

УТВЕРЖДАЮ
Директор Удмуртского федерального
исследовательского центра УрО РАН
д.ф.-м.н., профессор М.Ю. Альес
«22» апреля 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» на диссертационную работу **Релмасиры Капреси Джолана «Влияние процесса эволюции пор и трещин при фрикционном нагреве на ресурсную долговечность теплостойких сталей с покрытием»**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – «Материаловедение (металлургия)»

На основании изучения представленной диссертационной работы и автореферата представляем следующее заключение.

Актуальность темы. Для большого класса изделий, имеющих общее название «Технологические машины специального назначения (ТМСН)», вследствие повышения эксплуатационных нагрузок характерен фрикционный нагрев. Актуальность темы диссертации определяется, во-первых, необходимостью установления основных особенностей фрикционного нагрева, во-вторых, оценкой влияния данных особенностей на эволюцию пор и трещин в процессе трения, которая и определяет усталостную долговечность изделия.

Необходимость определения особенностей фрикционного нагрева связана с тем, что в разделе трибологии, называемом термотрибология, существует большой разброс теоретических положений (так называемая тепловая задача трения), противоречащих друг другу. К примеру, влияние топографии поверхности на фрикционный нагрев не исследовано. Однако, в термотрибологии температура на микрошероховатостях (температура вспышки) определяется отдельно от поверхностных и объемных температур, а для нахождения максимальной температуры фрикционного нагрева производится суммирование указанных температур, что приводит к явно заниженным результатам.

Процессы эволюции пор и трещин базируются или на априорных предположениях, или на экспериментальных оценках конечного этапа их развития. В этой связи отсутствует возможность управления данными процессами. Решение указанных проблем и предопределяет актуальность темы диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 190 источников и приложений. Работа изложена на 128 страницах, содержит 74 рисунка и 28 таблиц. Общий объем работы составляет 141 страницу.

Оценка содержания диссертации в целом

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе анализа литературных источников делается вывод о том, что применительно к теплостойким сталям с покрытием фактор фрикционного нагрева рассматривался только в работах П.И. Маленко. Установлено, что в диапазоне температур 400 900 К в поверхностной зоне происходят структурно-фазовые изменения, приводящие к образованию вторичных структур, которые и определяют ресурс узла. Результаты анализа позволили предложить три гипотезы, лежащие в основе исследований, представленных в диссертационной работе.

Первая гипотеза предполагает, что в основу постановки тепловой задачи трения следует положить разделение температурных потоков, как основных, и тепловых потоков, как второстепенных. Вторая гипотеза касается учета влияния топографии поверхности трения в виде шероховатости на характер температурных процессов в смазочном материале и поверхностной зоне. Вследствие дискретности шероховатой поверхности температурный процесс будет также дискретным в виде термоциклирования. В результате в поверхностной зоне будет иметь место резкое повышение давления. В свою очередь трансформация давления по глубине поверхностной зоны должна привести к появлению восходящей диффузии и дислокационному упрочнению поверхностной зоны. Сущность третьей гипотезы состоит в том, что процесс изнашивания поверхностной зоны имеет многоступенчатый характер. Вначале имеет место процесс схватывания, что приводит к адгезионной повреждаемости. Далее происходят процессы образования и роста пор и трещин. В конечном счете, происходит процесс усталостного изнашивания. Оценка данных явлений следует производить на атомно-фононном уровне с помощью метода молекулярной динамики.

Во второй главе исследуется процесс структурообразования теплостойких сталей с покрытием при фрикционном нагреве в континуальном приближении (сплошная среда). Выбор оптимальной марки теплостойкой стали и режимов используемого метода упрочнения поверхности трения – процесса нитротрирования (низкотемпературной нитроцементации) производился на основе термодинамического анализа. Стандартными металлургическими методами исследовали исходные износостойкие свойства нитротрированных покрытий (пористость и дислокационные структуры).

В результате проведения экспериментов на машине трения подобными методами исследовались структурные изменения в поверхностной зоне (фазовый состав, поро- и трещинообразование). Для выявления причин изменения структуры поверхностной зоны далее исследовались температурные процессы. В результате проведенных на машине трения экспериментов с использованием высокоточного аппаратного обеспечения фирмы “Брюль и Кьер” были получены экспериментальные графики температур, позволившие, во-первых,

проанализировать особенности температурных процессов и, во-вторых, получить исходные данные для аналитического исследования. Для подтверждения первой выдвинутой гипотезы была осуществлена корректная постановка тепловой задачи трения и разработана единая методика ее решения для гладких и шероховатых поверхностей: для гладких поверхностей применяли закон распределения Фурье в виде его разложения в ряд Тейлора (первый член разложения). Для шероховатых поверхностей использовались два члена разложения. Решение тепловой задачи трения для шероховатых поверхностей (дифференциальные уравнения гиперболического типа) позволили установить наличие нового явления в термотрибологии – термического удара с давлением, превышающим 1 ГПа. С применением закона Гука далее определили трансформацию термического удара по глубине поверхностной зоны. Оказалось, что термический удар по глубине поверхностной зоны трансформируется в восходящую диффузию и дислокационное упрочнение. Восходящая диффузия приводит к разложению исходных фаз и образованию на этой основе вторичных фаз. В свою очередь дислокационное упрочнение определяет процесс эволюции пор и трещин в поверхностной зоне (реализация второй гипотезы).

В третьей главе осуществлено теоретическое обоснование реализации третьей выдвинутой гипотезы – приведен анализ метода молекулярной динамики. Сущность метода молекулярной динамики состоит в том, что исследуются процессы не в континуальном приближении, а на атомном уровне. Для моделирования исследуемых процессов необходимо иметь соответствующую программу моделирования с объемом, по крайней мере, в десятки тысяч атомов. Далее в программу вводятся кристаллические решетки исходных фаз, а для придания им соответствующих физико-механических свойств создаются потенциалы межатомного взаимодействия. При разработке потенциалов межатомного взаимодействия использовался метод “погруженного атома”. При наличии программы моделирования и потенциалов межатомного взаимодействия далее создается идеальный кристаллит из одной или нескольких исходных фаз, в котором моделируются дефекты (точечные, линейные или объемные). Далее дефектные кристаллы подвергаются действию трансформированного термического удара (восходящей диффузии или дислокационному упрочнению).

В четвертой главе приводятся результаты моделирования процесса эволюции пор и трещин и дается критериальная оценка износостойкости поверхностной зоны. Исследование процессов эволюции пор и трещин производилось в несколько этапов. Вначале анализировались процессы залечивания “врожденных” технологических трещин и пор под воздействием восходящей диффузии, что было отмечено при исследованиях в континуальном приближении. При моделировании методом молекулярной динамики было установлено, что в результате диссипации энергии и релаксации внутренних напряжений происходит уменьшение энергии, что и соответствует процессу залечивания. Образование пор происходит за счет флуктуационных тепловых (фононных) колебаний атомов, называемых бризерными. В результате их воздействия кристаллические решетки деформируются, при этом атомы покидают узлы решеток, образуя вакансионные кластеры. Смещенные атомы образуют

кластеры междоузельных атомов. Дальнейший рост вакансионных кластеров обеспечивается за счет механизмов восходящей диффузии до определенных размеров, называемых дилатонами. При достижении дилатонами критических размеров ($\Delta_{кр} \approx 10^{-7}$ м) они взрываются.

Механизмы образования коротких и длинных трещин различны. Короткие трещины проходят латентную стадию и стадию развития, что связано с процессом дислокационного упрочнения. Длинные (вертикальные) трещины образуются и растут в условиях сверхупругости. Процесс дислокационного упрочнения моделировался, начиная с образования и развития дислокаций и последующего их движения и торможения. Конечным итогом моделирования явилось определение параметров дилатонного механизма разрушения пор и параметров разрушения коротких и длинных трещин по температурным зонам. Результаты моделирования механизмов разрушения подтверждены экспериментальными данными.

Научная значимость материалов диссертации состоит:

- показано, что процессы залечивания пор и трещин под действием диффузионных процессов на начальном этапе эксплуатации;
- с учетом влияния температурного фактора произведена оценка динамики дислокационного упрочнения в поверхностной зоне трущихся деталей;
- определено влияние температурного фактора на процесс эволюции пор и трещин;
- с использованием метода молекулярной динамики изучены параметры и механизмы разрушения поверхностной зоны теплостойких сталей с покрытием и на этой основе определен ресурс узлов технологических машин специального назначения по температурным зонам;
- установлено, что формирование температурного фронта при трении в отдельных локальных точках контакта шероховатых поверхностей является кратковременным, имеет волновую природу, вызывающую возникновение термоциклических напряжений, которые способствуют появлению и развитию структурно-фазовых изменений, и формированию структурных дефектов, приводящих к развитию дилатонного и усталостного механизмов разрушения;
- разработана единая методика расчета фрикционных температур с учетом топографии поверхности на основе корректно поставленной тепловой задачи трения и определения параметров термического удара как следствия термоциклирования на субшероховатостях поверхности трения;
- на основе результатов определения параметров термического удара получены характеристики изменения напряжений по глубине поверхностной зоны, приводящих к появлению восходящей диффузии, дислокационному упрочнению и развитию пор и трещин.

Теоретическая и практическая значимость и реализация результатов работы

Теоретическая значимость работы состоит:

- в корректной постановке и решении тепловой задачи трения, конечным итогом которого служат параметры термического удара по температурным зонам;

– в установлении процессов трансформации термического удара по глубине поверхностной зоны, в результате чего определены напряжения $\sigma_{\text{диф}}$, вызывающие появление восходящей диффузии и напряжения $\sigma_{\text{дисл}}$, приводящие к дислокационному упрочнению;

– в рассмотрении на основе полученных результатов с использованием компьютерного моделирования процесса эволюции пор и трещин в результате фрикционного нагрева и определении циклической долговечности теплостойких сталей с покрытием по температурным зонам.

Практическая значимость результатов работы состоит в разработке и внедрении соответствующих методик: в ООО «Эксперт СВ» поэтапно внедрена методика для экспертной оценки оборудования черной металлургии; в АО «Тулаточмаш» внедрена соответствующая методика для ускоренного проведения стендовых испытаний; в учебном процессе кафедры ФММ для магистров внедрена и используется методика моделирования структурообразования на основе метода молекулярной динамики.

Научная новизна и практическая значимость диссертации подтверждаются публикациями, сделанными в открытой печати. Основные результаты диссертации изложены в соответствующих отраслевых журналах, в том числе рекомендуемых ВАК РФ и входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, доступных широкому кругу специалистов и ученых.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

Научные положения, выводы и рекомендации соискатель делает на основе изучения и обзора специальной литературы, а также публикаций в периодической печати по изучаемой проблеме. Релмасира К.Д. в своей работе использует известные научные теории и методики, современное экспериментальное оборудование и математические приемы при выводе теоретических положений, что свидетельствует в пользу достоверности и обоснованности полученных данных. Выводы и обобщения логично вытекают из результатов исследований.

Достоверность основных положений работы подтверждена апробацией результатов исследований на научно-технических конференциях и семинарах различного уровня и в рецензируемых научных изданиях, а также внедрением результатов работы в производство.

Использование результатов диссертационного исследования в производстве подтверждается актами внедрения работы на конкретных предприятиях.

Апробация диссертационной работы и полнота опубликования основных результатов в печати

Основные положения и наиболее важные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских научно-технических конференциях, региональных научно-технических конференциях: «Инновации в материаловедении» (г. Москва, 2013 и 2015 г.г.); «Механические свойства

современных конструкционных материалов» (г. Москва, 2014 г.); «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (г. Москва, 2015 г.); «Трибология – машиностроению» (г. Москва, 2016 и 2018 г.г.); «Евразийский Союз Ученых» (г. Москва, 2014 г.); «Новые материалы и технологии в машиностроении» (г. Брянск, 2013 и 2015-2019 г.г.); «Фундаментальные и прикладные аспекты новых высокоэффективных материалов» (г. Казань, 2014 г.); «Новые материалы» (г. Сочи, 2016 г.); «Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии» (г. Тула, 2013 и 2017 г.г.); «Релаксационные явления в твердых телах» (г. Воронеж, 2015 г.); «Механика и трибология транспортных систем» (г. Ростов-на-Дону, 2016 г.); «Инженерия поверхности и реновация изделий» (Украина, г. Киев, 2015-2019 г.г.); «Полимерные композиты и трибология» (Беларусь, г. Гомель, 2015, 2017 и 2019 г.г.).

Основные научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в 45 научных работах, из них по теме диссертации опубликовано 35 научных работ, 4 публикации в ведущих периодических изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, 6 публикаций в изданиях, включенных в международные реферативные базы (Web of Science, Scopus).

Замечания по диссертационной работе и автореферату

1. Очевидно, что действие термоциклирования, а, следовательно, и наличие термического удара имеет место при смазочном слое определенной толщины (граничная и отчасти полужидкостная смазка). В диссертации не указаны предельные толщины смазочного слоя, когда возможно возникновение термического удара.

2. В диссертации не указаны причины развития длинных (вертикальных) трещин в условиях сверхупругости.

3. Для получения целостной картины усталостного разрушения целесообразно было бы сопоставить результаты, полученные в диссертационной работе согласно энергетической теории, с результатами, полученными по другим теориям, например, кинетической.

4. В диссертационной работе отсутствует анализ полученных значений ресурса по температурным зонам, с экспериментальными результатами.

5. Из 35 публикаций, заявленных в автореферате по теме работы в тексте диссертации, имеются ссылки только на 3 из них (пп. 91, 186, 187). Из автореферата также следует, что автор принимал участие более чем в 25 конференциях различного уровня, что говорит о достаточно широкой апробации работы. Однако в материалах диссертации отсутствуют ссылки на содержание упомянутых докладов, что затруднило более объективный анализ работы.

Вместе с тем высказанные замечания не умаляют общей ценности работы и ее положительной оценки и не затрагивают основных положений и выводов диссертации. Работа имеет хорошую научную апробацию и практическое внедрение. В целом диссертация изложена аргументировано, логично и технически грамотно, что характеризует соискателя как вполне сформировавшегося высококвалифицированного специалиста.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Релмасиры Капреси Джолана на тему: «Влияние процесса эволюции пор и трещин при фрикционном нагреве на ресурсную долговечность теплостойких сталей с покрытием» выполнена на высоком научном уровне, отличается актуальностью, новизной, теоретической и практической значимостью.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.16.09 – «Материаловедение (металлургия)», а также требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС», которые предъявляются к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Релмасира Капреси Джолан заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв подготовлен:

Директор Института механики УдмФИЦ УрО РАН

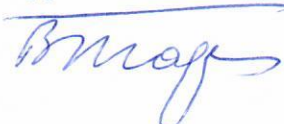
д.т.н., профессор



В.Б.Дементьев

Главный научный сотрудник ИМ УдмФИЦ УрО РАН

д.т.н., профессор



В.В.Тарасов

Отзыв заслушан и обсужден на заседании Ученого совета ИМ УдмФИЦ УрО РАН, протокол № 3 от dd апреля 2021г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт механики Удмуртского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

Почтовый адрес: 426067, г. Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34

Телефоны: 8 (3412) 50-82-00, 8 (3412) 50-88-10,

Адрес электронной почты: udnc@udman.ru

Адрес официального сайта: http://udman.ru/ru/

Подпись Дементьева Вячеслава Борисовича и Тарасова Валерия Васильевича заверяю:

Начальник отдела кадров



 О.С.Воронцова