автором получены принципиально новые результаты:

1. Технологические рекомендации упрочняюще-чистовой обработки мультирадиусным роликом позволяющие повысить эффективность поверхностного пластического деформирования, а также повысить качество поверхностно-

го слоя путем создания мелкозернистой структуры металла на завершающей стадии обработки.

2. Теоретически обоснованная и экспериментально подтвержденная научная гипотеза, заключающаяся в обеспечении высокого гидростатического давления в очаге деформации за счет создания сложного напряженно-деформированного состояния путем применения оригинальной схемы нагружения поверхностного слоя мультирадиусным роликом, обеспечивающей высокий уровень накопленных деформаций, остаточных напряжений и мелкозернистой структуры без разрушения металла поверхностного слоя детали.

3. Разработанные структурная и феноменологическая модели процесса ППД МР-роликом и теоретический расчет напряженно-деформированного состояния очага деформации и упрочненного поверхностного слоя. Показано, что оригинальная схема нагружения позволяет обеспечить высокое гидростатическое давление до -1010 МПа в зонах перекрытия очагов деформации в полостях между деформирующими элементами мультирадиусного ролика.

4. Впервые исследованиями показано, что мультирадиусный инструмент позволяет применять натяги деформирующих элементов до уровня $0,15$ мм и более, недостижимые при обработке традиционными деформирующими инструментами. В совокупности это обеспечивает высокий упрочняющий эффект, заключающийся в накоплении степени деформации сдвига до $\Lambda=7,2$, обеспечении осевого компонента остаточных напряжений до -966 МПа при относительной низкой степени исчерпания запаса пластичности $\Psi=0,7$ без разрушения металла поверхностного слоя детали.

5. Разработанная программа и проведенные экспериментальные исследования, установленные закономерности формирования качества поверхностного слоя при обработке ППД МР-роликом. Установлено, что шероховатость поверхности в зависимости от режимов составляет Ra $0,218-0,223$ мкм, микротвердость образцов из стали 45 – до 445 HV, армко-железа – $160-180$ HV; при этом глубина упрочнения достигает $4,1$ мм при степени упрочнения 70 %.

6. Впервые методами оптической, атомно-силовой микроскопии и рентгеноструктурного анализа установлено влияние напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя металла на формирование структурно-фазового состояния металла поверхностного слоя стали 45 и армко-железа. Показано, что обработка ППД МР-роликом приводит существенному увеличению микродисторсии кристаллической решетки и одновременному существенному уменьшению области когерентного рассеивания в зонах перекрытия зон очага деформации с преобладающим высоким гидростатическим давлением, что приводит к формированию наноразмерной структуры металла.

7. Алгоритм проектирования, технология и сложнопрофильные инструменты (ролики) для поверхностного пластического деформирования, позволяющие использовать исследуемый процесс, как при изготовлении новых, так и при восстановлении изношенных поверхностей эксплуатирующихся деталей машин на универсальных станках и станках с ЧПУ. Промышленная апробация, выполненная при изготовлении и ремонте валов и защитных втулок насосов, применяемых на опасных производственных объектах ООО «ОКС» (г. Кемерово).

во) и ООО «МАШСЕРВИС» (г. Кемерово), показала возможность повышения ресурса изделия более чем в 15 раз по сравнению с новыми изделиями.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность результатов настоящего диссертационного исследования подтверждается достаточным объемом анализа литературных источников, использованием современных методик экспериментальных и теоретических исследований и обработки полученных данных.

Выводы по главам и по работе в целом в достаточной степени обоснованы, опираются на существующие научные положения и не противоречат существующим теориям и исследованиям. Методологической базой исследований являются основы технологии машиностроения, механика деформируемых тел, механика технологического наследования, теория прочности и разрушения твердых тел, результаты исследований в области упрочняющих технологий и механики поверхностного пластического деформирования, физики металлов и металловедения. Принятые граничные условия являются допустимыми и не оказывают существенного влияния на результаты работы. В процессе диссертационного исследования автор корректно ссылается на заимствованные методики и научные результаты, полученные другими авторами.

Изложенные в диссертации результаты прошли апробацию на 21 международной и российской конференции различного уровня, в Кемерове, Белове, Новосибирске, Бийске, Брянске, Ростове-на-Дону, Сочи, Санкт-Петербурге, Москве.

Основные научные результаты достаточно полно отражены в публикациях: опубликовано 34 научные работы, в том числе, 1 патент, 5 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 4 статьи в изданиях, входящих в перечень *Scopus* и *Web of Science*, 24 материала и тезисов в сборниках трудов научных конференций и семинаров.

Значимость результатов, полученных автором диссертационной работы, для науки и практики

Теоретическая значимость работы заключается в установлении закономерностей формирования качества поверхностного слоя при интенсификации напряженно-деформированного состояния очага деформации методом поверхностного пластического деформирования мультирадиусным роликом. Практическая значимость работы заключается в создании финишного отделочно-упрочняющего способа обработки сложнопрофильным инструментом, обеспечивающим высокое гидростатическое давление в очаге деформации и значительный упрочняющий эффект с образованием наноразмерной структуры без разрушения поверхностного слоя металла обрабатываемой детали. Результаты работы подтверждены **практической реализацией на ООО «ОКС» (г. Кемерово) и ООО «МАШСЕРВИС» (г. Кемерово) при изготовлении и ремонте валов и**

защитных втулок насосов, применяемых на опасных производственных объектах, показала возможность повышения ресурса изделия более чем в 15 раз по сравнению с новыми изделиями.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты проведенных научных исследований и предложенные для практического применения технологические рекомендации упрочняющей чистовой обработки мультирадиусным роликом позволяют повысить эффективность поверхностного пластического деформирования, а также повысить качество поверхностного слоя путем создания мелкозернистой структуры металла на завершающей стадии обработки.

Разработаны алгоритм проектирования, технология и сложнопрофильные инструменты (ролики) для поверхностного пластического деформирования, позволяющие использовать исследуемый процесс, как при изготовлении новых, так и при восстановлении изношенных поверхностей эксплуатирующихся деталей машин на универсальных станках и станках с ЧПУ.

Замечания по диссертационной работе

При ознакомлении с текстом диссертации и ее авторефератом возникли некоторые замечания:

1. Требуют пояснения следующие результаты. На стр. 225 диссертации и стр. 5 автореферата величина остаточных максимальных напряжений существенно больше предела текучести материала, а напряжения в очаге деформации (стр. 99, 104 диссертации) выше предела прочности материала. К сожалению, в работе отсутствует информация об интенсивности напряжений в очаге деформации, по которой можно было бы оценить состояние упрочненного слоя.
2. Трудно согласиться с мнением автора о том, что об упрочняющем эффекте судят по степени деформации «лямбда». Прямой и более удобной характеристикой является степень упрочнения металла.
3. К сожалению, автор не всегда указывает, для какого индентора используется большой натяг 0,15 мм. Из результатов исследований непонятно, что будет если такой натяг будет у всех 4-х инденторов.
4. Обработка деталей мультирадиусным роликом обеспечивает высокий упрочняющий эффект, заключающийся в накоплении степени деформации сдвига до 7,2, обеспечении осевого компонента остаточных напряжений до -966 МПа при относительной низкой степени исчерпания запаса пластичности без разрушения металла поверхностного слоя детали. Наверное, требуется в большей степени детализировать физический смысл «степени деформации сдвига» и «степени исчерпания запаса пластичности».

5. В диссертации не представлены ограничения по использованию предлагаемого способа ППД (обрабатываемый материал, геометрия упрочняемых деталей, возможность обработки галтелей и др.)
6. Имеются отклонения от ГОСТ Р 7.0.11-2011 Структура и правила оформления диссертаций. Таблицы, рисунки и ссылки в тексте на них должны оформляться по ГОСТ 2.105.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную для науки и практического применения тему, содержит новые научные результаты, которые имеют существенное значение для науки и практики в области повышения эффективности упрочняющей обработки деталей методами ППД. Основные результаты и выводы по работе обоснованы теоретически и экспериментально, опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Автореферат достоверно и полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Митрофановой Кристины Сергеевны соответствует паспорту научной специальности 2.5.6 «Технология машиностроения» (пункты: 2, 3, 4, 7), требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (п.9), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальностям 2.5.6 – «Технология машиностроения».

Отзыв ведущей организации на диссертацию и автореферат обсужден и принят на техническом совещании института авиамашиностроения и транспорта 17 мая 2023 г. В обсуждении приняли участие 5 докторов технических наук и 6 кандидатов технических наук по специальностям «Технология машиностроения» Голосовали единогласно.

Директор института авиамашиностроения и транспорта, зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств» ИРНИТУ, доктор технических наук, профессор


А. Е. Пашков

Профессор кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий, доктор технических наук, профессор


С. А. Зайдес

Пашков Андрей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, директор института авиамашиностроения и транспорта, зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНИТУ). Научная специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, тел.: +7 (3952) 40-51-70, e-mail: pashkov@istu.edu

Семен Азикович Зайдес, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение, сварочные и аддитивные технологии» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНИТУ) Научная специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова 83, тел.: +7 (3952) 40-50-79, e-mail: zsahaus@mail.ru.