Вестник научно-технического развития Bulletin of Science and Technical Development

Номер 2 (138), февраль 2019 г.

DOI: 10.18411/vntr2019-138

Издается с 2007 года

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

*Журнал выпускается под научным руководством Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН*

ОГЛАВЛЕНИЕ № 2 (138), 2019

Кирилл Алексеевич Бузаверов, Марина Алексеевна Гресс, Мария Юрьевна Рыжова, Кирилл Иванович Шебешев. Упрочняющая термическая обработка экономно легированной стали после цементации стр. 3 – 8

Иосиф Исаакович Вульфсон. Устранение возникающих из-за зазоров виброударных режимов при учете характеристик электродвигателя..... стр. 9 – 14

Лидия Ивановна Куксенова, Мария Сергеевна Алексеева, Марина Алексеевна Гресс. Структурное состояние приповерхностных слоев металла и его влияние на уровень разрушения в условиях объемного и поверхностного деформирования.....стр. 15 – 29

Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов. Тканые электронагреватели и Арктика.....стр. 30 – 40

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

УДК 621. 822.71

УПРОЧНЯЮЩАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭКОНОМНО ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЦЕМЕНТАЦИИ

© Кирилл Алексеевич Бузаверов, Марина Алексеевна Гресс, Мария Юрьевна Рыжова,
Кирилл Иванович Шебешев

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия
vladisl-2013@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы повышения эксплуатационных характеристик авиационных зубчатых колес, изготовленных из низкоуглеродистой экономно легированной стали 15X2ГН2ТРА. Приведены сведения о режимах окончательной термической обработки, использующихся после вакуумной цементации. Разработан технологический процесс термической обработки, обеспечивающий наличие карбидов на профилях зубьев, отсутствие карбидной сетки в цементованном слое, минимальное количество остаточного аустенита и оптимальные механические свойства зубчатых колес: твердость на поверхности 60 HRC, твердость сердцевины 40 HRC. Определены оптимальные температурные условия проведения высокого отпуска после цементации и низкого отпуска после закалки.

Ключевые слова: зубчатые колеса, вакуумная цементация, экономно легированная сталь, цементованный слой, закалка, отпуск.

STRENGTHENING THERMAL TREATMENT OF ECONOMY-ALLOYED STEEL AFTER CARBURIZATION

© K.A. Buzaverov, M.A. Gress, M.Yu. Ryzhova, K.I. Shebeshev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

vladisl-2013@yandex.ru

Abstract. The paper addresses the issues of improving the performance characteristics of aviation gear wheels made of low carbon economy-alloyed steel C0,15Cr2MnNi2TiB. Provides information about the modes of final heat treatment, used after vacuum cementation. A heat treatment process was developed to ensure the presence of carbides on the tooth profiles, the absence of a carbide mesh in the carburized layer, the minimum amount of residual austenite, and the optimum mechanical properties of gears: surface hardness of 60 HRC, core hardness of 40 HRC. The optimum temperature conditions for high tempering after carburization and low tempering after quenching are determined.

Keywords: gear wheels, vacuum carburization, economy-alloyed steel, carburized lower, quenching, tempering.

Введение. Зубчатые передачи получили широкое распространение во всех сферах промышленности, что обусловлено их высокой нагрузочной способностью и надежностью, КПД. Для долговечной и надежной работы ответственных зубчатых колес и шестерней необходимо обеспечение контактной и изгибной прочности зубьев. Наиболее высокую работоспособность зубчатых колес обеспечивают стали, которые являются основным материалом для их изготовления.

По технологии термической обработки стали для зубчатых колес делятся на улучшаемые и поверхностно упрочненные. Улучшаемые стали применяют в слабо- и средненагруженных передачах [1, 2]. Поверхностным термическим или химико-термическим упрочнением достигают высокую твердость на поверхности зубьев при сохранении вязкой сердцевины.

В авиационной промышленности для силовых зубчатых колес коробок скоростей самолетных агрегатов в качестве упрочняющей обработки широкое распространение получили технологические процессы цементации, нитроцементации, азотирования [4,5]. При химико-термической обработке достигается наибольшая твердость поверхности зубьев, что обеспечивает высокую несущую способность зубчатых передач по контактной прочности, позволяет снизить массу и габариты зубчатой передачи. При азотировании достигается минимальное коробление деталей, что позволяет не проводить окончательное шлифование поверхности, однако, из-за низкой толщины упрочняющего слоя (0,3...0,5 мм), его хрупкости и наличия дефектного слоя (ϵ -фазы), применение азотируемых сталей ограничено при высоких контактных нагрузках.

После цементации возможно получение эффективного диффузионного слоя толщиной до 1,8 мм, что является более приемлемым для тяжело нагруженных деталей. Цементованные зубчатые колеса после окончательной термической обработки обладают высокой контактной выносливостью зубьев, прочностью зубьев на изгиб, высоким сопротивлением износу и заеданию.

Исходя из назначения и условий работы авиационных зубчатых колес, поиск оптимального материала следует осуществлять в классе конструкционных высококачественных и особовысококачественных средне- и высоколегированных низкоуглеродистых сталей повышенной прочности ($\sigma_b \leq 1500$ МПа), упрочнение которых осуществляется цементацией и последующей термической обработкой.

Известно [1, 3], что в настоящее время в авиации получила широкое применение высокопрочная сталь ВКС5-Ш. Однако в связи с тем, что это высоколегированная и дорогая сталь, в настоящее время встает вопрос о возможности применения менее дорогих материалов. Свойства базовой (ВКС5-Ш) и альтернативной экономно-легированной стали 15Х2ГН2ТРА (ГОСТ 2590-2006) представлены в таблице 1. При выборе материала необходимо также учесть его условную стоимость.

Таблица 1.

Сравнение свойств и стоимости цементуемых сталей

Материал	σ_b	HRC	Теплостойкость, °С	Условная стоимость
ВКС5-Ш	1310	60	300	536,69
15Х2ГН2ТРА	1270	60	250	240,52

Из таблицы 3 видно, что сталь марки ВКС5-III обладает лучшим комплексом свойств, однако свойства стали марки 15X2ГН2ТРА не намного хуже, а если учесть условную стоимость двух материалов, то при эксплуатации при температуре менее 250 °С, предпочтение следует отдать стали марки 15X2ГН2ТРА, как более экономичному материалу.

Для повышения контактной выносливости поверхность зубчатых колес необходимо упрочнить. Это можно сделать несколькими способами: химико-термической обработкой (цементацией [4-6] или обработкой в коронном разряде [7]), электромеханической обработкой [8], пластической деформацией [9, 10] или с помощью токов высокой частоты [11]. В работе исследован вариант вакуумной цементации, имеющий множество преимуществ [5].

Цель работы состоит в разработке технологии термической обработки после вакуумной цементации экономно-легированной стали 15X2ГН2ТРА; определении оптимальных температур высокого отпуска после цементации и низкого послезакалочного отпуска.

Методика и объекты исследования. Объектами исследований служили образцы из стали 15X2ГН2ТРА, которые подвергали типичной для зубчатых колес ХТО: вакуумной цементации (ВЦ) при 930-950 °С, высокому отпуску, закалке в масло от 910 °С, обработке холодом и низкому отпуску. Вакуумную цементацию проводили на оборудовании «SECO/WARWICK SA».

Распределение углерода по толщине диффузионного слоя оценивали спектральным методом на эмиссионном многоканальном спектрометре фирмы «Baird» с обработкой результатов в соответствии с ГОСТ 18895.

Испытания на контактную выносливость выполняли при контактных напряжениях $\sigma_{Zmax} = 4000$ МПа с нормальной температурой на модернизированной установке для исследования малоциклового усталости МКВ-К [1, 3]. Скорость обкатки составляла 7,94 м/с. В каждой партии испытывали 11 образцов. Образцы были изготовлены из квадратных прутков со стороной квадрата 10 мм.

Твердость измеряли по методу Роквелла, регламентированному ГОСТ 9013, алмазным конусом с общей нагрузкой 150 кг, а также микротвердомером ПМТ-3 с нагрузкой 200 г. Химический состав исследуемой стали 15X2ГН2ТРА (ГОСТ 2590-2006) представлен в таблице 2.

Таблица 2.

Химический состав стали 15X2ГН2ТРА

C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	B	S	P
0,12-0,18	0,17-0,37	0,7-1,0	1,4-1,8	1,4-1,8	0,02-0,06	0,002-0,005	≤0,025	≤0,025

Результаты экспериментов и обсуждение. После цементации структура поверхностного слоя состоит из перлита и цементита, причем цементит располагается в виде грубой сетки вокруг аустенитного зерна. После закалки в масле из такой структуры образуется значительное количество (иногда до 60%) остаточного аустенита, снижающего твердость и усталостную прочность стали. Именно поэтому после цементации проводят высокий отпуск. Разрыв по времени между цементацией и высокотемпературным отпуском должен быть не более 4–8 часов. При температуре менее 700 °С (Ac1 цементованного слоя) карбиды сферодизируются и из аустенита выделяются очень мелкие вторичные карбиды. Таким

образом распределение карбидной фазы становится более равномерным, а её сферическая форма позволяет быстрее растворяться в аустените при нагреве до температур первой закалки, которую проводят после высокого отпуска.

Для определения оптимального режима высокого отпуска, его температуру варьировали от 600 до 680 °С, так как этот диапазон является зоной наименьшей устойчивости аустенита подобной стали. При этом продолжительность нагрева составила 2 ч, время выдержки 2 ч, охлаждение до 200 °С с печью (5-6 ч), далее на воздухе.

Измерения твердости проводили после проводимой вслед высокому отпуску закалке. Высокий отпуск вызывает распад остаточного аустенита и образование легированных карбидов. Цель закалки – придание высокой твердости поверхностному слою, а также исправление дефектов структуры, образовавшихся после цементации (цементитная и ферритная сетка, крупное зерно). Поверхностный слой после цементации имеет заэвтектоидную концентрацию углерода, поэтому закалку проводят из двухфазной области $\gamma + K$, так как после охлаждения со скоростью больше критической, в структуре кроме мартенсита закалки будет присутствовать сферические включения карбидов, дополнительно повышающие твердость и износостойкость. На основании анализа литературных данных температура закалки была назначена 760 ± 10 (на 50 градусов выше A_{c1}).

Из таблицы 3 видно, что оптимальной по свойствам является температура высокого отпуска равная 660...680 °С.

Таблица 3.

Результаты измерения твердости поверхности цементованных образцов из стали 15Х2ГН2ТРА после высокого отпуска (2 ч) и закалки с 760 ± 10 °С

Температура отпуска, °С	HRC
600+5	52...54
620+5	53...55
640+5	56...57
660+5	60...61
680+5	60...61
700+5	56...57

Исследованиями установлено, что в структуре стали после закалки присутствует 15-20 % остаточного аустенита, так как практически все легирующие элементы понижают температуру начала мартенситного превращения. Для снижения количества остаточного аустенита после закалки была проведена обработка холодом. Охлаждение изделий до отрицательных температур проводили сухим льдом до температуры -65...-75 °С. Положительное действие обработки холодом проявилось не только в повышении твердости стали, но и в процессе эксплуатации деталей обеспечит их размерную стабильность [12].

Структура, образующаяся после закалки и обработки холодом (мартенсит закалки + карбиды) является термодинамически неустойчивой, также в детали присутствуют высокие упругие напряжения (закалочные напряжения). С целью повышения эксплуатационных свойств и надежности деталей был проведен низкий отпуск (продолжительностью 2 ч), который является заключительной операцией термической обработки изделий после химико-термической обработки.

Исследование влияния температуры низкого отпуска на контактную выносливость стали 15X2ГН2ТРА представлено в таблице 4 и показало, что оптимальной температурой нагрева является 160-180 °С.

Таблица 4.

Результаты испытаний образцов из стали 15X2ГН2ТРА на контактную выносливость N_{50} после низкого отпуска (2 ч)

Температура отпуска, °С	Контактная выносливость N_{50} , млн.цикл.
140+5	93...94,5
160+5	105...107
180+5	133...135
200+5	135...138
220+5	98...101

Таким образом, предлагаемые режимы термической обработки после вакуумной цементации стали изображены на схеме (рис. 1).

Рис. 1. Схема химико-термической обработки стали 15X2ГН2ТРА

Выводы

- 1). Оптимальная температура высокого отпуска после вакуумной цементации составляет 660...680 °С, 2 ч.
- 2). Для повышения контактной выносливости необходимо провести послезакалочный низкий отпуск при температуре 200+5 °С, 2 ч.

Список литературы

1. Суслов А.Г. Инженерия поверхности деталей. - М.: Машиностроение, 2008. - 320 с.
2. Пахомова С.А. Особенности преподавания курса «Инженерия поверхности» студентам

- по направлению «материаловедение и технологии материалов» // Инженерный вестник. - 2015. - № 9. - С. 19. URL: <http://engsi.ru/doc/812901.html> (дата обращения 15.12.2018).
3. Карапузов О. Г. Особенности вакуумной цементации зубчатых колес из теплостойких сталей // В сборнике: Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент. Материалы X Международной научно-инновационной молодежной конференции. - 2018. - С. 315-318. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36443515>
 4. Fakhurtdinov R.S., Ryzhova M.Y., Pakhomova S.A. Aadvantages and commercial application problems of vacuum carburization // Polymer Science. Series D. - 2017. - Т. 10, № 1. - P. 79-83.
 5. Пахомова С.А., Рыжова М.Ю., Фахуртдинов Р.С., Макушина М.А., Пикалов А.И., Усова В.В., Юшин Н.А. Контактная выносливость и износостойкость теплостойкой стали после разных видов цементации // Вестник научно-технического развития. – 2016. - № 9 (109). - С. 19-28.
 6. Фахуртдинов Р.С., Пахомова С.А., Рыжова М.Ю. Проблемы модернизации оборудования для вакуумной цементации // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2017. - № 2. - С. 113-118.
 7. Помельникова А.С., Фетисов Г.П., Пахомова С.А. К вопросу упрочнения различно легированных сталей обработкой в коронном разряде // Технология металлов. - 2017. - № 2. - С. 20-24.
 8. Fedorova L.V., Fedorov S.K., Bokhonov G.Yu. Reinforcing electromechanical restoring output shaft gear box change the family car "Gazelle"// Repair, restoration, modernization. - 2015. - № 9. - P. 14-16.
 9. Пахомова С.А., Макушина М.А., Коваленко С.В. Деформационное упрочнение тяжело нагруженных поверхностей зубчатых передач для горнодобывающей промышленности // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. - 2016. - № 3. - С. 243-251.
 10. Пахомова С.А., Рыжов Н.М. Эффективность деформационного упрочнения цементованных сталей // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. - 1999. - № 2. - С. 61.
 11. Закалка металлов токами высокой частоты URL: [http://m-deer.ru/tehnologiya/zakalka metallov tokami vysokoj chastoty](http://m-deer.ru/tehnologiya/zakalka_metallov_tokami_vysokoj_chastoty) (дата обращения 15.12.2018).
 12. Гришин В.И. Повышение контактной выносливости деталей из цементуемой стали 12Х2Н4А // Вестник научно-технического развития. - 2016. - № 11 (111). - С. 3-9.

Дата поступления: 15 февраля 2019 г.

УДК 621.01:534.1

УСТРАНЕНИЕ ВОЗНИКАЮЩИХ ИЗ-ЗА ЗАЗОРОВ ВИБРОУДАРНЫХ РЕЖИМОВ ПРИ УЧЕТЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

© Иосиф Исаакович Вульфсон

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", СПбГУПТД, Санкт-Петербург, Россия

jvulf@yandex.ru

Аннотация. В статье исследуются колебания приводов цикловых машин с учетом зазоров и характеристик электродвигателя. Предложены методы повышения точности воспроизведения заданных законов программного движения исполнительных органов.

Ключевые слова: колебания, электродвигатели, цикловые машины.

ELIMINATION OF VIBRO-IMPACT MODES ARISING FROM GAPS, WHEN TAKING INTO ACCOUNT THE DINAMIC CHARACTERISTICS OF AN ELECTRIC MOTOR

© I. I. Vulfson

Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint-Petersburg, Russia

jvulf@yandex.ru

Abstract. The article examines the vibrations of the cyclic machines drives, taking into account the gaps and characteristics of the electric motor. The methods are proposed for improving the accuracy of prearranged programmatic movements of executive bodies.

Key words: vibrations, electric motors, cyclic machines.

1. Проблеме подавления колебаний приводов и исполнительных органов машин посвящено много публикаций, обобщенных в монографиях [1 – 6]. При этом влияние характеристик электродвигателей на точность воспроизведения заданных законов движения обычно не принимается во внимание или учитывается лишь частично. В статьях [7, 8, 9] были исследованы динамические модели, анализ которых позволяет частично выявить взаимовлияние характеристик электродвигателей и механических подсистем приводов, а также исполнительных органов технологических цикловых машин. Отметим, что в статье [9] было рассмотрено взаимовлияние характеристик электродвигателя и динамических эффектов, вызванных соударениями в зазорах, однако в данной статье мы ограничились лишь качественным анализом этой проблемы. Ниже мы проведем подробный анализ возникающих при этом возмущений и способы их подавления.

Обратимся к динамической модели (рис.1), состоящей из следующих подсистем: электродвигатель M ; механическая подсистема привода $u - c_1, \psi_1 - J_1$; ведомая подсистема

Рис.1

исполнительного органа $\Pi - s - c_2, \psi_2 - J_2$, связанная с подсистемой привода цикловым механизмом с нелинейной функцией положения Π . Здесь приняты условные обозначения: u – передаточное отношение редуктора; J_j – моменты инерции; c_j – коэффициенты жесткости; ψ_j – коэффициенты рассеяния; s – зазор.

Подробнее остановимся на динамическом эффекте, связанном с «пересечением» зазора. Проведем две кривые на графике функции положения $\Pi(\varphi)$, смещенные на приведенную величину зазора s (см.рис.2, кривые 1,2)). Пусть при $\varphi = \varphi_*$ в точке B происходит отрыв от кривой 1, а в точке B' на кривой 2 происходит восстановление кинематического контакта. Примем, что угол поворота $\Delta\varphi = \omega\Delta t$, соответствующий зоне «свободного полета», мал. При этом с достаточным основанием можно считать, что движение на этом участке происходит с постоянной скоростью, равной скорости отрыва в точке B .

Рис.2

При восстановлении кинематического контакта имеет место скачок первой передаточной функции $\Delta \Pi'$ [4]:

$$\Delta \Pi' = \sqrt[3]{4,5s^2 |\Pi''|}. \quad (1)$$

При этом имеет место жесткий удар. Введем в рассмотрение параметр $\xi = |\Delta y''|_{\max} / |\Pi''|_{\max}$, равный отношению экстремума дополнительного ускорения (после выборки зазора) к экстремуму идеального ускорения. При одиночном ударе получаем

$$\xi = \Pi_*'' \sqrt{(4,5)^{2/3} \beta_1^4 N^2 + N^{-2}}, \quad (2)$$

где $\beta_1 = \sqrt[3]{s / |\Pi_*''|}$, $N = k_0 / \omega$.

На основании формулы (2) могут быть определены параметры системы, удовлетворяющие требованию $\xi \leq \xi_*$, где ξ_* – допускаемое значение уровня дополнительных ускорений, вызванных зазором. (Обычно $\xi_* < 0,1 \div 0,2$).

Для исключения возможности возникновения виброударных режимов при выборке зазора очень важно устранение повторных соударений. Повторные соударения могут возникнуть с фазовым сдвигом $\Delta \varphi$ относительно угла φ_* , соответствующего разрыву кинематической связи при «входе» в зазор. Здесь $\Delta \varphi = \sqrt[3]{6s / |\Pi_*''|} + \alpha N^{-1}$ при $\alpha \approx 4,45 \div 6,28$ [4].

Можно показать, что в первом приближении должно удовлетворяться условие

$$\beta_2 = \beta_1 N^{-1} < 0,3 \exp(\delta \alpha) \left[1 + \sqrt{1 + 29,4 \exp(-\delta \alpha)} \right] \quad (3)$$

В формуле (3) учтено демпфирование колебаний $\delta \approx \psi / (4\pi)$ на малом отрезке времени Δt ; при этом $\exp(\delta \alpha) \approx 1$ и $\beta_2 < \beta_2^* \approx 2$.

2. Далее перейдем к основной задаче, поставленной в данной статье, а именно – к устранению динамических эффектов от соударений при выборке зазора. С этой целью обычно используется дополнительная нагрузка, устраняющая «пересечение» зоны зазора. Механизмы, с помощью которых эта задача реализуется, как уже отмечалось, широко представлена монографиях и учебных пособиях, однако, вне внимания обычно остаются, по крайней мере, два фактора: влияние характеристик электродвигателя и возможность отрицательного воздействия дополнительной нагрузки при решении поставленной задачи.

На рис.3 представлена динамическая модель, которая, в отличие от модели на рис.1, дополнена упругодиссипативным элементом c_0, ψ_0 , реализующим функцию устранения разрывов непрерывности кинематических характеристик.

Рис.3

Приведенной модели отвечает следующая система дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} & \nu \tau \omega_*^2 J_0^* \Delta \bar{\omega}'' + \nu J_0^* \omega_* \Delta \bar{\omega}' + \omega_*^{-1} \Delta \bar{\omega} - \nu \bar{k}_1^2 \omega_*^2 q_1 = 0 ; \\ & q_1'' + \{ \mu \Pi' \bar{k}_2^2 [2\delta_2 \bar{k}_2^{-1} (q_1 \Pi_*' - q_2') + q_1 \Pi_*' - q_2 - 0,5s \operatorname{sgn}(\Pi_*' q_1 - q_2)] \} \times \\ & \times H(|\Pi_*' q_1 - q_2| - 0,5s) + \bar{k}_1^2 (2\delta_1 \bar{k}_1^{-1} q_1' + q_1) = 0; \\ & q_2'' + \bar{k}_2^2 [2\delta_2 \bar{k}_2^{-1} (-q_1' \Pi_*' + q_2') - q_1 \Pi_*' + q_2 - 0,5s \operatorname{sgn}(-\Pi_*' q_1 + q_2)] \times \\ & \times H(|\Pi_*' q_1 - q_2| - 0,5s) + \Pi_*'' (1 + \Delta \bar{\omega})^2 + \Pi_*' \Delta \bar{\omega}' + \bar{k}_0^2 (\Delta_0 + \Pi_*) = M_2 / J_2 , \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\Delta \bar{\omega}$ – динамическая ошибка угловой скорости на «входе»; q_1, q_2 – координаты в сечениях дисков J_1, J_2 ; $(\cdot)' = d/d\varphi$; ν, τ – коэффициент крутизны статической характеристики и электромагнитная постоянная времени электродвигателя, приведенные к сечению J_1 ; $\bar{k}_i = k_i / \omega_*$; $k_1 = \sqrt{c_1 / J_1}$, $k_2 = \sqrt{c_2 / J_2}$, $k_0 = \sqrt{c_0 / J_2}$; $\mu = u^2 J_M / J_{11}$; u – передаточное отношение; Δ_0 – предварительная деформация; M_2 – внешний момент; $H(\chi(\varphi, s))$ – единичная функция, где $H = 0$; $H = 1$ соответственно при $|\chi| < 0$; $|\chi| > 0$; $\chi = (|\Pi_*' q_1 - q_2| - 0,5s)$.

Примечание. Безразмерные параметры, отмеченные черточкой, соответствуют их исходному значению, отнесенному к идеальной угловой скорости двигателя ω_* .

Ниже приведен ряд типовых динамических режимов, полученных на основании системы уравнений (4) при следующих исходных данных: $\nu = 0,06 (\text{Г} \cdot \text{с})^{-1}$; $\tau = 0,002 \text{ с}$; $a = 0,004 \text{ Г}$; частотные характеристики $\bar{k}_i = k_i / \omega_*$ (рис.4, 5).

Рис.4

Рис.5

Кривые 1 отвечают второй передаточной функции заданного программного закона движения, а кривые 2 – откорректированному результату с учетом динамических ошибок, вызванных возбуждаемыми колебаниями.

Режим 1 ($c_0 = 0$). Сохранены разрывы непрерывности при переходе через зазор (рис. 5,а).

На графике $q_2(\varphi)$ четко видно пересечение зазора, границы которого показаны пунктирной линией. Все графики свидетельствуют о повышенной виброактивности, что в числе прочих факторов является результатом неравномерности угловой скорости двигателя.

Режим 2 ($c_0 \neq 0$; $\bar{k}_0 = 2$; рис. 5,б). Имеет место существенное уменьшение уровня ускорений исполнительного органа (см. кривую 2). Однако, наблюдается значительный рост максимальных значений координат q_1 и q_2 , что вызвано дополнительной нагрузкой от замыкающего устройства. Поэтому в процессе синтеза следует найти компромиссное решение.

Режим 3 ($c_0 \neq 0$; $\bar{k}_0 = 1,3$; рис. 5,в). При этом режиме устранены колебания при пересечении зазора и одновременно более чем в два раза понижены максимальные значения координат q_1 и q_2 . Представляет интерес, что функция q_1 по виду кривой почти совпадает с угловой скоростью двигателя $\Delta\bar{\omega}$. Это свидетельствует о повышенном уровне взаимовлияния.

В заключении отметим, что рациональный выбор параметров на базе совместного анализа характеристик двигателя, упругодиссипативных характеристик привода, исполнительных органов, зазоров, а также элементов силового замыкания позволяет выявить резервы для повышения производительности машин и улучшения качества выпускаемой продукции.

Список литературы

1. Вейц В.Л. Динамика машинных агрегатов. / В.Л. Вейц. - Л.: Машиностроение, 1969. – 370 с.
2. Вейц В.Л., Коловский М.З., Кочура А.Е. Динамика управляемых машинных агрегатов. – М.: Наука, 1984. – 352 с.
3. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. – Л.: Машиностроение, 1990. – 309 с.
4. Вульфсон И. И. Динамика цикловых машин. – СПб.: Политехника, 2013. – 425 с.
5. Коловский М.З. Динамика машин. – Л.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
6. Вульфсон И.И., Коловский М.З. Нелинейные задачи динамика машин.– Л.: Машиностроение, 1968. – 284 с.
7. Вульфсон И. И. К проблеме динамической взаимозависимости электродвигателя и механического привода цикловой машины. // Теория механизмов и машин. – 2016. - Т. 32, – №4 . – С. 173–182.
8. Вульфсон И. И. О некоторых коррективах при оценке влияния электродвигателя на виброактивность привода технологических машин.// Вестник научно-технического развития. 2017. - №2 (114). - С. 11–23.
9. Вульфсон И.И. Анализ чувствительности динамики цикловых механизмов к характеристикам электродвигателя//Вестник научно-технического развития. – 2019. - №1 (137).– С.3–13.

Дата поступления: 11 февраля 2019 г.

УДК 669.01:539.538

СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА УРОВЕНЬ РАЗРУШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНОГО И ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Лидия Ивановна Куксенова¹, Мария Сергеевна Алексеева^{1,2},
Марина Алексеевна Гресс³

¹ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²ВИАМ, Москва, Россия

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

lkukc@mail.ru

Аннотация. В последние годы возрос интерес к свойствам тонких приповерхностных слоев твердых тел применительно к разным условиям деформирования и их роли в условиях промышленной эксплуатации изделий из конструкционных материалов. В работе представлены результаты исследований свойств поверхностных слоев металлических материалов в условиях объемного деформирования, а также связи характеристик механических свойств металлов и сплавов и структурных изменений при деформации, финишных технологических обработках и контактом взаимодействии.

Ключевые слова: поверхностные слои, деформация, конструкционные материалы, финишные обработки, трение и износ.

STRUCTURAL STATE OF NEAR-SURFACE METAL LAYERS AND ITS INFLUENCE ON THE LEVEL OF DESTRUCTION OF BULK AND SURFACE DEFORMATION

L.I. Kuksenova¹, M.S. Alekseeva^{1,2}, M.A. Gress³

¹IMASH RAN, Moscow, Russia

²VIAM, Moscow, Russia

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

lkukc@mail.ru

Abstract. In recent years, interest has increased in the properties of thin near-surface layers of solids in relation to different deformation conditions and their role in the conditions of industrial operation of products made of structural materials. The paper presents the results of studies of the properties of the surface layers of metallic materials under conditions of bulk deformation, as well as the relationship of the characteristics of the properties of metals and alloys and structural changes during deformation, finishing technological processing and contact interaction.

Key words: surface layers, deformation, structural materials, finishing, friction and wear.

Поверхность – это граница раздела двух твердых тел или твердого тела и окружающей среды. Приповерхностные слои имеют существенные отличия по составу, структуре,

физико-химическим и физико-механическим свойствам от объема материала, но являются неотъемлемой частью твердого тела и во многих случаях влияют на эксплуатационные характеристики материалов и изделий из них в условиях силового воздействия. Этим обстоятельством объясняется растущий интерес к поверхности твердого тела. Исследование свойств поверхностных микрообъемов, а также процессов, протекающих на свободной поверхности, становится в центре внимания специалистов, занимающихся развитием фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии и механики. Интенсификация развития этих исследований связана, во-первых, со значительным увеличением количества прикладных задач, решение которых непосредственно зависит от уровня накопленных знаний о состоянии поверхности (например, новые методы обработки материалов и изделий, совершенствование технологии роста кристаллов, создание коррозионностойких и высокопрочных материалов и покрытий). Во-вторых, ускорение развития многочисленных металлофизических методов исследования дало реальную возможность проводить исследования поверхностных микрообъемов твердых тел в контролируемых условиях и на качественно новом уровне. Поэтому, в литературе замечен рост числа публикаций, посвященных исследованию состояния поверхности и приповерхностных слоев, который указывает, что для материала поверхностных микрообъемов характерно не только многообразие специфических явлений (поверхностные электронные состояния, двумерная кристаллография, структурно-фазовые превращения), но и значимое влияние состояния поверхности на процессы в объеме твердого тела.

Целью данной работы является рассмотрение особенностей изменения структуры и свойств поверхностных слоев металлических материалов и их влияния на эксплуатационные характеристики технических изделий. Описаны три основные задачи: 1 – роль поверхностных слоев в формировании объемных характеристик прочности металлических материалов; 2 – взаимосвязь напряжений, деформаций, повреждаемости, оцениваемых для условий объемного пластического деформирования, и структурных изменений, экспериментально выявленных для материала поверхностных микрообъемов; 3 – роль свойств поверхности и их изменений при технологической обработке, в условиях контактного взаимодействия и внешнего трения.

1. Особенности состояния поверхности.

Экспериментальные и теоретические работы позволяют выделить несколько основных характерных особенностей структурного состояния приповерхностных слоев металлов и сплавов [1]:

- повышенная концентрация легко действующих гомогенных источников (типа источника Фишера), а также гетерогенных источников образования дислокаций вблизи поверхности деформируемого твердого тела;
- действие сил зеркального отображения, которые существенно влияют на характер перераспределения дислокационной структуры в тонких слоях субмикроскопического масштаба. При одинаковом уровне внешних напряжений по поперечному сечению твердого тела в радиусе действия дислокационных сил эффективное напряжение сдвига слоев значительно отличается от его значений в объеме. В связи с этим поверхностные источники генерируют значительно большее число дислокационных петель и на большее расстояние от них по сравнению с объемными источниками, имеющими аналогичные конфигурацию и геометрию. Поскольку скорость движения дислокаций является функцией эффективного напряжения сдвига, то в приповерхностных микрообъемах кристалла скорость движения дислокаций может существенно превышать скорость их движения в объеме материала;

– отличия атомно-электронной структуры поверхностных слоев. Они могут проявляться во влиянии поверхностного пространственного заряда и дебаевского радиуса экранирования на величину и форму барьеров Пайерлса, а также в различии координационных чисел, параметров решетки, характера и типа межатомных связей и, как следствие этого, в различии динамических характеристик кристаллической решетки вблизи поверхности и в объеме кристалла. Различие атомно-электронной структуры и динамики кристаллической решетки в поверхностных и внутренних объемных слоях кристалла приводят к различию в проявлении основных механизмов диссипации энергии на дислокациях, движущихся в объеме кристалла и у его поверхности.

Отмеченные особенности состояния приповерхностных слоев приводят к аномальным условиям пластического течения. В [1] показано, что в общем случае протекание процесса микропластической деформации в приповерхностных слоях можно разделить на две основные стадии. На начальной стадии аномальное поведение выражается в облегченном образовании и движении дислокаций в приповерхностных слоях кристаллических материалов по сравнению с его внутренними слоями. Следствием стадии аномального пластического течения является барьерный эффект поверхности, т.е. стадии деформационного упрочнения на кривой напряжение – деформация у поверхности практически сдвинуты по фазе. Они опережают по времени аналогичные стадии объемной деформации и протекают у поверхности быстрее, чем в объеме материала. В результате вблизи поверхности образуется слой с повышенной плотностью дислокаций, так называемый «debris-слой», который тормозит развитие объемной деформации.

Особая роль приповерхностных слоев имеет место в формировании прочностных свойств металлических материалов. Как показано в [1], микропластическая деформация поверхностных микрообъемов предшествует макропластической, при этом в самых тонких приповерхностных слоях реализуются аномально облегченные энергетические условия деформации. Кроме того, что с образованием в процессе пластической деформации более прочного поверхностного слоя связывают существование физического предела текучести, эффекта появления зуба текучести (эффекта Хаазера-Келли) [2].

Влияние поверхности находит выражение как при хрупком объемном разрушении (прочность прямо пропорциональна поверхностной энергии), так и при вязком (понижение поверхностной энергии приводит к уменьшению величины критического напряжения, инициирующего разрушение) [3].

Согласно [4], величина прочности твердого тела на разрыв σ_* связана с абсолютной температурой T , долговечностью τ , относительным удлинением, при котором межатомная связь теряет устойчивость и разрушается ε_* , коэффициентом локальной перегрузки в месте разрыва α , величинами модуля Юнга E и коэффициентом линейного термического расширения α соотношением

$$\sigma_* = \frac{E\varepsilon_*}{\alpha} \left(1 - \frac{\alpha \ln \tau / \tau_0}{3\varepsilon_*} T \right).$$

Структура этого соотношения показывает, что наличие концентратора механических напряжений α не является единственной причиной низкой реальной прочности; прочность твердого тела зависит также от $\beta = \frac{\alpha T}{3\varepsilon_*} \cdot \ln \frac{\tau}{\tau_0}$ – термофлукционного фактора, т.е. в снижение реальной прочности вносит вклад эффект нелинейности сил межатомного взаимодействия, ангармонизм тепловых колебаний. В этой связи учет величины локального (поверхностного) коэффициента термического расширения, величина которого значительно больше его среднего значения в объеме тела [5], а также в зонах разрушения (устье трещины,

межзеренных границах), приобретают принципиально важное значение для решения проблем прочности и разрушения материалов и изделий из них.

2. Напряжения, деформация, повреждаемость и структурные изменения.

Рассмотрим взаимозависимости напряжений, деформаций и структурных изменений при объемном пластическом деформировании [6,7]. В основе закономерностей изменения состояния поликристаллического металла лежат представления о пластически-деструкционном характере деформации. Под деструкцией понимается появление и развитие при объемном пластическом деформировании первых микротрещин. Если иметь в виду деформирование одноосным статическим растяжением, то решающим с точки зрения начала развития деструкционных процессов является соотношение истинных напряжений и необратимых деформаций, возникающих в образце. В зависимости от этого соотношения можно характеризовать процессы, происходящие как в докритической, так и в критической и закритической стадиях разрушения. Так как при таком анализе имеется в виду деструкционные процессы в микроразделах объема металла, то можно предполагать очевидную зависимость трещинообразования от структуры. Другими словами, истинное напряжение, остаточная деформация и структура материала являются основными факторами, определяющими процессы пластического деформирования и деструкции. Эти три фактора могут быть объединены в аналитическую зависимость. Исследования черных и цветных металлов (железа, углеродистой стали, меди, никеля, алюминия и их сплавов) показали, что истинные напряжения течения S находятся в квадратичной зависимости от величины блоков деформированного металла (параметра субструктуры):

$$S = \alpha \cdot \varepsilon^{-1/2}$$

где ε – средний размер блоков; α – коэффициент, зависящий от материала и его предистории. При этом, как показали экспериментальные исследования, величина блоков $\varepsilon^{-1/2}$ линейно зависит от величины остаточной деформации $\delta^{1/2}$:

$$\varepsilon^{-1/2} = \varepsilon_0 + \mu \cdot \delta^{1/2}$$

где ε_0 – средний размер блоков до пластического деформирования. Из этих соотношений следует, что

$$S = S_e + \gamma \cdot \delta^{1/2},$$

где $\gamma = \mu \cdot \alpha$ – коэффициент пластичности; S_e – физический предел упругости, т.е. напряжение, ниже которого при данной скорости деформирования в металле не происходят структурные изменения (дробление структурных составляющих поликристаллического агрегата). Изучение диаграммы $S = f(\delta^{1/2})$ показало, что после достижения определенных значений остаточной деформации на кривых этих зависимостей наблюдается перелом. Характерная диаграмма такого вида для Армко-железа представлена на рис.1. Диаграмма указывает на стадийность деформирования металла, причем в общем случае можно определить три основные стадии процесса деформирования, каждая из которых характеризуется определенным механизмом: первая – до т.А, вторая – от т.А до т.В и третья – от т.В до т.С.

Рентгеноструктурные исследования и изучение плотности материалов показали, что до т.А физическое уширение интерференционной линии существенно увеличивается (на ~50%), а плотность, оцениваемая гидростатическим взвешиванием с точностью $\sim 10^5$ г/см³, изменилась очень мало. При переходе через т.А происходит резкое уменьшение скорости прироста физического уширения рентгеновской линии и увеличение дефекта плотности [8,9].

Рис.1. Полная диаграмма растяжения железа

Эти результаты дали основание считать, что на первой стадии происходит накопление дефектов кристаллического строения (дислокаций), т.е. она отражает дислокационный характер процесса пластического деформирования, а на второй – появление и развитие микроразрушений, причем, с увеличением остаточной деформации этот процесс становится определяющим. Отсюда следует, что точка перегиба (т.А) на диаграммах истинное напряжение – остаточная деформация соответствует началу деструкционного развития процесса пластического деформирования. Рекристаллизационный отжиг алюминия, деформированного с разной остаточной деформацией, показал, что микроскопические несплошности, возникшие при пластическом деформировании с $\delta < \delta_A$, залечиваются, в то время как после деформации с $\delta > \delta_A$ – они являются устойчивыми [8].

По мере увеличения δ вклад деструкционных процессов в деформацию возрастает. Соотношение доли деструкционной (δ_d) компоненты деформации к пластической (δ_p) характеризует коэффициент деструкции материала (Δ), а отношение пластической компоненты (δ_p) к общей остаточной деформации (δ) – коэффициент добротности (η). На первой стадии деформирования добротность тела постоянна и равна единице, рис.2. На

Рис.2. Изменения коэффициента добротности

второй стадии – суперпозиции пластической и деструкционной деформации – деструкция развивается во всем объеме тела, постепенно локализуясь в более узкой области – «шейке». Для железа вторая стадия деформирования заканчивается при коэффициенте добротности, равном $\sim 0,34$. Третья стадия – стадия локального процесса разрушения – протекает в узкой области продвижения магистральной трещины и заканчивается при коэффициенте добротности $\sim 0,12$. Отсюда следует, что Δ и η обладают высокой чувствительностью к изменению структуры с точки зрения накопления повреждаемости, поэтому могут надежно характеризовать степень развития деструкционных процессов в материале. Следует подчеркнуть, что, как показал опыт экспериментальных исследований, эти коэффициенты характеризуют механическое состояние металла не только непосредственно при пластической деформации, но и после предварительной термической или деформационно-термической обработки. Оценка коэффициентов (Δ и η) при истинных напряжениях, соответствующих сопротивлению разрыву, позволяет судить о предельной повреждаемости металла перед возникновением и развитием магистральной трещины вплоть до разрушения. Более того, зная положение т.А можно разделять материалы по характеристике пластичности, указывая на их механическое состояние с точки зрения накопленной при предварительной обработке повреждаемости.

Важным параметром при формировании свойств материала в условиях деформации является его состав. Согласно [6–8], в техническом железе деструкционные процессы получают развитие после остаточной деформации $\sim 9\%$, в стали с $0,3\%$ углерода они начинаются значительно раньше – при $\delta = 6\%$. Дальнейшее повышение содержания углерода в стали приводит к еще большему смещению т.А в сторону меньших остаточных деформаций. Это означает, что в высокоуглеродистой стали в момент разрушения существует значительно большая повреждаемость, чем в низкоуглеродистой. Одновременно происходит изменение положения т.А по шкале истинных напряжений: с увеличением содержания углерода истинные напряжения, при которых начинается деструкция, возрастают, причем скорость их прироста по отношению к изменению предела текучести значительно выше. Если сопоставить положение т.А в зависимости от содержания углерода в стали с механическими свойствами, то можно отметить существование качественной связи в изменении этих характеристик: чем больше углерода в стали, тем выше напряжение деструкции, ниже пластичность и остаточная деформация, при которой начинаются деструкционные процессы. Качественно иные результаты получаются при легировании углеродистой стали марганцем. Например, увеличение содержания марганца до $\sim 2,3\%$ в стали 30 слабо влияет на положение точки А, оцениваемое по величине остаточной деформации: она снижается с $5,5$ до $5,1\%$. Дальнейшее повышение содержания марганца до $3,3\%$ приводит к увеличению остаточной деформации до $6,5\%$. При этом непрерывно повышается истинное напряжение начала развития деструкционных процессов S_A : с 490 до 675 и 850 МПа соответственно. Как показали эксперименты, с увеличением количества углерода и марганца коэффициенты добротности сталей снижаются, а коэффициенты деструкции возрастают [9].

Следует особенно подчеркнуть, что характеристики механических свойств разных сплавов, приведенные выше, оценивались в условиях их объемной деформации, а параметры структуры определялись преимущественно рентгеновским методом, т.е. анализировали структурное состояние материала приповерхностных слоев до и после деформации. Следовательно, представленные выше соотношения отражают связи характеристик структурного состояния поверхностного слоя с характеристиками механического состояния объема деформированного металла или сплава и, соответственно, с эксплуатационными свойствами изделий из них. Примером связи свойств поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами изделий служат данные табл.1, которые иллюстрируют

изменение структурного состояния и фазового состава тончайших поверхностных микрообъемов образца титанового сплава ВТ9 после технологического процесса финишной обработки шлифованием при двух разных режимах. Видно, что шлифование изделия при повышенных скорости резания

Таблица 1

Структурное состояние поверхности сплава ВТ9 и характеристики механических свойств

Параметры шлифования	Толщина слоя, мкм	Физическое уширение α -фазы	Микродеформация кристаллической решетки α -фазы, $\Delta\alpha/\alpha \cdot 10^3$	Фазовый состав поверхностного слоя 0,5 мкм		σ_{-1} МПа	Число циклов до разрушения ($\sigma=480$ МПа)
				исходное состояние	после шлифования		
$V_p = 15$ м/с	0,3	5,9	2,1	$\alpha + \beta$	$\alpha + \beta$	475	$3,5 \cdot 10^6$
$h = 10$ мкм	3,8	4,3	1,5				
$V_u = 0,08$ м/с	6,5	4,1	1,4				
$V_p = 40$ м/с	0,3	23,0	8,0	$\alpha + \beta$	α	100	$2,8 \cdot 10^4$
$h = 40$ мкм	2,3	16,8	5,3				
$V_u = 0,08$ м/с	3,8	8,4	3,0				
	15,5	8,1	2,9				

($V_p=40$ м/с) и глубине шлифования ($h=40$ мкм) приводит не только к увеличению деформации кристаллической решетки деформированной зоны, но и к интенсификации диффузионных процессов в тончайших поверхностных микрообъемах. В слоях толщиной менее 0,5 мкм фиксируется распад β -фазы сплава и формирование «альфированных зон», при этом в подповерхностных слоях толщиной 2 мкм сохраняется двухфазная структура сплава. Анализ условий обработки, сравнительных усталостных испытаний и характеристик структуры деформированной зоны дает основание сделать вывод, что изменение фазового состава тончайших слоев, прилегающих к свободной поверхности, является основной причиной резкого понижения усталостной прочности (число циклов до разрушения при $\sigma = 480$ МПа составляет $3,6 \cdot 10^6$, когда $V_p = 15$ м/с, $h = 10$ мкм и $2,8 \cdot 10^4$ когда $V_p = 40$ м/с, $h = 10$ мкм). В результате совместного действия термических и атермических процессов при шлифовании, связанных с движением легирующих элементов по дислокационным трубкам, в поверхностных микрообъемах титанового сплава формируется комплекс физических и механических свойств, резко отличающихся от объема. Формирующееся структурное состояние приповерхностных слоев титанового сплава изменяет условия его объемного разрушения и снижает эксплуатационный ресурс изделий.

3. Особую роль играют поверхностные микрообъемы элементов трибосистемы, находящихся под нагрузкой и относительном движении, которые определяют весь сложный

комплекс реальных процессов контактного взаимодействия и внешнего трения, надежность и долговечность машин и механизмов.

Процесс разрушения поверхности твердых тел при трении связан с явлениями механической, физической и химической природы. Для контактного взаимодействия твердых тел характерен стохастический характер распределения и дискретность поверхностных сил и источников тепла; особенностью является наличие значительных градиентов полей напряжений, деформаций и температур. Все эти особенности находят выражение в изменении свойств материала деформированных поверхностных зон: формируется повышенная концентрация дефектов кристаллического строения, имеют место концентраторы напряжений, специфические структурные, фазовые и химические превращения, механотермическая активация поверхностных микрообъемов [10].

Согласно [11] процесс трения имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Она обусловлена преодолением адгезионных сил, возникающих между двумя телами, и преодолением сопротивления объемному деформированию материала. Главным фактором при трении является различие между прочностью адгезионной связи и прочностью нижележащих слоев. Если прочность поверхностного слоя ниже, чем в нижележащих слоях, то имеет место положительный градиент механических свойств по глубине, реализуется внешнее трение, и этот процесс определяют поверхностные свойства твердых тел; при этом все деформации сосредотачиваются в тонком приповерхностном слое. Это дало основание И.В.Крагельскому ввести понятие о «третьем теле» [11], формирование которого в области контактного взаимодействия твердых тел и соответственно его свойства играют первостепенную роль в процессе трения и поверхностного разрушения.

Рассмотрим существующие наиболее распространенные законы поверхностного разрушения [11]. Для преимущественно абразивного и адгезионного механизма изнашивания применяется аналитическое выражение Р.Хольма, М.М.Хруцова, Д.Ф.Арчарда, Е.Т.Баруэлла типа

$$I = kP/HB,$$

где I – интенсивность изнашивания, k – коэффициент, P – нагрузка, HB – твердость. Для фрикционной усталости закон разрушения И.В.Крагельского, Е.П.Непомнящего, Г.М.Харача имеет вид:

$$I = \sqrt{h/r} P_a / P_r k_1 \alpha_* / n,$$

где P_a – номинальное давление, P_r – фактическое давление, n – число циклов, которое выдерживает деформируемый микрообъем до разрушения, k – коэффициент, зависящий от расположения неровностей по высоте, α_* – отношение номинальной площади к площади трения, h – глубина внедрения единичной неровности, r – радиус неровности. Энергетическая теория изнашивания Г.Фляйшера основывается на законе поверхностного разрушения в виде

$$I = \bar{\tau}_{ед} / e^* = \bar{\tau}_{ед} V_u / S P f,$$

где $\bar{\tau}_{ед}$ – среднее напряжение сдвига, e^* – энергетическая характеристика разрушения, V_u – объем изношенного материала, f – коэффициент трения, S – путь трения. Закон поверхностного разрушения при трении, предложенный Н.Су, описывается уравнением вида

$$I = b/4\pi \left(\frac{K_1 G_1}{\sigma_1 S_{01}(1-\nu_1)} + \frac{K_2 G_2}{\sigma_2 S_{02}(1-\nu_2)} \right) NS,$$

где K_1, K_2 – константы, определяемые топографией поверхности, индекс 1 соответствует твердой поверхности, индекс 2 – мягкой, S_{01} и S_{02} – пути скольжения, соответствующие

сьему со всей поверхности одного слоя частиц износа, G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, σ – напряжение трения дислокаций, b – вектор Бюргерса. Некоторые новые взгляды на процесс поверхностного разрушения при трении и его оценки можно найти в [12,13], где предлагаются расчетные соотношения, содержащие физическую информативность и раскрывающие качественное и количественное влияние действующих факторов механической, физической и химической природы.

Приведенные аналитические выражения, описывающие законы поверхностного разрушения указывают, что плодотворность дальнейшего совершенствования в области теоретических обобщений, позволяющих уже на стадии проектирования деталей машин и механизмов решать задачи оптимизации, определяется уровнем знаний и прежде всего достоверной количественной экспериментальной информацией о свойствах, составе и строении поверхностных микрообъемов твердых тел при контактных взаимодействиях.

Структурное состояние поверхностного слоя, оказывая определяющее влияние на уровень разрушения узлов трения, радикально изменяют надежность и долговечность машин и механизмов. В работе [14] показано, что деформационное упрочнение при объемной деформации сжатием медных образцов до $\varepsilon = 30\%$ повышало предел текучести до величины 0,55 ГПа ($H = 1,65$ ГПа); в то время как при трении твердость возрастает до $H = 3,8$ ГПа, что соответствует пределу текучести около 1,26 ГПа. Эти результаты, наблюдавшиеся также многими исследователями, в свете работы [15] позволяют говорить о явлении специфического фрикционного упрочнения, механизм которого отличается от механизма объемного деформационного упрочнения. На рис.3 показана зависимость параметра упрочнения – физического уширения рентгеновских линий (311) меди (деформированной при трении на машине И-47 при скорости скольжения 0,5 м/с в условиях граничной смазки) от давления на разной глубине деформированной зоны.

Рис.3. Зависимость физического уширения рентгеновских линий ($\beta_{(311)}$) и предела текучести (K) от нагрузки.

1 – $\beta_{(311)}$ на глубине 0,3 мкм, 2 – 0,7 мкм, 3 – 2,0 мкм, 4 – предел текучести на глубине 0,3 мкм

Уширение линий у поверхности материала достигает наибольшего значения при наименьшей нагрузке. Поскольку, как показано выше, физическое уширение интерференционной линии

непосредственно связано с деформацией металла и плотностью дислокаций в зоне деформации, приведенные данные позволяют утверждать, что в поверхностных микрообъемах большая плотность дислокаций достигается при меньших давлениях на образец. Разные величины $\beta_{(311)}$ при нагрузках 1 и 3 МПа на глубине 2 мкм свидетельствуют о большей локализации пластической деформации при уменьшении нагрузок и существования двух зон: зоны аномального упрочнения от 0 до 2 мкм и зоны деформационного упрочнения на глубине более 2 мкм. Для объяснения причин аномального поведения предела текучести обращаемся к анализу адекватности механизмов упрочнения экспериментальным данным. Так как существенного упрочнения меди не наблюдается даже при высокоскоростной термообработке, то ролью фрикционного разогрева и температурных всплесков на пятнах касания можно пренебречь; по идентичным соображениям скоростная деформация не может дать наблюдаемой величины фрикционного упрочнения поверхности меди; исключается также наличие существенных диффузионных процессов. Наблюдаемая зависимость параметра упрочнения от нагрузки может быть объяснена лишь с позиций масштабного эффекта. Использование уравнения Мейера, описывающего степенную зависимость между нагрузкой на индентор и глубиной погружения индентора, позволило оценить вклад масштабного эффекта в упрочнение поверхности при деформации трением и получить выражение для относительного упрочнения двух материалов разной начальной твердости H_0 при разных номинальных нагрузках P_α [15]:

$$\Psi_{12} = [H_{02}/H_{01} (P_{\alpha 1}/P_{\alpha 2})^{0,14}]^k.$$

Аномалии поверхностного упрочнения обуславливают особенности развития разрушения в поверхностных слоях при сложном напряженном состоянии, которое иллюстрируются на рис.4. Для условий сухого трения представлено изменение экспериментального значения физического уширения рентгеновских линий меди по

Рис.4. Изменение физического уширения рентгеновских линий $\beta_{(311)}$ меди по глубине зоны деформации

глубине зоны деформации при контактном взаимодействии. Наличие переломов на кривой $\beta_{(hkl)}(t)$ является следствием образования микротрещин. Расстояние между экстремумами на

кривой служит оценкой толщины отслаивающихся частиц при разрушении (по представленным данным размер частиц износа составляет 10-20 мкм). В [16] предлагается аналитическое соотношение для оценки толщины зоны пониженной плотности дислокаций, ответственной за разрушение (и связанной с развитием дислокаций в поверхностных слоях, деформированных при контактном взаимодействии, и величиной поверхностного потенциального барьера):

$$h = Gb[4\pi(1 - \nu)\sigma_f],$$

при этом $\sigma_f = G\varepsilon^2 c$ – для твердых растворов, $\sigma_f = G\varepsilon c$ – для дисперсионно-твердеющих сплавов, где c – атомная концентрация легирующих элементов, ε – величина, характеризующая деформацию. Оценка величины h по указанному соотношению дает $h \approx 0,1$ мкм для железа с 3% Si, $h \approx 10-20$ мкм для меди.

Известно, что для снижения уровня поверхностного и объемного разрушения применяют разнообразные методы обработки поверхности. Рассмотрим влияние химико-термической обработки (азотирования) сталей разных структурных классов на характеристики структуры и свойств приповерхностных слоев и их связь с эксплуатационными свойствами изделий.

Исследовали стали перлитного и мартенситного классов 40X, 38X2МЮА, ВКС-7 и модельные сплавы на основе железа с ОЦК решеткой, легированные Cr, Mo, Al в количестве до 4ат.%, и на основе железа с ГЦК решеткой, легированные Ni (29ат.%), Cr, Al, Ti в количестве до 4ат.% [17].

На рис.5 представлено изменение физического уширения интерференционных линий $\beta_{(hkl)}$, твердости HV и износостойкости ε сплавов с α - и γ -основами, азотированных при разных температурах. В сплавах с α -основой (рис.5а) с уменьшением твердости и $\beta_{(220)}$ относительная износостойкость увеличивается. На кривой зависимости износостойкости от температуры азотирования существует максимум для стали 38X2МЮА, соответствующий 620°C. Результаты электронно-микроскопических исследований показали, что при повышении температуры азотирования до 620°C происходит увеличение размера нитридов легирующих элементов, уменьшение плотности их распределения и потеря когерентной связи с матрицей. Образование некогерентных частиц нитридов легирующих элементов снижает уровень микродеформации кристаллической решетки азотированного α -твердого раствора, что увеличивает запас пластичности и работоспособность при трении. Результаты испытаний реальных изделий, поверхности которых азотировали при 620°C, показали значительное увеличение ресурса их работоспособности [17].

В сплавах с γ -матрицей для всех температур азотирования наблюдается прямая корреляция между твердостью, износостойкостью и физическим уширением линий. Проведенные электронно-микроскопические исследования дали основание полагать, что такая корреляция обусловлена особенностями формирования структуры диффузионного слоя. В сплавах с γ -матрицей по мере повышения температуры азотирования формируются нестабильные зародыши нитридных фаз, когерентные и полуккогерентные кристаллической решетке матрицы. Стадии формирования структуры азотированного слоя обусловлены разной природой легирующих элементов, а характеристики механических свойств определяются особенностями дислокационной структуры в зависимости от связи и соотношений решеток матрицы и нитридов. Указанные стадии формирования структуры азотированного слоя находят прямое выражение в изменении работоспособности изделий.

На основе оценки характеристик структурного состояния приповерхностных слоев предложен способ определения режимов технологии химико-термической обработки поверхностных слоев конструкционных сталей и сплавов, которые обеспечат наилучшие эксплуатационные характеристики изделий из них. В основе способа лежит установленная

аналитическая взаимосвязь наиболее значимых характеристик структурного состояния поверхностного азотированного слоя, характеристик структуры деформированного при трении поверхностного микрообъема и уровня поверхностного разрушения азотированных конструкционных сталей при трении; работа базировалась на положениях теории безразмерного физико-механического комплекса для расчетов на износ

Рис. 5. Влияние температуры азотирования на микротвердость, физическое уширение интерференционных линий и износостойкость сплавов с α -матрицей (а) и γ -матрицей (б)

цементованных деталей зубчатых передач [18]. Применительно к азотированному диффузионному слою выявленный комплекс назван обобщенным структурным параметром азотированных сталей Π_a . В него входят основные характеристики структуры поверхностной диффузионной зоны: размер частиц нитридов легирующих элементов, расстояние между

ними, размер зоны сдвига при деформации, твердость материала зоны поверхностной пластической деформации при трении, уровень микродеформации кристаллической решетки, характеристики плотности дислокаций азотированного слоя и деформированной зоны, которые получены экспериментальными методами рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии и измерения твердости. С учетом преобразований применительно к азотированному состоянию сталей и сплавов и методикам определения их структурно-чувствительных характеристик, а также с учетом того, что экспериментально оценивалась величина относительной износостойкости в качестве параметра, характеризующего уровень поверхностного разрушения при трении, выражение для обобщенного структурного параметра азотированного поверхностного слоя имеет следующий вид [19]:

$$P_a = \frac{\left[H_0 + k_1 \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^{1/2} \right]^{1.75} \left[D \epsilon A (\beta_{np}^2 - \beta_0^2) \right]^2}{\left(k_2 + \frac{\pi D d_n}{L^2} \right)^2}.$$

В соотношении для P_a использованы коэффициенты, которые определялись следующим образом. Коэффициент k_1 учитывает отношение коэффициента геометрических параметров дислокационных петель и их распределение по линейным размерам к геометрическому коэффициенту формы зерна. Коэффициент k_2 отражает изменение твердости азотированного слоя в процессе поверхностной пластической деформации при трении. Его значение определяли из экспериментальных зависимостей $HV = f((\Delta d/d)^{1/2})$ для сталей, где $\Delta d/d$ – микродеформация кристаллической решетки поверхностного слоя при объемной деформации. H_0 – твердость диффузионной зоны. D – средний размер блоков когерентного рассеяния. L – расстояние между нитридами легирующих элементов, d_n – их размер. A – постоянный коэффициент, зависящий от упругих свойств материала, ϵ – вектор Бюргерса, β_0 , β_{np} – исходное и предельное значения физического уширения интерференционных линий на рентгенограмме азотированного поверхностного слоя. Для определения значения β_{np} пара трения с азотированным образцом испытывалась при трении до формирования задира, о котором судили по резкому увеличению коэффициента трения и появлению характерных повреждений поверхности. После этого зона поверхностной пластической деформации при трении исследовалась рентгенографически и оценивалась величина физического уширения интерференционных линий материала приповерхностного слоя, в котором создаются условия для реализации предельной повреждаемости при трении. Как показывает опыт структурных и трибологических исследований, в этих слоях достигается величина критической плотности дислокаций.

На рис.6 приведены результаты оценки величины обобщенного структурного параметра P_a и экспериментальные значения относительной износостойкости ϵ сталей. Видно, что между величинами P_a и ϵ существует линейная связь. Величина относительной износостойкости исследуемых сталей и сплавов изменяется в диапазоне от 0,9 до 4,5, при этом обобщенный параметр P_a принимает значения от $0,1 \times 10^5$ до $0,9 \times 10^5$. Два крайних значения соответствуют модельному сплаву типа Fe + 29%Ni + 4%(Cr, Al, Ti) при температуре азотирования 500–620°C и стали 38X2МЮА при температуре азотирования 620°C. Все остальные значения P_a и ϵ , соответствующие разным сплавам и разным условиям азотирования, укладываются в единую линейную зависимость, указывая на высокую чувствительность разработанного структурного параметра к параметру, характеризующему

уровень поверхностного разрушения. Величины, входящие в выражение Π_a : размер зоны сдвига, размер частиц второй фазы и их концентрация, твердость НВ, микродеформация кристаллической решетки, исходное и критическое значения плотности дислокаций, являются взаимосвязанными как в процессе технологической обработки, так и в условиях деформации и разрушения при трении. Поэтому выбор режима технологии азотирования не может быть основан на контроле какого-то одного параметра (в качестве которого на практике чаще всего выступает твердость). Средство контроля должно быть комплексным, учитывающим как объемные характеристики механических свойств, так и характеристики структуры поверхностных модифицированных слоев.

Рис.6. Взаимосвязь относительной износостойкости ϵ азотированных сталей и обобщенного структурного параметра Π_a зоны поверхностной пластической деформации азотированных сплавов

Заключение. Приведенные примеры особенностей структурного состояния зоны поверхностной пластической деформации свидетельствуют о кардинальном изменении свойств поверхностных микрообъемов твердых тел, и они существенно влияют на объемные эксплуатационные свойства изделий из металлических материалов. В настоящее время накоплен значительный экспериментальный и практический материал по влиянию состояния приповерхностных слоев металла на уровень разрушения в условиях объемного и поверхностного деформирования и эксплуатации. Реализация этой информации в создании фрикционных, антифрикционных и смазочных материалов, при разработке прогрессивных технологий направленной обработки конструкционных материалов, позволит существенно повысить работоспособность машин и механизмов.

Список литературы

1. Алехин В.П., Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. - М.: Наука, 1983. - 280 с.

2. Иванова В.С., Пойда В.Г., Смолякова Л.Г., Терентьев В.Ф. Особенности пластического течения предварительно деформированного молибдена // ФиХОМ. - 1969. - № 6. - С.61–69.
3. Махлин Е.С. Состояние поверхности и прочностные свойства. / В сб. «Механизм упрочнения твердых тел» под ред. М.Л.Бернштейна. - М.: Металлургия, 1965. - С.340–367.
4. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // ФТТ. - 1980. - Т.22, В.11. - С. 3344–3349.
5. Банщиков А.Г., Корсуков В.Е. Изучение поверхности твердых тел методом поляритонной спектроскопии // ФТТ. - 1980. - Т.22, В.8. - С.2368–2373.
6. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
7. Рыбакова Л.М. Деструкция металла при объемном и поверхностном пластическом деформировании // МиТОМ. - 1980. - № 8. - С.17–22.
8. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Влияние структурного состояния поверхностных микрообъемов на интенсивность разрушения твердых тел / Межведомственный сборник научных трудов. - М.: изд-во ВЗМИ, 1984. - С.80–105.
9. Рыбакова Л.М., Прусаков Б.А. К вопросу о деструкции металлов при пластическом деформировании / Межведомственный сборник научных трудов. - М.: изд-во ВЗМИ, 1984. - С.105–116.
10. Поверхностная прочность материалов при трении. Под ред. В.И.Костецкого. - Киев: Техника, 1976. - 293 с.
11. Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.
12. Дроздов Ю.Н., Фролов К.В. Теоретико-инвариантный метод расчета интенсивности поверхностного разрушения твердых тел при трении// Поверхность. Физика, химия, механика. - 1982. - № 5. - С.138–145.
13. Дроздов Ю.Н. Обобщенные характеристики для оценки износостойкости твердых тел // Трение и износ. - 1980. - Т.1, № 3. - С.417–424.
14. Крагельский И.В., Алексеев Н.М., Рыбакова Л.М., Назаров Ю.Н. Влияние степени упрочнения материалов в процессе трения на их стойкость против задира // Машиноведение. - 1977. - № 6. - С.88–94.
15. Алексеев Н.М., Куксенова Л.И., Правдухина Е.М., Рыбакова Л.М., Шапиро А.М. Исследование фрикционного упрочнения поверхностных слоев меди в режиме граничного трения // Трение и износ. - 1982. - Т.3, № 1. - С.33–42.
16. Sun N.P. The delamination theory of wear // Wear. - 1973. - V. 25, № 1. - P. 111–124.
17. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. - М.: изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. - 518 с.
18. Дроздов Ю.Н., Рыбакова Л.М., Литвинов И.П., Павлик Б.Б., Сидоров С.А. Кинетика разрушения конструкционных сталей при трении // Трение и износ. - 1989. - Т.10, № 5. - С.773–778.
19. Алексеева М.С., Куксенова Л.И. Методы оценки характеристик структурного состояния поверхностных слоев азотированных сталей и сплавов / Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН «Трибология – машиностроению». - М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. - С.18–21.

Дата поступления: 18 февраля 2019 г.

УДК 621.036:681.20

ТКАНЫЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ И АРКТИКА

© Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование тканых электронагревателей при различных режимах работы, их электрических контактных соединений, тепловыделяющих элементов, рассмотрены особенности технологии изготовления тканых электронагревателей, особенности формирования создаваемых ими тепловых полей. Рассмотрены примеры изделий с электрообогревом на основе тканых электронагревателей для арктических условий. Элементы технологии производства тканых электронагревателей и целого ряда изделий с электрообогревом являются оригинальными, запатентованными разработками. Технология использовалась для изготовления серийных изделий. Данный материал представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся разработкой и внедрением изделий с электрообогревом.

Ключевые слова: тканые электронагреватели, тепловыделяющие элементы на основе углеродных (графитовых) нитей, контактные соединения, арктические условия применения.

WOVEN ELECTRICAL HEATERS AND ARCTIC

© A. A. Shulzhenko, M. B. Modestov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Abstract. A study of woven electrical heaters was conducted in various operating modes. Their electric contact connections, fuel generating elements, the technology of manufacturing fabric electric heaters, the formation of their thermal fields were considered in the paper. Examples of products with electric heating based on woven electrical heaters for Arctic conditions were given. Some elements of the manufacturing technology of woven electrical heaters and a number of products with electrical heating are original, patented developments. The technology was used for serial production. This study is of interest to a wide range of professionals involved in the development and introduction of products with electrical heating.

Keywords: woven electrical heaters, fuel generating elements based on carbon (graphite) filaments, contact connections, Arctic application conditions.

Введение. Необъятный край нашей страны располагается в арктическом регионе. Он обладает огромными запасами полезных ископаемых: нефти, газа, драгоценных металлов, алмазов, железной руды и т.д.

Но добраться до них не так просто. Связано это, в первую очередь, с низкими температурами, господствующими в этом регионе. Так зимние значения температур

достигают до -65°C . При таких температурах остро встают проблемы, связанные: с обеспечением безопасности деятельности человека в Арктике, с созданием устойчивых к холоду материалов, используемых для строительства, с созданием технических средств, в том числе, и машин способных работать в суровых условиях Арктики и т.д.

Эта особенность всегда была очевидна, поэтому государство оказывало и оказывает повышенную поддержку региону для его успешного развития.

Так, в девяностых годах прошлого столетия была принята и финансировалась Президентская программа «Техника Российского Севера».

В настоящее время Президентом Российской Федерации утверждены «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу», в рамках которых необходимо обеспечить достаточный уровень для решения задач обороны и безопасности, а также надежного функционирования систем жизнеобеспечения и производственной деятельности в природно-климатических условиях Арктики.

Накопленный теоретический и практический опыт в Институте Машиноведения им. А.А.Благонравова РАН в области создания различных систем и узлов машиностроительной техники по ряду направлений уже используется и еще может с успехом использоваться для решения проблем, имеющих в условиях Арктики, например, для создания фрикционных и антифрикционных материалов и разработки эффективных тормозных устройств, повышения надежности и ресурса работы топливных насосов газотурбовозов, работающих на сжиженном газе и т.д.

В рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020гг, пункт 30 «Методы анализа и синтеза многофункциональных механизмов и машин для перспективных технологий и новых человеко-машинных комплексов, динамических и виброакустических процессов в технике», подпункт «- разработка методов анализа и синтеза устройств обогрева на основе тканых нагревателей» проводится работа по формированию тепловой защиты для различных технических устройств и биологических объектов, в том числе, и человека.

Решение вопроса обогрева работников, работающих на открытом воздухе в условиях Арктики, с помощью пассивных средств защиты является довольно сложным делом. Во многом оно определяется не только низкими температурами, а и другими факторами: ветровыми составляющими, влажностью в данном регионе, длительностью пребывания на открытом воздухе, активностью работающего и т.д., что усложняет проблему. Рассчитано, что теплозащитные свойства традиционной одежды ограничены и обычно не превышают 6 Кло ($0,950 \text{ м}^2 \cdot \text{C}^{\circ}/\text{Вт}$). Недостатком использования пассивных средств теплозащиты является то, что в одежде, созданной на этих принципах, вследствие ее большой толщины, невозможно активно перемещаться, так как она имеет большой вес и габариты [1].

Попытки создать одежду с использованием в ней полуактивных теплозащитных материалов, например, теплоотражающих пленок, также привела в тупик, так как в этом случае существенно ухудшается циркуляция воздуха в слоях одежды под пленкой, что приводит к повышению потовыделения у человека, одетого в такую одежду. Это способствует образованию повышенной влажности и, как следствие, замерзанию ее на холоде. Такая одежда становится неэластичной, «дубеет», и делается непригодной для носки.

Поэтому наиболее перспективными для защиты человека от низкотемпературных воздействий являются способы, в которых используются активные формы теплозащиты.

Одним из таких способов является применение тканых электронагревателей (далее нагревателей) в слоях одежды.

Тканые электронагреватели. Сотрудниками института были разработаны перспективные энергосберегающие технологии, обеспечивающие обогрев на основе тканых нагревателей (рис.1) различных объектов, как технического назначения, так и биологических, в том числе и человека.

Рис. 1. Тканый электронагреватель.

В процессе испытаний было выявлено, что созданная электронагревательная ткань (рис. 1) и нагреватели на ее основе обладают следующими возможностями:

- благодаря своей эластичности, позволяют обеспечить хорошее прилегание электронагревательного элемента, изготовленного из этой ткани к обогреваемому объекту и принятие его формы, что позволяет добиться высокой степени энергосбережения, так как в этом случае полученное от нагревателя тепло более эффективно обеспечивает обогрев объекта, что очень важно, особенно при использовании такого нагревателя в автономном режиме, при запитывании его от автономных источников электропитания;
- параллельное подключение тепловыделяющих элементов обеспечивает высокую надежность работы тканого нагревателя. Так обрыв одного тепловыделяющего элемента не выводит из строя весь нагреватель. Например, когда в нагревателе используются 44 углеродной нити (нагреватель для жилета), такой дефект приведет к потере мощности тканого электронагревателя чуть более 2%;
- параллельную структуру имеют в тканом нагревателе и контактные площадки из низкоомных нитей, соединяющие между собой углеродные нити, и служащие для подключения проводов. Такая структура контактных площадок способствует получению невысокого значения электрического сопротивления, как правило, существенно ниже сопротивления самого нагревателя, кроме того, обеспечивает высокую степень электрической надежности контактных соединений;
- эластичность тканых нагревателей создает комфортное ощущение у пользователей в динамике, так как структура электронагревательной ткани, используемой для обогрева биологических объектов, в том числе и человека, обычно состоит на 95% из естественных, например, хлопчатобумажных или льняных нитей, что обеспечивает нормальный воздухообмен в системе человек- тканый нагреватель-одежда-внешняя среда;
- электронагревательная ткань в своем рапорте содержит, как правило, не одну, а несколько заготовок нагревателей, то есть она имеет матричную структуру;
- матричная структура ткани и возможность автоматического переключения режимов станка позволяют получать при непрерывной работе ткацкого станка (без дополнительной перенастройки) не один тип заготовок нагревателей, а несколько;
- изготовление электронагревательной ткани производится на стандартном ткацком оборудовании;

- нагреватели из электронагревательной ткани работают от самых различных низковольтных источников электропитания (6В, 12В, 24В): бортовых транспортных средств и спецтехники, аккумуляторов, батареек, солнечных модулей, и очень перспективных в условиях Арктики термогенераторов, что обеспечивает высокую степень электробезопасности. От стационарных сетей питание нагревателей производится через адаптер;

- в качестве тепловыделяющих элементов в ней используются углеродные (графитовые) нити. Данные нити по своим параметрам, например электрическому сопротивлению, имеют разброс $\pm 10\%$ [2], однако, благодаря их параллельному подключению в нагревателе, разброс параметров существенно снижается. Так при изготовлении нагревателей, имеющих 22 параллельные углеродные нити, разброс их электрических сопротивлений не превосходил 3%.

Технология изготовления тканых нагревателей рассчитана на массовое производство. Так, например, для изготовления нагревателей для жилетов с электрообогревом из 100 погонных метров ткани было сделано ~500 нагревателей. А что такое 100 м ткани для ткацкого производства?

С ростом объемов производства и цена нагревательных элементов, получаемых из электронагревательной ткани, существенно падает.

Еще одним положительным фактором, говорящим в пользу применения данной технологии является возможность диверсификации ткацкого производства, что обеспечивает ему большую устойчивость.

Кроме того, в качестве фоновых, электроизоляционных нитей часто используются нити изо льна, что так же полезно для поддержки отрасли по производству льна.

Следует подчеркнуть, что тканые нагреватели могут обеспечивать температуры, предназначенные не только для обогрева человека, а и для создания нагревательных систем с более высокими уровнями температур, что позволяет расширить их сферу применения и использовать для обеспечения работы различных технических устройств.

Технология изготовления нагревателей состоит не только из технологии изготовления электронагревательной ткани на ткацком оборудовании. Она включает в себя еще производство контактных элементов [3], соединяющих провода с ткаными контактными площадками нагревателей, электромонтаж разъемных соединений, терморегуляторов и т.д.

Особенностью технологии изготовления тканых нагревателей является требование к возможности адаптации всей конструкции нагревателя ко всему или к отдельным частям обогреваемого объекта [4]: биологическому объекту или техническому устройству по различным параметрам, в первую очередь, по температурному режиму, электрическому напряжению и т.д.

Были проработаны теоретические аспекты тканых электронагревателей и их использования в изделиях.

Теоретические предпосылки для создания тканых электронагревателей. Электрические параметры нагревательного элемента определяются с одной стороны требованиями по обогреву обогреваемого объекта, а с другой стороны возможностями элементов, входящих в структуру нагревателя. Как правило, в качестве тепловыделяющих элементов в тканых нагревателях, обеспечивающих режим обогрева – режим «мягкого тепла», используют углеродные нити, а контактные площадки строят на основе низкоомных нитей. Промежуточное пространство заполняется электроизоляционными фоновыми нитями.

Структура самого простого нагревательного элемента из пяти эластичных тепловыделяющих элементов показана на рис. 2.

Электрическая эквивалентная схема такого тканого электронагревателя показана на рис. 3.

Рис. 2. Электрическая монтажная схема тканого нагревателя, состоящего из 5 углеродных и 5 мишурных нитей.

1 – углеродные нити, 2 – мишурные нити, 3 – фоновые нити, 4 – контактные площадки, 5 – активная длина углеродных нитей l_a , 6 – расстояние между мишурными нитями в контактных площадках l_n , 7 – расстояние между углеродными нитями, 8 – средство соединения мишурных нитей в контактной площадке с проводом, 9 – провода, 10 – источник электропитания; 11 – фоновые электроизоляционные нити.

Эквивалентная схема даже такого простого нагревателя, приведенная на рис. 2, представляет собой сложную электрическую систему (рис. 3), содержащую 37 контуров, описываемых системой уравнений, составленной в соответствии со вторым законом Кирхгофа.

$$\begin{cases} I_1 R_{11} + I_2 R_{12} + I_3 R_{13} + \dots + I_n R_{1m} = U_1 \\ I_1 R_{21} + I_2 R_{22} + I_3 R_{23} + \dots + I_n R_{2m} = U_2 \\ I_1 R_{31} + I_2 R_{32} + I_3 R_{33} + \dots + I_n R_{3m} = U_3 \\ I_1 R_{41} + I_2 R_{42} + I_3 R_{43} + \dots + I_n R_{4m} = U_4 \\ \dots \\ I_1 R_{n1} + I_2 R_{n2} + I_3 R_{n3} + \dots + I_n R_{nn} = U_n \end{cases} \quad (1)$$

Эту систему уравнений можно решить любым из известных методов, например, методом последовательного исключения Гаусса [5].

Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема тканого нагревательного элемента, показанного на рис. 2.

1 – сопротивления углеродных нитей в пределах активной части тканого нагревательного элемента R_a , 2 – сопротивления углеродных нитей между мишурными нитями в контактных группах R_b , 3 – сопротивления мишурных нитей между углеродными нитями в контактных группах R_n , 4, 6 – контактные группы, 5 – активная часть нагревательного элемента.

В результате решения уравнения (1) для нагревателя, показанного на рис. 2, было найдено, что сопротивление контактной площадки составляет $R_{\text{конт}5} = 0,545 \text{ ом}$, сопротивление самого нагревателя – $25,4 \text{ ом}$, следовательно, сопротивление контактной площадки не превосходит 2,1% от значения сопротивления самого нагревателя. Такое низкое сопротивление контактной площадки обеспечивает высокую электрическую надежность нагревательного элемента.

С помощью тканых нагревателей можно формировать и использовать для решения многочисленных задач тепловые поля различных уровней и форм. Ниже на рис. 4 представлены результаты моделирования наиболее часто встречающегося теплового поля тканого нагревателя с тепловыделяющими элементами на основе углеродных нитей, расположенных на одинаковом расстоянии от соседних нитей [5].

При разработке методик расчета были получены и использованы не только плоскостные, но и объемные модели тепловых полей, создаваемых ткаными нагревателями (рис. 5) [6].

Исследовались также не только статические, но и динамические характеристики тепловых полей. На этом рис. 6 показаны результаты моделирования изменения температуры в слоях одежды (пространственная ось X) во времени (временная ось t).

Рис. 4. Распределение температуры на поверхности нагревателя, состоящего из одной полосы из 5 параллельных углеродных нитей, соседние нити, в пределах этой полосы, находятся на одинаковом расстоянии друг от друга.

Рис. 5. Объемное представление температурного распределения на поверхностях тканого электронагревателя.

Рис. 6. Модель динамического процесса нагрева тканого электронагревателя в слоях одежды.

Полученные в процессе моделирования данные с успехом можно использовать при создании не только одежды с электрообогревом, а и различных нагревателей для устройств технического назначения.

В ходе исследования элементов одежды, их взаимодействия с обогреваемым объектом, были обнаружены эффекты, позволяющие получать количественные данные о реакции человека на воздействие тепловых полей тканых нагревателей, находящихся в изделиях на поверхности тела. Эти данные расширяют представления о тепловых свойствах человеческого организма, и позволяют использовать их при конструировании одежды с электрообогревом [9].

При проведении работ по созданию различных устройств с электрообогревом были затронуты и фундаментальные проблемы генерации тепла тепловыделяющими элементами из углеродных (графитовых) нитей. Рассмотрены вопросы взаимодействия электронов с фононами в графите. Разработана методика проведения тепловых расчетов с учетом данного эффекта. Знание физических процессов, происходящих в тепловыделяющих элементах (в нашем случае углеродных нитях), позволяет лучше адаптировать создаваемые устройства с объектами обогрева, а также эффективнее использовать автономные источники электропитания [7].

При исследовании тканых нагревателей и их тепловых полей применялись современные методы фрактальной геометрии, так как тепловыделяющие элементы - углеродные нити представляют собой мультифрактальные структуры, то есть структуры образованные аффинными множествами филаментов, из которых состоит нить. Фрактальное представление тепловыделяющих элементов позволило выяснить причины, приводившие к большим отличиям (~10 раз) между расчетными результатами при использовании ранее широко применяемой цилиндрической модели и экспериментальными данными [8].

Закключение. Проведенные исследования позволяют обеспечить более правильный подход к проектированию не только одежды для Арктики, но и к решению других Арктических проблем на основе использования тканых нагревателей [10], а разработанная технология обеспечить практическую реализацию.

Данный материал может представлять интерес для специалистов, работающих в сфере жизнеобеспечения в Арктике.

Примеры использования тканых нагревателей. На основе созданной технологии был освоен и серийно выпущен целый ряд изделий с электрообогревом, что позволило провести практическую апробацию данной технологии и на этой базе осуществить ее усовершенствование. Основой данной технологии является электронагревательная ткань. Структура электронагревательной ткани была запатентована [11, 12].

Как уже отмечалось, тканые нагреватели с успехом использовались как в обычной одежде [4], так и в комплектах специальной одежды, например, для водителей транспортных средств. Возможно использование подобной одежды и для водителей снегоходов.

Так для Выксунского металлургического завода была разработана и изготовлена партия жилетов с электрообогревом. Жилеты с ткаными нагревателями предназначались для автокащиков и крановщиков (рис. 7). Они показали свою высокую эксплуатационную надежность.

Рис. 7. Образец жилета с электрообогревом, выпущенного для Выксунского металлургического завода.

Исследования, проводившиеся во Всероссийском центре медицины катастроф «Защита» совместно с ИМАШ РАН, показали, что данные электронагреватели можно применять и в специальных медицинских изделиях, например, в комплектах для транспортировки пострадавших от гипотермии (рис. 8).

Рис. 8. Комплект для транспортировки пострадавших от гипотермии.

Еще одним примером применения тканых электронагревателей может служить решение одной из задач обеспечения экологической безопасности в районах Арктики - утилизации отходов жизнедеятельности человека. С этой целью организацией ООО «Экосервис» была разработана технология с использованием тканых нагревателей, разработанных сотрудниками института, позволяющая проводить утилизацию отходов круглогодично. ОАО «Опытным заводом № 31 Гражданской авиации» эта технология была освоена и налажен выпуск туалетов с обогреваемыми баками для Таймыра.

Здесь приведено незначительное число примеров, возможного решения задач для Арктики с применением тканых электронагревателей, а таких задач, требующих обогрева - много: обогрев измерительных устройств, в том числе дефектомеров для нефтяных и газовых труб, обогрев нефтяных и газовых расходомеров, обогрев компрессоров, работающих на открытом воздухе, обогрев аккумуляторов для автомобилей, создание специзделий для человека, в том числе и водолазных костюмов с обогревом, обогрев питания, обогрев животных и т.д.

Конечно, нельзя забывать, что тканые электронагреватели можно использовать для обеспечения комфортных условий в домах жителей Арктических регионов, например, в виде жалюзи с обогревом на окнах и дверях, ковриков с обогревом и т.д.

Как видим, применение тканых нагревателей предоставляет широкие возможности не только обеспечить выживание людям в суровых арктических условиях, а и комфорт, обеспечить работоспособность технических устройств.

Список литературы

1. Афанасьева Р.Ф. Гигиенические основы проектирования одежды для защиты от холода. - М.: Легкая индустрия, 1977. - 136 с.
2. Технические характеристики продукции. ООО «УВИКОМ». Проспект. - М.О.: ООО УВИКОМ, 1997.
3. Шульженко А.А., Корнев В.Н., Модестов М.Б., Пичко П.Г., Чудов В.А. Средство соединения проводов с проводником из мягкого материала (варианты), патент РФ № 2210148, М., 2003, Бюллетень № 22, 16 с.
4. Шульженко А.А., Корнев В.Н., Модестов М.Б. Одежда с электронагревательной тканью, свидетельство на полезную модель № 9123, М., 1999, Бюллетень № 2, 4 с.
5. Шульженко А.А. Анализ и синтез устройств обогрева узлов машин. Диссертация. ИМАШ РАН, 2011, 142 с.

6. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Тканые электронагревательные элементы и примеры их применения// Вестник научно-технического развития. – 2017. - №7. - С. 30-40.
7. A.A.Shul'zhenko, M.B.Modestov. Method of Disigning Heating Units on the Basis of Carbon (Graphit) Threads. ISSN 1052-6188// Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2015. - vol. 44, No 4. - P. 389-394.
8. Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Шульженко А.А., Модестов М.Б. Диагностика тканых электронагревателей на основе углеродных нитей// Сборник трудов международной конференции «Живучесть и конструкционное машиноведение. ЖИВКОМ - 2016». - ИМАШ РАН. - 2016. - С. 200-203.
9. Шульженко А.А., Модестов М.Б., Модестов Б.М. Способ измерения реакции потовых желез человека при наличии теплового воздействия. Патент № 2578864, М., 2016, Бюллетень № 9.
10. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Особенности использования тканых электронагревателей для обеспечения работоспособности технических устройств в условиях Арктики// Сборник трудов конференции «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике». - ВИАМ. - 2015. - С. 37.
11. Шульженко А.А., Первушин В.П., Корнев В.Н., Колпаков В.В. «Электронагревательная ткань», патент РФ № 2109091, М., 1998, Бюллетень № 11, 14 с.
12. Шульженко А.А., Корнев В.Н., Модестов М.Б. «Электронагревательная ткань, нагревательный элемент на ее основе и средство соединения нагревательного элемента с источником электропитания (варианты)», патент РФ № 2145984, М., 2000, Бюллетень № 6, 24 с.

Дата поступления: 20 февраля 2019 г.