

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Саврая Романа Анатольевича «Анализ усталостной и контактно-усталостной прочности поверхностно упрочненных сталей и функциональных хромоникелевых покрытий», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение

Диссертационная работа Саврая Романа Анатольевича посвящена разработке путей повышения усталостной и контактно-усталостной прочности поверхностно упрочненных сталей и функциональных хромоникелевых покрытий на основе изучения структурных факторов, определяющих характеристики прочности и сопротивление разрушению при различных видах циклического нагружения.

Актуальность темы. Долговечность деталей во многом определяется состоянием поверхностного слоя. Поэтому обеспечение высокого качества поверхностей деталей машин технологическими способами с применением новых финишных методов обработки является одной из актуальных задач современного машиностроительного производства. Существуют различные методы финишных обработок, среди которых достаточно широкое распространение получили методы поверхностного пластического деформирования (ППД), а также создание функциональных покрытий. В научной литературе имеется большое количество данных о структуре и свойствах поверхностно упрочненных сталей и функциональных хромоникелевых покрытий. Тем не менее, представленные данные об усталостных свойствах таких материалов весьма ограничены и зачастую носят противоречивый характер. При этом недостаточно рассмотрено влияние на усталостные свойства возможных изменений структурно-фазового состояния при циклическом нагружении, а также поведение материалов при гигацикловом контактно-усталостном нагружении по схеме пульсирующего ударного контакта. В этой связи, диссертационная работа Саврая Р.А., которая направлена на решение важной научной и прикладной проблемы обеспечения высокой усталостной и контактно-усталостной прочности изделий после финишных поверхностных обработок, безусловно, является актуальной.

Оценка содержания диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации, списка использованной литературы и 3 приложений. Работа изложена на 280 страницах, включая 125 рисунков и 31 таблицу. Список использованной литературы содержит 414 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, отмечены личный вклад автора, степень достоверности и апробация результатов, представлена структура диссертации.

Первая глава посвящена исследованию особенностей деформирования и разрушения высокоуглеродистой стали У10 с перлитными структурами различного типа при статическом и циклическом растяжении. Выявлено, что наибольшей усталостной долговечностью при циклическом растяжении перлитной стали У10 обладают структуры отожженного тонкопластинчатого перлита и частично сфероидизированного перлита, в которых активно развиваются процессы дробления, фрагментации и сфероидизации цементита вследствие эффекта динамического деформационного старения и ускоренной диффузии под действием циклических нагрузок. При этом структурные изменения, наблюдаемые в образцах стали У10 при циклическом растяжении, подобны изменениям структуры, наблюдаемым в железнодорожных колесах из перлитных сталей на значительном удалении от зоны контакта при длительной эксплуатации в условиях контактного нагружения. Рассмотрена возможность оценки с помощью магнитного метода усталостной деградации стали У10 при циклическом растяжении. Установлено, что до появления усталостной трещины наблюдается увеличение тангенциальной составляющей вектора магнитной индукции образца в остаточном намагниченном состоянии и появляется неоднородность ее распределения по длине образца. Это обусловлено структурными изменениями (сфероидизацией цементитных пластин), протекающими в стали У10 при усталостном нагружении. При появлении магистральной усталостной трещины на графике распределения тангенциальной составляющей вектора магнитной индукции наблюдается ярко выраженный пик, что может быть использовано для разработки высокочувствительных методов неразрушающего контроля усталостной деградации металлических сплавов. Исследовано также влияние упрочненного слоя, сформированного с помощью поверхностной деформационной (фрикционной) обработки, на особенности деформирования и разрушения стали У10 при статическом растяжении и многоцикловом контактно-усталостном нагружении. Установлено, что в условиях контактно-усталостного нагружения упрочненный поверхностный слой существенно повышает контактную выносливость стали У10 со структурой тонкопластинчатого перлита, когда контактные повреждения сосредоточены в тонком поверхностном слое. Это обусловлено формированием в данном слое высокодисперсной структуры с большим количеством дислокаций, а также высоким уровнем сжимающих остаточных напряжений.

Во второй главе исследовано влияние упрочненного слоя, сформированного с помощью поверхностной деформационной (фрикционной) обработки, на особенности деформирования и разрушения низкоуглеродистой феррито-перлитной стали 20 при статическом и циклическом растяжении. Установлено, что упрочненный поверхностный слой повышает прочностные и снижает пластические характеристики стали 20 при статическом растяжении, а также существенным образом влияет на характер развития пластического течения при деформировании в условиях статического и циклического нагружения. При статическом растяжении это выражается в исчезновении зуба текучести и уменьшении длины площадки текучести на кривой нагружения и, соответственно, к более однородному пластическому течению поверхностно упрочненной стали на начальном этапе

пластического деформирования. В условиях циклического растяжения при малоцикловом нагружении это выражается в образовании не одной (как в отожженной стали), а множества полос локализованной деформации. Выявлено также аномальное снижение контактного модуля упругости E^* стали 20 после фрикционной обработки от 213 ± 4 до 176 ± 10 ГПа. Для углеродистой стали, подвергнутой фрикционной обработке, эффект снижения модуля упругости наблюдается впервые. Показано, что при циклическом растяжении с контролируемой величиной напряжения, упрочненный поверхностный слой не снижает циклическую прочность стали 20 в области малоциклового усталости. Это обусловлено способностью данного слоя к дополнительному упрочнению при циклическом деформировании, то есть наличию запаса пластичности, а также более однородным пластическим течением поверхностно упрочненной стали. В области многоциклового усталости, напротив, наблюдается некоторое снижение циклической прочности стали, что обусловлено наличием на ее поверхности микротрещин, возникающих в результате накопленной при фрикционной обработке поврежденности.

В третьей главе исследовано влияние упрочненного слоя, сформированного с помощью поверхностной комбинированной деформационно-термической обработки, на особенности деформирования и разрушения среднеуглеродистой стали 50 с мартенситной структурой при статическом и циклическом растяжении. Установлено, что упрочненный поверхностный слой существенным образом изменяет характер развития пластического течения при деформировании в условиях статического и циклического нагружения. При статическом растяжении это выражается в исчезновении площадки текучести на кривой нагружения и, соответственно, более однородном пластическом течении образца на начальном этапе пластического деформирования. В условиях циклического растяжения при малоцикловом нагружении это выражается в подавлении образования деформационного рельефа. Показано, что при циклическом растяжении с контролируемой величиной напряжения упрочненный поверхностный слой не снижает циклическую прочность стали 50 в области малоциклового усталости. Это обусловлено сохранением некоторого запаса пластичности, о чем свидетельствует рост плотности дислокаций при циклическом деформировании, а также более однородным пластическим течением поверхностно упрочненной стали. Однако поверхностные микротрещины, которые возникают в ходе циклического нагружения на поверхности образцов стали 50, подвергнутой комбинированной обработке, ускоряют процесс разрушения на конечной стадии. Рассмотрена также возможность оценки временного сопротивления разрыву упрочненного слоя на поверхности стали 50 путем проведения стандартных механических испытаний на одноосное растяжение. Полученные результаты свидетельствуют о возможности определения временного сопротивления разрыву упрочненного слоя на поверхности материала путем проведения стандартных механических испытаний на одноосное растяжение с целью прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочненных материалов.

В четвертой главе исследовано влияние упрочненного слоя, сформированного с помощью поверхностной деформационной (фрикционной) обработки, на особенности деформирования и разрушения метастабильной аустенитной стали AISI 321 (аналог 12X18H9T) при гигацикловом контактно-усталостном нагружении. На основе проведенных испытаний на контактную гигацикловую усталость установлено, что упрочненный поверхностный слой повышает контактную выносливость стали AISI 321 при циклическом ударном нагружении. Это выражается в существенном уменьшении глубины контактных повреждений (от 20 до 1-2 мкм) и отсутствии их локализации, то есть более равномерном разрушении. При этом выявлено, что локализации контактных повреждений могут способствовать дефекты упрочненного слоя (в частности, поры), поэтому их количество должно быть минимальным. Выявлено также повышение контактного модуля упругости E^* и его немонокотное распределение по глубине упрочненного слоя, что обусловлено формированием структур с ограниченной подвижностью дислокаций, а именно, ячеистой структуры (закреплены дислокации, находящиеся в стенках ячеек) и дисперсной структуры с высокой плотностью дислокаций, затрудняющей их движение. Показано, что величина микротвердости поверхности и глубина контактных повреждений, измеренные в зоне пятен контакта, могут служить количественными критериями, позволяющими оценить степень усталостной деградации и остаточный ресурс стали AISI 321 в условиях гигациклового контактно-усталостного нагружения. Проведен расчет напряжений в зоне контакта индентора с поверхностью образца и установлено, что соотношение нормальных контактных напряжений на границе и в центре области взаимодействия составляет 1,8 раза, и это обуславливает отличия характера деформирования и разрушения в различных зонах. Исследованы также структурно-фазовые превращения и их влияние на прочностные свойства и коррозионное поведение стали AISI 321, подвергнутой жидкостной цементации при пониженной температуре. Установлено, что в поверхностном слое цементованной метастабильной аустенитной стали AISI 321 развивается мартенситное превращение по схеме $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ (двухстадийное превращение) и образуется α' -мартенсит в количестве $V_{\alpha} = 20$ об. %. Деформационное мартенситное превращение в цементованном слое происходит при охлаждении после цементации. Показано, что, несмотря на образование значительного количества мартенсита деформации, цементация не приводит к снижению коррозионной стойкости аустенитной стали AISI 321.

В пятой главе представлены результаты исследования особенностей деформирования и разрушения наплавленных лазером покрытий из сплавов на хромоникелевой основе при многоцикловом контактно-усталостном нагружении. По степени возрастания контактной выносливости (уменьшения размера контактных повреждений), исследуемые покрытия располагаются следующим образом: ПГ-CP2 – 25% TiC, ПГ-CP2 – 15% TiC, ПГ-10H-01 после отжига, ПГ-CP2, ПГ-10K-01, ПГ-CP2 – 15% Cr₃C₂, ПГ-10H-01. Показана возможность создания композиционных покрытий, содержащих крупные (50-150 мкм) частицы

упрочняющих фаз (в частности ПГ-СР2–15% TiC и ПГ-СР2–15% Cr₃C₂), контактная выносливость которых не будет существенно уступать контактной выносливости покрытий с дисперсными (1-10 мкм) упрочняющими фазами, а твердость и износостойкость будут выше. Установлено, что контактная выносливость хромоникелевых покрытий определяется их способностью сопротивляться пластической деформации в условиях повторяющегося упругопластического деформирования при механическом неударном контактом воздействии. Основными механизмами формирования пятна контакта при этом являются: а) пластическое деформирование поверхностного слоя покрытий и б) трещинообразование, которое ослабляет поверхностный слой и способствует увеличению диаметра пятна контакта. Установлена последовательность процесса усталостной деградации покрытий при контактно-усталостном нагружении, которая заключается в формировании первоначального пятна контакта с последующим чередованием этапов роста трещин и когезионного скалывания покрытия по краю пятна контакта. Проведена оценка способности поверхности наплавленных покрытий сопротивляться механическому контактному воздействию с использованием данных микроиндентирования. Выявлено наличие корреляции между параметрами, определяемыми при микроиндентировании, и размером контактных повреждений при контактно-усталостном нагружении. При этом для покрытий, содержащих упрочняющие фазы одного размерного диапазона, выявлена сильная линейная корреляция между степенным отношением твердости вдавливания к контактному модулю упругости H_{IT}^3/E^{*2} и диаметром пятна контакта после 10^6 циклов нагружения. Показано, что метод микроиндентирования (однократное нагружение) может быть использован для оценки и сравнения способности наплавленных лазером покрытий из сплавов различных систем легирования выдерживать повторяющиеся контактные нагрузки, не проводя при этом достаточно длительные испытания, если покрытия имеют одинаковую дисперсность упрочняющих фаз. Проведено также обобщение и анализ результатов микроиндентирования для исследуемых материалов. Показано, что метод микроиндентирования может быть использован для оценки и сравнения способности выдерживать повторяющиеся контактные нагрузки как наплавленных лазером хромоникелевых покрытий, так и поверхностно упрочненных сталей.

Научная новизна результатов работы. Наиболее важными научными результатами работы являются: 1) установленное положительное влияние упрочненного слоя, сформированного с помощью поверхностной деформационной (фрикционной) обработки, на усталостную прочность при циклическом растяжении конструкционных сталей 20 и 50, соответственно, с феррито-перлитной и мартенситной структурами, за счет сохранения запаса пластичности и обеспечения более однородного пластического течения, что препятствует локализации деформации; 2) установленная способность упрочненного слоя, сформированного с помощью поверхностной деформационной (фрикционной) обработки, повышать контактную выносливость перлитной стали У10 и метастабильной аустенитной стали AISI 321 (12X18H9T) в области много- и гигацикловой усталости, когда контактные

повреждения сосредоточены в тонком поверхностном слое с сильно диспергированной структурой, высокой твердостью и остаточными сжимающими напряжениями; 3) установленная последовательность процесса усталостной деградации наплавленных лазером хромоникелевых покрытий при контактно-усталостном нагружении, которая заключается в формировании первоначального пятна контакта с последующим чередованием этапов роста трещин и когезионного скалывания покрытия по краю пятна контакта.

Важными результатами также являются установленное подобие структурных изменений в перлитных сталях при различных видах циклического нагружения и положительная роль этих структурных изменений в повышении усталостной прочности, а также выявленная корреляция между параметрами, определяемыми при микроиндентировании (однократное нагружение), и размером контактных повреждений при контактно-усталостном нагружении поверхностно упрочненных сталей и наплавленных лазером хромоникелевых покрытий. При этом показано, что наиболее информативным параметром является степенное отношение твердости вдавливания к контактному модулю упругости H_{IT}^3/E^2 , которое характеризует сопротивление развитию пластической деформации.

Практическая значимость результатов работы. Предложен теоретически обоснованный подход для оценки контактно-усталостной прочности без проведения длительных испытаний с использованием метода микроиндентирования (однократное нагружение). Разработана новая методика, которая позволяет проводить испытания на контактную гигацикловую усталость по схеме пульсирующего ударного контакта «плоскость-плоскость» с ультразвуковой частотой нагружения. Обоснована возможность использования величины микротвердости поверхности и глубины контактных повреждений, измеренных в зоне пятен контакта, для количественной оценки степени усталостной деградации. Обоснована также возможность мониторинга магнитным и вихретоковым методами поверхностного трещинообразования в процессе усталостного нагружения объемно и поверхностно упрочненных сталей и контактно-усталостного нагружения функциональных хромоникелевых покрытий, что может быть использовано для разработки методик оценки степени усталостной деградации и остаточного ресурса изделий после финишных поверхностных обработок.

Результаты работы по исследованию контактной выносливости аустенитной нержавеющей стали нашли практическое применение при усовершенствовании технологии наноструктурирующего выглаживания, обеспечивающей высокую твердость и низкую шероховатость поверхности обрабатываемых изделий, работающих в условиях повышенных контактных нагрузок. Данная технология была использована для изготовления запорных органов деталей клиновых задвижек и обратных клапанов нефтепромыслового оборудования, которое реализовано в условиях промышленного производства на ООО «Предприятие «Сенсор» (г. Курган), что подтверждено соответствующим актом. Практическая значимость результатов работы также подтверждена актом ООО «Вездеходы

«Бурлак» (г. Курган), в котором отмечена важность исследования влияния жидкостной цементации на структуру и свойства аустенитной нержавеющей стали, а также возможность практического применения полученных результатов при разработке технологических процессов изготовления ответственных деталей трансмиссии вездеходов.

Достоверность результатов работы. Достоверность и обоснованность полученных в работе экспериментальных результатов, научных положений и выводов обеспечена большим объемом выполненных экспериментов, использованием проверенных и оригинальных методов испытаний материалов, современных методов структурного и фазового анализа, а также применением метода микроиндентирования, метода конечных элементов, магнитного и вихретокового методов для оценки усталостной и контактно-усталостной прочности исследуемых материалов. Результаты, полученные разными методами, взаимно дополняют друг друга и характеризуются хорошей воспроизводимостью.

Замечания по работе:

1. На мой взгляд было бы логичней расположить первые главы, посвященные изучению особенностей деформирования и разрушения углеродистых сталей при статическом и циклическом растяжении в направлении увеличения углерода, т.е. сталь 20→сталь 50→У 10;
2. При усталостных испытаниях для всех случаев выбрано нагружение с размахом 0,7 от предела текучести, однако этот уровень с точки зрения проявления усталости далеко не идентичен: чем больше отношение предела прочности к пределу текучести – тем менее опасен выбранный уровень амплитуды нагружения. Собственно, именно это и наблюдается в эксперименте: с увеличением указанного отношения увеличивается число циклов до разрушения
3. Вызывает большие сомнения справедливость положения 4, выносимого на защиту, о дислокационном механизме эффекта снижения модуля упругости (МУ) с ростом плотности подвижных дислокаций. Дело в том, что изменение МУ, связанное с дислокационной структурой, известно под термином «Дефект модуля, вызывается не плотностью подвижных дислокаций, а изменением среднего размера незакрепленного сегмента дислокаций (МУ уменьшается из-за способности сегмента выгибаться в дугу). Соответственно, с увеличением общей плотности дислокаций МУ, наоборот, всегда увеличивается. Кроме того, это явления регистрируется исключительно при регистрации МУ методом внутреннего трения, а не в результате механического нагружения. В рассматриваемом случае природу «отрицательного дефекта МУ» следует искать в образовании макродефектов.
4. Сомнительно, что для определения вклада поверхностного слоя в общую прочность можно использовать правило смесей (формула 3.1 стр. 99). В известной монографии В.П. Алехина (Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев

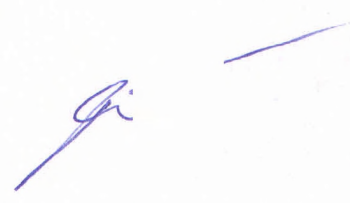
материалов. М.: Наука. 1983. 280 с.) убедительно доказано, что вклад поверхности значительно выше, чем был бы исходя из правила смесей.

Высказанные замечания не меняют в целом безусловно положительную оценку представленной работы, включая ее научное и практическое содержание.

Заключение. Диссертационная работа Саврая Р.А. представляет собой законченное исследование. Содержание диссертации отражено в 50 публикациях, в том числе в 32 статьях, опубликованных в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 30 статей в журналах, индексируемых международными базами цитирования Scopus и WoS. Материалы диссертации обсуждены более чем на 30 конференциях различного уровня. Получены пять патентов РФ на изобретения и полезные модели. Содержание автореферата соответствует положениям диссертации. Полученные результаты имеют важное значение для обеспечения высокой усталостной и контактно-усталостной прочности изделий после финишных поверхностных обработок. Выводы и практические рекомендации работы могут быть использованы для разработки способов деформационных, химико-термических и комбинированных обработок деталей машин, а также для проведения механических испытаний с целью оценки усталостной долговечности и структурных изменений при эксплуатации.

В целом по актуальности решаемых задач, научной новизне, практической значимости, достоверности полученных результатов и обоснованности выводов, диссертационная работа «Анализ усталостной и контактно-усталостной прочности поверхностно упрочненных сталей и функциональных хромоникелевых покрытий» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Саврай Роман Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
директор Научно-исследовательского института
прогрессивных технологий федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»



Мерсон Дмитрий Львович

445020, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 49
Тел.: +7 (8482) 449-303, e-mail: d.merson@tltsu.ru

