

ОТЗЫВ

официального оппонента

д.ф.-м.н., доцента Астафуровой Елены Геннадьевны
на диссертационную работу Хусаинова Юлдаша Гамировича
на тему «Разработка и научное обоснование новых технических решений
формирования упрочненных поверхностных слоев при локальном ионном
азотировании сталей», представленную на соискание ученой степени доктора
технических наук по специальности

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Актуальность темы диссертации. Ионное азотирование – хорошо зарекомендовавший себя метод поверхностного упрочнения деталей машин, рабочих инструментов и технологической оснастки различных размеров и конфигураций. Но условия их эксплуатации диктуют дополнительные требования к методам и режимам упрочняющих обработок. Детали и инструменты, такие как зубчатые венцы, коленчатые валы, шестерни, режущий и штамповый инструмент, как правило, подвержены локальному износу в процессе эксплуатации и в ряде случаев нет необходимости проводить обработку всей поверхности детали для улучшения ее эксплуатационных характеристик. В этой связи возникает необходимость разработки упрочняющих обработок для определенных, локальных участков инструмента или детали. Предложенные в рамках диссертационной работы Ю.Г. Хусаинова новые подходы к решению описанной выше проблемы, основанные на использовании азотирования с полым катодом, в магнитном поле и с предварительным деформационным измельчением структуры материала, позволят решить актуальную научную проблему локального упрочнения деталей машиностроения, имеющую важное народно-хозяйственное значение. Реализация предложенных в диссертации подходов позволит снизить себестоимость технологической операции ионного азотирования за счет сокращения длительности обработки и уменьшения энергозатрат.

Структура, объем и содержание диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи разделов, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 359 страницах, содержит 202 рисунка, 17 таблиц и список литературы из 202 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и приведена аргументация для применения локального ионного азотирования деталей

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»	
за № _____	_____
Дата регистрации _____	02.06.2023
Фамилия регистратора _____	_____

машин, работающих в условиях локального износа. Отражена степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

В первом разделе проведен анализ современного состояния исследований по тематике диссертационной работы и описаны основные направления развития методов локальной химико-термической обработки материалов. Рассмотрены способы повышения эффективности процесса ионного азотирования. Описаны литературные данные о моделировании диффузионных процессов в конструкционных материалах.

Во втором разделе сформулирована научная гипотеза, описаны исследуемые материалы и методы их обработки. Приведено подробное описание установки, используемой для реализации локального ионного азотирования. Описаны методы исследования структуры, фазового состава и свойств изучаемых материалов.

В третьем разделе диссертации представлены оригинальные результаты по моделированию параметров плазмы тлеющего разряда методом конечных элементов и выполнено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными зондовых измерений параметров плазмы в полости технологического экрана при локальном ионном азотировании с полым катодом: температуры поверхности детали, вольт-амперных характеристик разряда, распределения концентрации электронов и ионов и др. Разработанная компьютерная модель позволила учесть неоднородность параметров плазмы тлеющего разряда в полости технологического экрана и за ее пределами, а также прогнозировать результаты упрочняющей обработки для стальных деталей сложных конфигураций. Приведено описание разработанного программного обеспечения, позволяющего прогнозировать толщину и фазовый состав диффузионного слоя с учетом размера зерна в детали.

В четвертом разделе диссертации описаны полученные экспериментально данные о структурно-фазовых превращениях в поверхностных слоях образцов из конструкционных сталей 13X11H2B2MФ-Ш и 12X18H10T, обработанных с использованием разработанного в диссертационном исследовании оригинального способа интенсификации диффузионного насыщения при низкотемпературном

локальном ионном азотировании. Этот способ основан на обработке предварительно измельченной структуры материала (методом интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением и фрикционном деформировании поверхности стальных образцов) и получении в материале структуры с высокой плотностью дефектов. Показано, что такой подход позволил сформировать на модельных образцах диффузионный слой, толщина которого более чем в два раза превышает толщину диффузионного слоя на образцах, не прошедших предварительное деформационное измельчение. Установлено, что после интенсивной пластической деформации кручением и последующего ионного азотирования сталей марок 12Х18Н10Т и 13Х11Н2В2МФ-Ш при температурах 450°С, 500°С, 550°С сохраняется характерная для метода кручения под давлением радиальная зависимость значений микротвердости. Подробно описано изменение микроструктуры, фазового состава и микротвердости исследуемых модельных образцов, происходящее на всех этапах обработки, приведены данные о триботехнических свойствах стальных образцов. Показано, что для промышленного применения полученных результатов низкотемпературного локального ионного азотирования сталей оптимален способ предварительной наноструктурирующей фрикционной обработки поверхности стальных образцов для формирования ультрамелкозернистой высокодефектной структуры в локальных областях материала.

Пятый раздел посвящен исследованию способа локального ионного азотирования с полым катодом образцов сталей 16Х3НВФМБ-Ш и 38ХМЮА. Показано, что использование ионного азотирования с полым катодом при температуре обработки 550°С (12 ч) позволяет создавать в поверхностном слое стальных образцов упрочненные слои, толщина которых более чем в два раза выше, чем при использовании традиционного ионного азотирования. Исследование микроструктуры и микротвердости образцов, обработанных методом локального ионного азотирования с полым катодом, показало, что они обладают повышенными механическими и эксплуатационными характеристиками вследствие формирования в поверхностном слое исследуемых сталей гетерофазной структуры, состоящей из ϵ и γ' фаз, а также высокой доли нитридов и карбонитридов. Показано, что структура, фазовый состав и толщина упрочненного слоя может быть изменена за счет выбора

параметров процесса ионного азотирования и конфигурации технологического экрана.

В шестом разделе изучены структурно-фазовый состав и механические свойства стали марки Р6М5 после локального ионного азотирования в магнитном поле с предварительным деформационным измельчением структуры материала методом кручения под высоким давлением. Предварительная интенсивная пластическая деформация способствовала фрагментации нерастворимых карбидных частиц и их перераспределению в объеме материала. За счет деформационной обработки удалось увеличить протяженность зон диффузионного насыщения, формируемых при азотировании, и добиться плавного распределения микротвердости по толщине упрочненного слоя, повысить износостойкость материала вследствие формирования гетерофазного состава, позволяющего упрочненному слою выдерживать большие нагрузки без разрушения.

В седьмом разделе исследовано влияние содержания водорода в составе насыщающей смеси и влияние температуры диффузионного насыщения при ионном азотировании на параметры микроструктуры и микротвердость сталей марок 16ХЗНВФМБ-Ш, 38ХМЮА, 12Х18Н10Т, 13Х11Н2В2МФ-Ш. На основании результатов исследований в рамках диссертационной работ были разработаны и внедрены новые технологические процессы локального ионного азотирования с полым катодом, в магнитном поле, а также низкотемпературного ионного азотирования.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Обоснованность и достоверность основных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы обеспечивается тщательным анализом имеющихся литературных источников, подтверждается комплексом экспериментальных данных, полученных с использованием современных методов исследования структуры, фазового состава, механических и эксплуатационных свойств исследуемых материалов, а также соответствием расчетных и экспериментальных данных. Основные положения работы, выводы и рекомендации подтверждены экспериментально и реализованы в промышленности.

Научная новизна и практическая значимость результатов диссертационных исследований. В работе разработаны новые научно обоснованные подходы к обработке сталей методом локального ионного азотирования, позволяющие целенаправленно воздействовать на толщину, фазовый состав, микротвердость и износостойкость поверхностного слоя материала в локальных его участках. Эти подходы базируются на детальном анализе влияния различных параметров ионного азотирования (температуры, состава насыщающей смеси газов, использование полого катода, приложение магнитного поля) и особенностей фазового состава и микроструктуры обрабатываемых сталей на закономерности формирования упрочненных слоев и их свойства. Впервые выявлена роль измельчения зерна, фрагментации вторичных фаз, формирования дефектной структуры с высокой плотностью дефектов кристаллического строения, обусловленных процессами интенсивной пластической деформации, на закономерности образования диффузионных упрочненных слоев при ионном азотировании сталей разных классов. Впервые установлено влияние содержания водорода в составе насыщающей смеси газов при ионно-плазменной обработке на характеристики диффузионных поверхностных слоев в сталях.

Практическая ценность полученных результатов базируется на разработанных перспективных технологических процессах обработки сталей разных классов. В частности, разработаны и рекомендованы к внедрению технологический процесс локального ионного азотирования с полым катодом детали «шестерня» (ПАО «ОДК-УМПО»), технологический процесс низкотемпературного локального ионного азотирования детали «шток» пакерно-якорного оборудования (НПФ «Пакер»). Разработан и внедрен (АО «БелЗАН») технологический процесс комбинированного многослойного упрочнения просечных пуансонов, позволяющий повысить стойкость инструмента.

Замечания по работе:

1. Из текста диссертации не ясно, как была определена и от каких параметров моделирования зависит погрешность расчетных величин на рисунках 3.2–3.6. Следовало бы указать величины погрешности для экспериментальных данных, приведенных на этих рисунках. Не ясно, зачем проведена аппроксимация зависимостей на рисунках 3.2–3.6, кривые не всегда корректно описывают

полученные данные. Можно было ограничиться построением огибающих или соединить «по точкам» полученные значения, либо формализовать зависимости.

При указании коэффициентов диффузии в разделе 3 следовало указывать температуры, которым они соответствуют.

2. Автору, к сожалению, не удалось избежать неудачных формулировок при описании микроструктуры сталей и взаимодействия дислокаций в разных системах скольжения. В частности, на странице 140 указано, что «под действием напряжений дислокации движутся и встречаются с перпендикулярно направленными дислокациями...». Во-первых, не понятно, что именно имеет в виду автор, говоря о направлении дислокации, – ее вектор Бюргера или линию дислокации. Во-вторых, нужно отметить, что плоскости скольжения или направления скольжения в одних и тех же плоскостях часто не перпендикулярны друг другу.

3. В разделе 4 автор справедливо отмечает, что деформационная обработка (поверхностная или объемная) вызывает измельчение структуры и формирование ультрамелкозернистого или нанокристаллического состояния с размером элементов (зерен, субзерен) в диапазоне сотен нанометров. Диссертант утверждает, что во время низкотемпературного ионного азотирования происходит преимущественно зернограничная диффузия и она ответственна за диффузионное насыщение материала (стр. 140 диссертации). Из текста не понятно, могут ли влиять на диффузию азота другие элементы структуры, характерные для деформированных материалов, такие как дислокации, субзеренные границы, вакансии, дисперсные частицы и т.п, или автор считает это влияние малым? Эти элементы структуры описаны в диссертации (раздел 4, описание к рис. 4.11).

4. При изучении фазового состава образцов стали 12Х18Н10Т после деформирования и ионного азотирования (стр. 158-159 диссертации) автор работы отмечает формирование деформационного α' -мартенсита в образцах наряду с формированием нитридных фаз и азотистого аустенита. Безусловно, деформационный α' -мартенсит преобладает в таких образцах, но не следует забывать и об образовании α -фазы при формировании нитридов в упрочненном слое.

5. В разделе 5 представлены данные по обработке образцов сталей 16ХЗНВФМБ-Ш и 38ХМЮА в смеси газов (азот, аргон, ацетилен). В результате

такой обработки формируются упрочненные слои значительной толщины (до нескольких миллиметров, например, стр. 187), превышающей область анализа при рентгеновских исследованиях (десятки микрометров). При условии, что съемку проводили для обработанной поверхности образца, в область анализа попадали не все модифицированные слои материала. Были ли использованы какие-то приемы для исследования фазового состава в упрочненных областях, находящихся ниже областей анализа при рентгеновских съемках?

6. Значения содержания остаточного аустенита (1-3%), приведенные в таблице 6.1, и нитридов в таблице 6.3, вероятно, занижены, так как в общем случае метод рентгеноструктурного анализа не позволяет выявить столь малые доли фаз.

7. В разделе 6 приведены данные по ионному азотированию образцов стали марки Р6М5, предварительно подвергнутой интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением (ИПДК). Из текста диссертации не ясно, каким участкам полученных при ИПДК дисков соответствует описание структуры, приведенное в разделе 6.3. Наблюдалось ли характерное для ИПДК радиальное изменение структуры и свойств образцов после ионного азотирования?

Указанные в отзыве замечания носят частный характер, они не снижают научную и практическую значимость работы. Актуальность работы, научная новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, его результаты опубликованы в ведущих научных журналах, докладывались на конференциях различного уровня, защищены патентами РФ.

Заключение. На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Хусаинова Ю.Г. «Разработка и научное обоснование новых технических решений формирования упрочненных поверхностных слоев при локальном ионном азотировании сталей» является законченной научно-квалификационной работой, в которой обоснованы технические и технологические решения, вносящие существенный вклад в развитие машиностроительной отрасли Российской Федерации. Работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Хусаинов Юлдаш

Гамирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., доцент,
заведующий лабораторией, главный
научный сотрудник ФГБУН
«Институт физики прочности и
материаловедения Сибирского
отделения Российской академии
наук»



Астафурова Елена Геннадьевна

Подпись Е.Г. Астафуровой удостоверяю

Ученый секретарь ФГБУН «Институт
физики прочности и материаловедения»
Сибирского отделения РАН
кандидат физико-математических наук



Н.Ю. Матолыгина

Сведения об авторе отзыва

ФИО оппонента: Астафурова Елена Геннадьевна

Ученая степень и звание: доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния, доцент

Должность: заведующий лабораторией, главный научный сотрудник

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФПМ СО РАН)

Почтовый адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4

Адрес электронной почты: elena.g.astafurova@ispms.ru

Телефон: +7 (3822) 28-68-65