

КОМШИНА Анна Владимировна

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА И ТИТАНА

Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2013

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Помельникова Алла Сергеевна

Официальные оппоненты: Заслуженный работник Высшей школы,
доктор технических наук,
профессор
Лясоцкая Виолетта Святославовна

доктор технических наук, профессор
Белахова Ирина Станиславовна

Ведущая организация: ИМЕТ им. А.А. Байкова

Защита диссертации состоится «16» октября 2013 г. в __ час. __ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Телефон для справок: (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотек государственного технического университета им. Н.Э. Баумана:



Автореферат разослан «10» сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Семенов В.И.

2851

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Повышение качества поверхности машиностроительных изделий является актуальной задачей всегда. Реальная поверхность детали всегда имеет дефекты, образованные в результате технологического цикла изготовления: микронесплошности, неровности различной формы и высоты и другие. Шероховатость поверхности вызывает значительную перегрузку по глубине (Штремель М.А.), концентрацию напряжений в местах выступов, наличие микронесплошностей на поверхности материала уменьшает эффективное поперечное сечение, а также плотность внутренних контактов, создает дополнительные концентраторы напряжений и снижает прочность материала. Перечисленные дефекты, в конечном счете, снижают как статическую, так и усталостную прочность деталей.

Существующие способы упрочнения и повышения функциональных свойств поверхности сплавов связаны с различными методами поверхностного пластического деформирования, термической и химико-термической обработкой, лазерными, ионно-плазменными и магнитно-импульсными методами.

Перспективным способом улучшения свойств поверхностного слоя является применение магнитно-импульсной обработки. Предпосылками служит широкое использование магнитных импульсов для упрочнения инструмента, модификации ионных кристаллов, полимеров и других материалов. Хотя данные о влиянии магнитно-импульсной обработки (МИО) на материалы зачастую противоречивы, а результаты не всегда воспроизводимы, существует большое количество работ подтверждающих целесообразность применения МИО в качестве инструмента повышения прочности сплавов (Бернштейн М.Л., Пустовойт В.Н., Малыгин Б.В., Гаркунов Д.Н. и др.). Магнитно-импульсная обработка позволяет снизить временные и экономические затраты на производство изделий. Однако этот способ обработки не применяется для направленной модификации поверхности титана, его сплавов и прецизионных сплавов, которые получили широкое распространение в аэрокосмической промышленности и приборостроении. На данный момент недостаточно изучен механизм воздействия магнитных импульсов на структуру и свойства поверхности этих материалов. Поэтому исследования, направленные на изучение влияния магнитно-импульсной обработки на свойства поверхности материалов, и разработка режимов комплексной обработки деталей из сплавов на основе железа и титана, являются актуальными и своевременными.

Цель и задачи работы. Установление закономерностей изменения структуры и свойств в поверхностных слоях металлических материалов при магнитно-импульсном воздействии и разработка на основании этого технологических приемов улучшения микрорельефа, качества поверхности, повышения поверхностной прочности, долговечности сплавов на основе железа и титана.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие научно-технические задачи:

1. Исследовать влияние режимов МИО на параметры открытых микропор сплава 10СЮ (сендаст).

2. Исследовать влияние режимов МИО на микротвердость и пластичность поверхности сплава 10СЮ (сендаст).
3. Исследовать влияние МИО на тонкую структуру сплава 10СЮ.
4. Исследовать совместное воздействие термической и магнитно-импульсной обработок на микротвердость и микроструктуру сплава ВТ23.
5. Исследовать влияние МИО на тонкую структуру, параметры открытой микропористости, микрорельеф поверхности и усталостную прочность сплава ВТ23.
6. Сформулировать рекомендации по практическому применению МИО сплавов 10СЮ и ВТ23.

Научная новизна. В работе были установлены следующие научные положения и закономерности:

1. Установлено, что под действием МИО изменяется тонкая структура сплавов, происходит перераспределение атомов и вакансий, измельчение структуры поверхностного слоя.
2. Установлено, что магнитно-импульсная обработка снижает параметры открытых микропор ферро- и парамагнитных материалов, приводит к повышению микротвердости поверхности и снижает хрупкость сплавов (10СЮ, ВТ23). МИО повышает чистоту поверхности на 2 класса и приводит к увеличению долговечности сплава ВТ23.
3. Показано, что характер изменения исследуемых свойств под действием МИО аналогичен для материалов различной магнитной природы (10СЮ – ферромагнетик, ВТ23 – парамагнетик), расчетами доказано, что изменения обусловлены в первую очередь оплавлением микровыступов, и, предположительно, микропластической деформацией и динамической рекристаллизацией, происходящих в поверхностных слоях.

Практическая значимость результатов работы заключается в следующем:

Обоснованы рекомендации по режимам комплексной обработки сплава 10СЮ и сплава ВТ23 с использованием термической и магнитно-импульсной обработок, позволяющие повысить свойства поверхности деталей из указанных сплавов, повысить чистоту поверхности на 2 класса, увеличить долговечность образцов сплава ВТ23 в 1,2...1,3 раза.

Проведенные на базе ООО «Пластметпроект» промышленные испытания деталей из титановых сплавов, обработанных по предложенной технологии, показали увеличение стойкости деталей в 1,3 раза и снижение шероховатости (среднеарифметическое отклонение профиля Ra снизилось с 3,2 до 1,6).

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы обусловлена применением современных методов исследования, согласованностью полученных результатов с литературными данными.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены и обсуждены на международных и всероссийских научно-технических конференциях (Москва, Яропонец, Магнитогорск, Витебск и др.), на научно-технических конференциях ВУЗов, в том числе: научной конференции

«Студенческая научная весна - 2010» (Москва, 2010), Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова» (Ярополец, 2010-2013), Международном симпозиуме «Актуальные проблемы прочности» (Витебск, 2010), Третьей Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2010), IV Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 2011), II Международной научной конференции «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов» (Орск, 2011), III Всероссийской молодежной конференции с элементами научной школы «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (Москва, 2012), XXI Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Магнитогорск, 2012), Пятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2012).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Личный вклад. Все выводы по диссертационной работе получены лично соискателем в результате проведенных исследований, расчетов и экспериментов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка литературных источников из 145 наименований, 155 страниц машинописного текста, 53 рисунков, 21 таблицы и двух приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и сущность поставленной научно-технической проблемы. Приведены основные результаты ее решения с указанием научной новизны и практической ценности диссертации.

В первой главе проведен аналитический обзор литературы на тему влияния свойств поверхности на эксплуатационные свойства изделий. Показана первостепенная роль поверхности в формировании свойств деталей. Рассмотрены различные современные способы повышения свойств поверхности материалов. В качестве перспективного метода модификации поверхности предложен способ магнитно-импульсной обработки. Приведены теоретические и экспериментальные данные о влиянии воздействия магнитного поля на структуру и свойства различных материалов.

Анализ литературных данных позволил сделать вывод, что проблема повышения функциональных свойств поверхности различных материалов является актуальной, а применение для этой цели МИО может быть перспективным и целесообразным. Однако механизм влияния МИО на структуру и свойства до конца не выяснен, а приводимые различными авторами данные зачастую противоречивы, поэтому работа, позволяющая увеличить теоретическую и экспериментальную базу результатов воздействия МИО на

материалы различных классов (ферро- и парамагнитные) является актуальной и своевременной.

Во второй главе описываются оборудование, исследуемые материалы, методики проведения экспериментов и методы обработки экспериментальных данных.

В качестве объектов исследования выбраны образцы прецизионного сплава 10СЮ (сендаст) и высокопрочного титанового сплава ВТ23, химический состав приведен в Табл. 1.

Таблица 1.

Химический состав сплава ВТ23

Элемент	Массовая доля, %									
	ВТ23							10СЮ		
	Ti	Al	V	Mo	Cr	Fe	O ₂	Fe	Si	Al
	основа	5,9	4,3	1,9	1,1	0,6	0,12	основа	9,4	5,2

Структура сплава 10СЮ – твердый раствор кремния и алюминия в решетке α -железа. Сплав ВТ23 – двухфазный (α + β)-сплав с коэффициентом β -стабилизации $K_\beta=0,75$.

Выбор материалов связан с тем, что эти материалы, во-первых, имеют отличную магнитную природу: сплав 10СЮ – ферромагнетик, ВТ23 – парамагнетик. Во-вторых, детали из исследуемых сплавов применяются в различных условиях нагружения: из сплава 10СЮ изготавливают детали для узлов приборов точной механики, работающие в динамическом режиме при контактной нагрузке, полюсные наконечники магнитных головок аппаратуры магнитной записи – то есть такие детали, для которых важна контактная выносливость; детали из сплава ВТ23 – обшивка фюзеляжа, механизации крыла самолета – детали, для которых определяющим свойством является усталостная прочность.

Для исследуемых сплавов рассматривались следующие методы обработки: термическая обработка (простой отжиг, изотермический отжиг, ступенчатая закалка, закалка и старение) и упрочнение импульсами магнитного поля по различным режимам.

Образцы титанового сплава ВТ23 подвергались термической обработке по следующим режимам: простой отжиг (800°C, 2ч, воздух); ступенчатая закалка (960°C, 0,3ч; 880°C, 0,5ч; 600°C, 2ч, воздух); изотермический отжиг (960°C, 0,3ч; 880°C, 0,5ч; 750°C, 2ч, воздух); закалка (890°C, 1час, воздух) и старение (500°C, 10ч);.

Образцы сплава 10СЮ подвергали магнитно-импульсной обработке после стандартной термической обработки (отжиг 800°C, 2ч, охлаждение со скоростью 50град/ч до 200°C, охлаждение на воздухе).

Магнитно-импульсную обработку образцов сплавов проводили на установке МИО с автоматическим регулированием параметров магнитных импульсов.

Для анализа структуры образцов после термической и магнитно-импульсной обработки применяли оптический микроскоп «Olympus» при увеличении до 1000 раз. Оценку микротвердости и хрупкости (сопротивление зарождению трещин) определяли на автоматическом микротвердомере фирмы Struers «Durascan 10/20». Нагрузку изменяли от 0,05Н до 100Н (для трещиностойкости). Рентгеноструктурные исследования проводили на рентгеновском дифрактометре «Дрон-3». Гамма-резонансные исследования проводили на ЯГР-спектрометре MS-1104Е с автоматической обработкой ЯГР-спектров по программе UnivemMS. Изомерный сдвиг спектров определяли относительно α -Fe. Для электронно-микроскопических исследований использовали просвечивающий электронный микроскоп JEM-200CX фирмы Jeol (Япония), позволяющий получать пространственное разрешение от 0,15 нм. Характер распределения вакансий и образуемых ими микропор определяли с помощью сорбционного волнометрического анализатора «Nova 1200». Исследование микрорельефа поверхности (шероховатости) проводили на микроскопе Solver Pro в атомно-силовом режиме полуконтактным методом.

Третья глава посвящена исследованиям влияния МИО на дефектность поверхности, свойства и структуру сплава 10СЮ.

Как известно, микродефекты, основными из которых являются микропоры, существенно снижают свойства поверхности и детали в целом. Результаты исследования влияния МИО на распределение пор по размерам приведены на Рис.1.

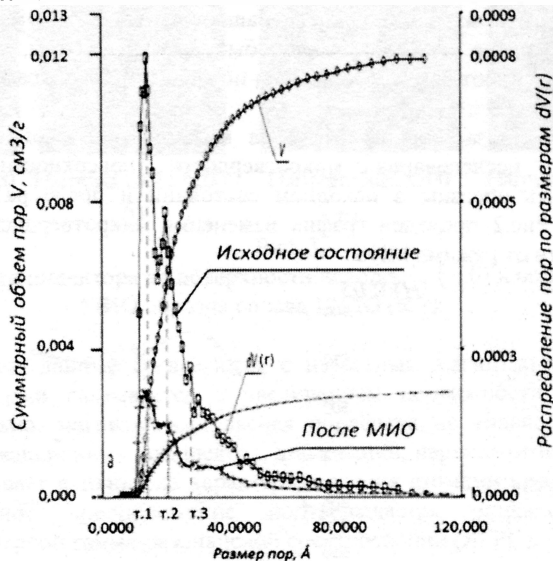


Рис. 1.
Распределение микропор по размерам в образцах сплава 10СЮ до и после МИО

На Рис.1 кривая V - кумулятивная кривая - отражает накопление суммарного объема пор, происходящее с увеличением их радиуса; кривая $dV(r)$, получаемая дифференцированием кривой V , отражает распределение пор по размерам по нормальному закону со смещением в область малых радиусов пор с центром рассеивания. МИО приводит к изменению характера кривой $dV(r)$ – тримодальное распределение сменяется бимодальным, сокращается суммарный объем пор. МИО приводит к существенному сокращению количества пор и их объема, что в целом говорит о снижении дефектности поверхности. Графические данные подтверждены расчетами, выполненными в программном модуле установки измерения пористости.

В Табл.2 приведены результаты расчетов удельной площади поверхности и суммарного объема микропор в исходном образце и после МИО.

Таблица 2.

Результаты определения удельной поверхности и суммарного объема микропор образцов сплава 10СЮ

Число импульсов	Удельная поверхность S , $\text{м}^2/\text{г}$	Суммарный объем пор V , $\text{см}^3/\text{г}$
0	13,7	0,012
10	2,3	0,0024
20	1,8	0,0018

В результате обработки 10 магнитными импульсами удельная поверхность открытых микропор сокращается до 80%. А суммарный объем – до 85%. Полученные результаты могут быть объяснены тем, что поры с малым радиусом исчезают, поры с большими по значению радиусами сокращают свой размер.

Для анализа влияния МИО на механические свойства сплава 10СЮ проведены исследования микротвердости поверхности. Исследованию подвергались образцы в исходном состоянии и после различных режимов МИО. На Рис.2 приведен график изменения микротвердости поверхности в зависимости от режима МИО.

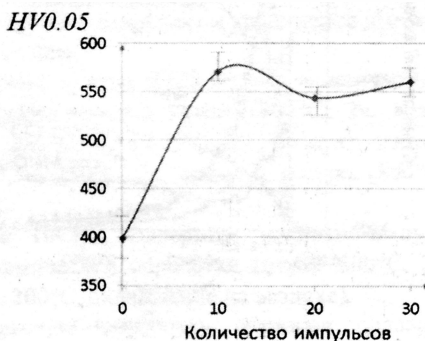


Рис. 2.

Изменение микротвердости сплава 10СЮ в зависимости от режима МИО (количества импульсов)

Из Рис. 2 видно, что после 10 импульсов магнитного поля микротвердость поверхности увеличилась с 400 HV0.05 до 550 HV0.05.

Для оценки влияния импульсов магнитного поля на хрупкость сплава 10СЮ (сендаст) были проведены исследования, включающие определение величины нагрузки появления трещин. На Рис. 3 приведены результаты исследования хрупкости сплава 10СЮ(сендаст).

Метод состоит в следующем: изменяя нагрузку на индентор в диапазоне от 0,5 Н до 100 Н, регистрировали отсутствие или наличие трещин на поверхности образцов. Проводили до 10 замеров при каждом значении нагрузки. На фотографиях четко видно, что на исходном образце регистрируется наличие трещин уже при нагрузке 50 Н, а при 100 Н количество трещин значительно увеличивается. Анализ фотографий, полученных для образца, обработанного 10 импульсами магнитного поля, показал, что при нагрузке 50 Н у обработанного образца трещины на поверхности не регистрируются. При нагрузке 100 Н также не удалось выявить наличие трещин. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что нагрузка появления трещин увеличивается более, чем в 2 раза, т.е. увеличивается пластичность сплавов.

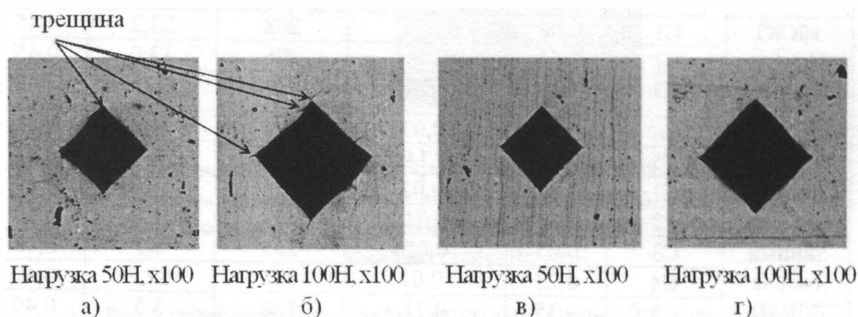


Рис. 3.

Отпечатки индентора на поверхности исходного (а, б) и обработанного МИО образца сплава 10СЮ (в, г)

Полученные данные согласуются с известным магнитно-пластическим эффектом, который связывается с увеличением подвижности дислокаций. Предположительно, магнитно-импульсная обработка не только увеличивает подвижность вакансионных комплексов, дислокаций, парамагнитных центров и т.п., но и оказывает влияние на характер заселения атомами кристаллической решетки. Данное предположение подтверждается описанными ниже результатами ядерной гамма-резонансной спектроскопии (ЯГРС).

Методика ЯГР-спектроскопии позволяет изучить локальные особенности кристаллической структуры вещества, электронные конфигурации атомов и межатомные связи. Гамма-резонансные исследования проводили на ЯГР-спектрометре с автоматической обработкой ЯГР-спектров. Определяли следующие параметры: изомерный химический сдвиг (δ), квадрупольное

расщепление (Δ), магнитные поля на ядрах Fe^{57} (H). Изомерный сдвиг спектров определяли относительно $\alpha\text{-Fe}$. Полученные спектры имеют вид, характерный для твердого раствора Si и Al в решетке α -железа, но форма спектра сложнее. Различие в окружении атомов железа в твердом растворе приводит к разнице в зарядовой и спиновой плотности электронов на ядрах таких атомов, что отражается на параметрах спектра – магнитном поле на ядрах и изомерном сдвиге (см. Табл.3).

После МИО увеличиваются площади компонент для секстетов C1 и C4, а для секстетов C2 и C5 - уменьшаются, величина изомерного сдвига для C3, C5 увеличивается, ширина линий для всех секстетов увеличивается. Количество атомов железа с ближайшим окружением в 8 и 4 (C1 и C4) атомов железа увеличивается, и сокращается количество атомов с ближайшим окружением в 7 и 3 (C2, C5) атома. В сплаве происходит упорядочение.

Таблица 3.

Результаты ЯГРС образцов сплава 10СЮ до и после МИО

Образец	Компонента спектра	Изомерный сдвиг δ , мм/с	Квадрупольное расщепление Δ , мм/с	Магнитные поля на ядрах Fe^{57} H, кЭ	Площади Компонент S, %	Ширина линии, G
10СЮ Исходный (до МИО)	C1	0,08	-0,04	298	23,2	0,45
	C2	0,02	0,00	276	13,0	0,45
	C3	-0,01	0,16	230	5,6	0,45
	C4	0,23	-0,03	202	50,9	0,45
	C5	0,30	0,14	140	7,3	0,45
10СЮ Обработанный (после МИО)	C1	0,07	-0,02	295	26,4	0,49
	C2	0,02	0,01	269	10,2	0,49
	C3	0,03	0,05	223	5,7	0,49
	C4	0,23	-0,01	202	52,2	0,49
	C5	0,35	0,21	136	5,5	0,49

Изменение этих величин, может быть связано с перераспределением внутренних напряжений и происходящим упорядочением вследствие действия вакансионно-межузельного механизма и изменения дислокационной структуры сплава после магнитно-импульсного воздействия.

В четвертой главе проведено исследование влияния магнитно-импульсной обработки на предварительно термически обработанные по различным режимам образцы сплава ВТ23. Выбирали рекомендованные для деталей сплава ВТ23 режимы термической обработки (ТО): простой отжиг (800°C, 2 ч, воздух); ступенчатый отжиг (960°C, 0,3 ч; 870°C, 0,5 ч; 750°C, 2 ч, воздух); ступенчатая закалка (960°C, 0,3 ч; 870°C, 0,5 ч; 600°C, 2 ч, воздух); Закалка (890°C, 1 час, воздух) и старение (500°C, 10ч).

В качестве структурно-чувствительной характеристики в работе была выбрана микротвердость. Проводили экспресс-анализ эффективности различных режимов термической обработки, при условии дальнейшей МИО, а также выбирали режим магнитно-импульсной обработки. Для оценки влияния

напряженности магнитного поля (МП) на микротвердость предварительно термообработанные по одинаковому режиму образцы подвергали МИО с различной напряженностью: режим 1 – $H=30\ldots40$ кА/м; режим 2 – $H=50\ldots60$ кА/м; режим 3 – $H=70\ldots80$ кА/м. По изменению значений микротвердости в зависимости от числа импульсов и напряженности в качестве рабочей была выбрана напряженность поля 50-60кА/м.

Проведена оценка влияния предварительной термической обработки на результаты МИО. На Рис. 4 приведены результаты изменения прироста микротвердости в зависимости от предварительной термической обработки. Из гистограмм значений микротвердости в зависимости от режима ТО и числа импульсов видно, что наибольший прирост микротвердости наблюдается после закалки и старения, хотя и после других видов ТО эффект существенен.

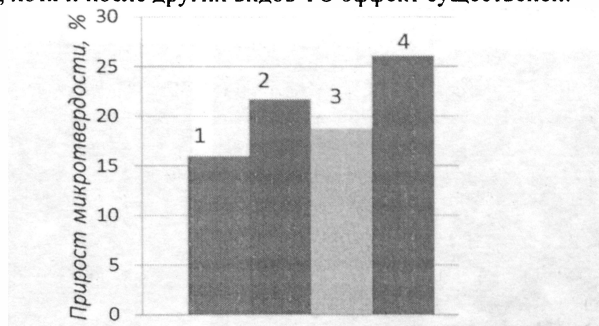


Рис. 4.

Изменение прироста микротвердости образцов после МИО ($H=50\ldots60$ кА/м) в зависимости от режима предварительной термической обработки: 1 – отжиг, 2 – ступенчатый отжиг, 3 – ступенчатая закалка, 4 – закалка+старение

На Рис.5 приведены фотографии микроструктуры образцов сплава ВТ23 в исходном состоянии после различной ТО и после МИО.

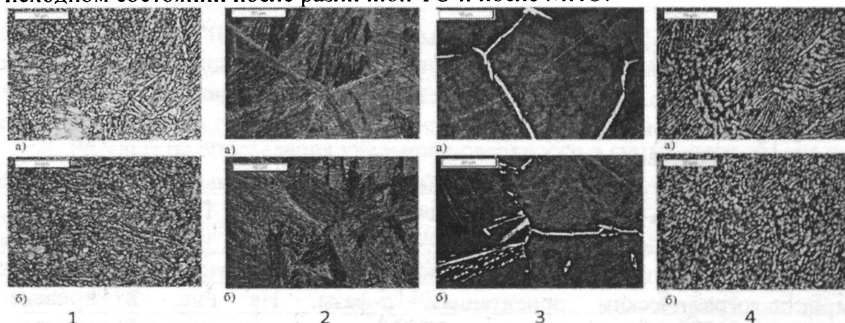


Рис.5.

Фотографии микроструктуры поверхности образцов сплава ВТ23 после термической обработки и магнитно-импульсной обработки (x500): а) – образец после ТО, б) – образец после ТО и МИО; 1, 2, 3, 4 – режимы ТО

Наблюдается незначительное различие в микроструктуре образцов до и после МИО: обнаружена некоторая глобуляризация α -фазы, дробление $(\alpha+\beta)$ -пластин, разориентированность колоний α -пластин. Полученные результаты свидетельствуют о протекании в поверхностных слоях динамической рекристаллизации, реализованной под действием магнитных импульсов.

При таком воздействии возможны изменения тонкой структуры сплава, которые можно зафиксировать с помощью таких методов, как ядерная гамма-резонансная микроскопия и просвечивающая микроскопия.

Исследования микроструктуры продолжили, применив метод просвечивающей электронной микроскопии. Исследовали образцы (фольги) после ТО (по режиму ступенчатая закалка) и после ТО+МИО (30 магнитных импульсов) (см. Рис.6).

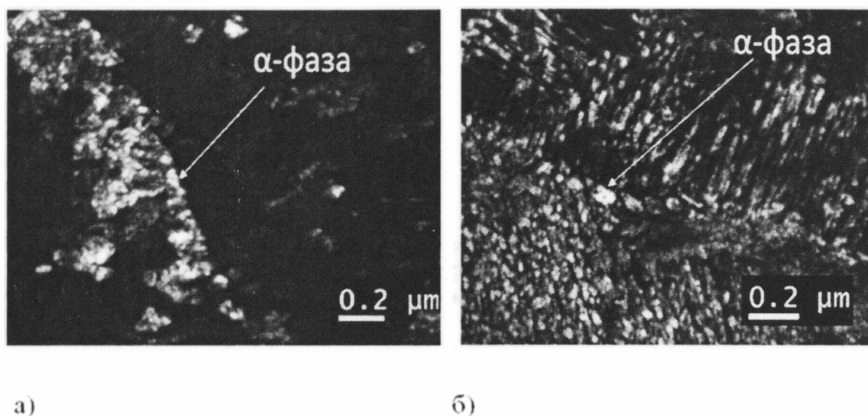


Рис. 6.

Электронно-микроскопические фотографии границы бывшего β -зерна образца сплава ВТ23 в исходном состоянии (а) и после МИО (б)

На фотографии микроструктуры образца сплава ВТ23 в темном поле четко видны различия в дисперсности α -фазы, расположенной по границе бывшего β -зерна. После МИО структура представлена измельченной глобуляризованной α -фазой. Полученные результаты подтверждают наличие эффекта воздействия МИО.

Рентгеноструктурные исследования образцов сплава ВТ23 в исходном состоянии после ТО (закалка: 960°C, 1 час, вода) и после ТО (закалка: 960°C, 1 час, вода) и МИО по режиму $H=50\ldots 60$ кА/м, 30 импульсов показали изменение интенсивности линий, соответствующих различным кристаллографическим ориентациям α -фазы. На Рис. 7 приведены рентгенограммы образцов сплава ВТ23 до и после магнитно-импульсной обработки.

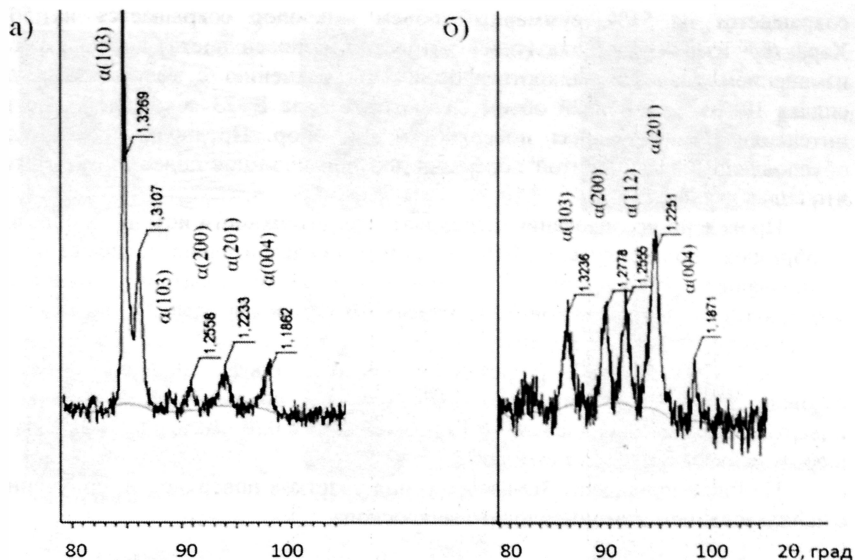


Рис. 7.
Рентгенограммы сплава ВТ23 до (а) и после (б) МИО

Для углов $2\theta \approx 85^\circ, 89^\circ, 94^\circ, 98^\circ$, соответствующих α -фазе с параметрами h,k,l (103), (200), (201), (004) значения относительной интенсивности линий меняются, соответственно, для (103) – с 52% до 24%, для (200) – с 6% до 24%, для (201) – с 8% до 41%, для (004) – с 7% до 16%. МИО влияет на переориентацию α -фазы, вызывает изменение форм-фактора α -фазы.

Аналогично исследованию для сплава 10СЮ, проведен анализ влияния МИО на показатели открытой пористости образцов сплава ВТ23. Установлено, что полученные зависимости носят схожий характер для сплавов 10СЮ и ВТ23, в результате МИО для обоих сплавов наблюдается смещение основного максимума в область малых радиусов.

В Табл.4 приведены результаты расчетов удельной площади поверхности и суммарного объема пор в исходном образце и после МИО.

Таблица 4.

Результаты определения удельной поверхности и суммарного объема пор образцов сплава ВТ23

Число импульсов	Удельная поверхность $S, \text{м}^2/\text{г}$	Суммарный объем пор $V, \text{см}^3/\text{г}$
0	1,250	0,00306
10	1,140	0,00276
20	0,820	0,00260
30	0,343	0,00156

Анализ изменения параметров пористости показал, что в результате обработки 30 импульсами удельная поверхность открытых микропор

сокращается на 56%, суммарный объем микропор сокращается на 50%. Характер изменения показателей пористости поверхности коррелирует с изменением значений микротвердости. По сравнению с результатами для сплава 10СЮ, суммарный объем микропор сплава ВТ23 сокращается не так интенсивно, как удельная поверхность микропор. Предположительно, это обусловлено более развитой поверхностью пор образцов сплава ВТ23 и тем, что сплав двухфазный.

Проведено исследование шероховатости поверхности исходных образцов и образцов, подвергнутых МНО. Образцы предварительно шлифовались и полировались. Необходимость чистовой обработки образцов обусловлена конструкцией атомно-силового микроскопа: перепад высот исследуемой поверхности не более двух микрометров. Базовую длину $l=0,25$ мм выбирали согласно ГОСТ 2789-73. В результате анализа профилей, полученных на базовой длине 0,25 мм, установлено, что показатель шероховатости поверхности R_a снизился с 0,115 мкм до 0,039 мкм, то есть класс шероховатости повысился с 10 до 12.

На Рис.8 приведены 3D-изображения участков поверхности, полученные с использованием атомно-силового микроскопа.

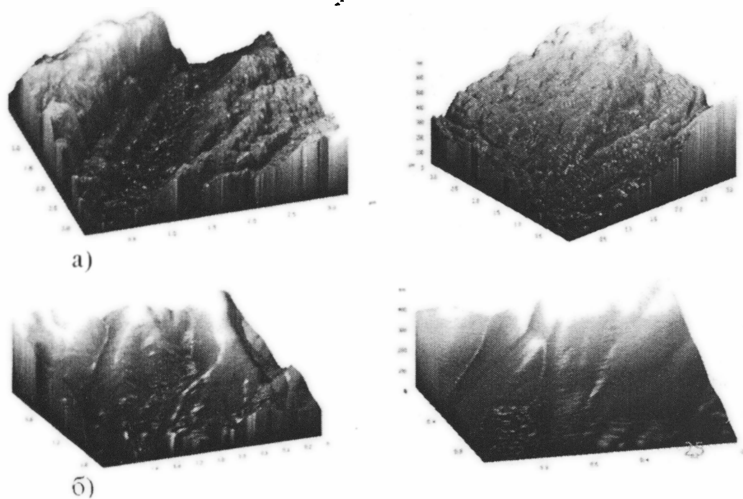


Рис. 8.

Изображения поверхности, полученные с помощью атомно-силового микроскопа до (а) и после (б) МНО

Визуально видно сглаживание поверхности, мелкие неровности выравняются, более крупные становятся пологими.

При высокотемпературных нагревах на поверхности сплава ВТ23 образуется газонасыщенный слой, представляющий собой твердый раствор кислорода в α -титане, который отличается повышенной хрупкостью, резко снижает технологическую пластичность и прочность. На фотографиях (см. Рис.9) приведены снимки отпечатков индентора микротвердомера.

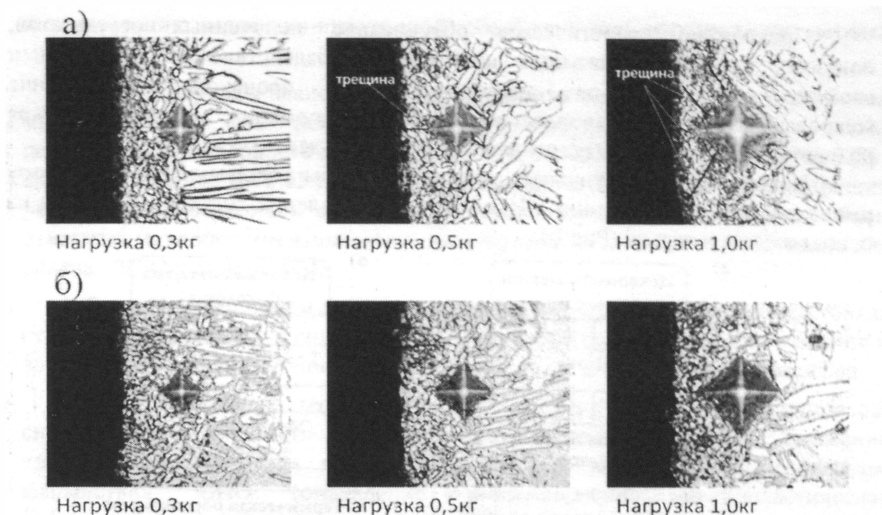


Рис.9.

Отпечатки индентора на поверхности газонасыщенного хрупкого слоя образцов сплава ВТ23 до и после МИО

На снимках четко видно, что на исходном образце регистрируется наличие трещин уже при нагрузке 50 Н, в то время как для образца, обработанного 30 импульсами магнитного поля, при нагрузке 50 Н и 100 Н трещины на поверхности не регистрируются. Полученные результаты показывают снижение хрупкости поверхностного слоя, что крайне важно для повышения эксплуатационных свойств изделий из титановых сплавов.

Испытания на многоцикловую усталость проводили на базе $N=2 \cdot 10^7$ циклов на плоских образцах, выполненных по ГОСТ 25.502-79. Цикл симметричный. Испытаниям подвергали две группы образцов: в исходном состоянии (после закалки и старения) и после магнитно-импульсной обработки по режиму 50...60 кА/м, 30 импульсов.

В результате испытаний определены значения предела выносливости:

- $\sigma_{-1}=420...450$ МПа (до МИО);
- $\sigma_{-1}=510...580$ МПа (после МИО).

Таким образом, МИО повышает предел выносливости в 1,2...1,3 раза.

В пятой главе на основании анализа полученных результатов для сплавов 10СЮ и ВТ23 показано, что характер изменения свойств аналогичен для обоих сплавов при условии применения рекомендованных режимов МИО. Проведены расчеты температуры, возникающей на поверхности и на вершинах микровыступов сплавов, при магнитно-импульсной обработке. Установлено, что температура достигает высоких значений ($>T_{пл}$), в результате чего происходит разогрев и оплавление микронеровностей.

Предложено теоретическое обоснование полученных результатов, показано, что МИО оказывает комплексное воздействие на структуру и свойства сплавов. Под действием МИО происходит оплавление микровыступов, микропластическая деформация, динамическая рекристаллизация и реализуется вакансионно-межузельный механизм.

На основании полученных результатов даны рекомендации по выбору режимов МИО и включению МИО в цикл изготовления деталей из сплавов на основе железа и титана (Рис.10).

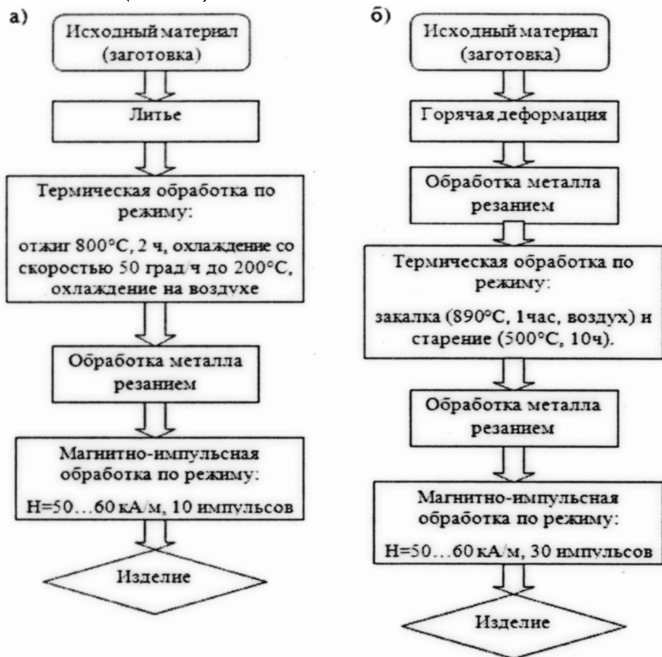


Рис. 10.

Цикл изготовления детали из сплавов типа 10СЮ (а) и ВТ23 (б)

Магнитно-импульсная обработка рекомендуется в качестве финишной. Обработка изделий по режимам, приведенным на Рис. 10, позволит повысить чистоту поверхности, прочность и пластичность поверхности, снизить ее дефектность.

ВЫВОДЫ

1. Проведено комплексное исследование воздействия магнитно-импульсной и термической обработок на шероховатость поверхности, микроструктуру, тонкую структуру, микротвердость, усталостную прочность магнитного сплава 10СЮ (типа сендаст) и титанового сплава ВТ23 и установлена возможность управления открытой поверхностной микропористостью и величиной микронеровностей поверхности деталей из сплавов на основе железа и титана. Обоснованы практические рекомендации по

использованию магнитно-импульсной обработки при изготовлении деталей машиностроения.

2. Получены зависимости характеристик микротвердости и открытой микропористости от режимов магнитно-импульсной обработки. МИО повышает микротвердость сплава 10СЮ с 400 HV0.05 до 550 HV0.05 - на 37%, сплава ВТ23 с 340 HV0.05 до 430 HV0.05 - на 25%. Нагрузка появления трещин увеличивается более, чем в 2 раза. Удельная поверхность и суммарный объем открытых микропор уменьшаются в среднем на 80% и 50%, соответственно для сплава 10СЮ и сплава ВТ23.

3. Под действием магнитно-импульсной обработки изменяется тонкая структура материалов: в сплаве 10СЮ происходит перераспределение атомов и вакансий, в сплаве ВТ23 повышается дисперсность α -фазы на границах зерен.

4. Предложено теоретическое обоснование полученных результатов: снижение шероховатости поверхности, повышение твердости, снижение хрупкости и изменения структуры связаны с комплексным механизмом воздействия МИО (оплавление микровыступов, микропластическая деформация, динамическая рекристаллизация и действие вакансионно-межузельного механизма).

5. Разработаны технологические рекомендации по режимам комплексной обработки деталей из сплавов 10СЮ и ВТ23 с использованием термической и магнитно-импульсной обработок, которые позволяют повысить чистоту поверхности на 2 класса и увеличить долговечность в 1,2...1,3 раза. Режимы магнитно-импульсной обработки сплава 10СЮ: напряженность $H=50...60$ кА/м, 10 импульсов, частота 0,5Гц, длительность 0,1с; ВТ23: напряженность $H=50...60$ кА/м, 30 импульсов, частота 0,5Гц, длительность 0,1с.

6. Обоснованность практических рекомендаций по внедрению магнитно-импульсной обработки в цикл изготовления деталей из сплавов на основе железа и титана, которые широко используются в машиностроении, авиастроении и других отраслях промышленности, подтверждена актом промышленных испытаний.

Основное содержание работы отражено в следующих **печатных работах**:

1. Кузьмина А.В., Помельникова А.С. Исследование структуры и свойств образцов из титанового сплава ВТ23 // Материалы XVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярополец, 15-19 февраля, 2010. М.: МАИ, 2010. Т1. С. 75-77.

2. Гришина Н.С., Кузьмина А.В. Определение критической температуры и глубины альфированного слоя на образцах сплава ВТ23 // Материалы конференции «Студенческая научная весна - 2010». Москва, 2010. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 100-101.

3. Помельникова А.С., Кузьмина А.В. Исследование структуры и свойств образцов из титанового сплава ВТ23 // Технология металлов. 2010. №8. С.12-15.

4. Помельникова А.С., Кузьмина А.В., Шипко М.Н., Исследование влияния магнитных импульсных полей на свойства сплава ВТ23 // 50 Международный симпозиум «Актуальные проблемы прочности». 27 сентября – 1 октября 2010. Витебск, Беларусь: сборник материалов. Витебск: УО «ВГТУ». 2010. Ч. 2. С. 72-74.

5. Кузьмина А.В. Термическая обработка сварных изделий из титановых сплавов // 3-я всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Сборник трудов. Москва, 22 – 25 сентября 2010. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. С. 125-130.

6. Кузьмина А.В., Помельникова А.С., Шипко М.Н. Влияние магнитных импульсных полей и коронного разряда на свойства титанового сплава ВТ23 // Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярополец, 14-18 февраля, 2011. М.: МАИ, 2011. Т.1. С. 119-121.

7. Комшина А.В., Помельникова А.С., Шипко М.Н. Влияние импульсных магнитных полей на микротвердость ферро- и парамагнитных сплавов // II Международная научная конференция «Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов: Сборник докладов. Орск, 24-25 ноября, 2012. М.: Машиностроение, 2012. Т.2. С. 384-390.

8. Комшина А.В., Помельникова А.С., Шипко М.Н. Изменение свойств высокопрочного титанового сплава под действием импульсных магнитных полей // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXI Уральской школы металловедов-термистов. Магнитогорск, 6-10 февраля, 2012. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. С. 126-127.

9. Комшина А.В., Помельникова А.С., Шипко М.Н. Влияние импульсных магнитных полей на свойства титанового сплава // Материалы XVIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярополец, 13-17 февраля, 2012. М.: МАИ, 2012. Т.1. С.106-109.

10. Комшина А.В., Помельникова А.С. Перспективность метода низкоэнергетической обработки материалов с использованием магнитного поля // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. Москва, 2012. №9. С. 463-488. <http://technomag.bmstu.ru/doc/454270.html>.

11. А.В. Комшина, А.С. Помельникова и др. Влияние магнитно-импульсной обработки на поверхностную пористость сплава сендаст и титанового сплава ВТ23 // Технология металлов. 2013. №1. С. 22-29.

12. Комшина А.В., Помельникова А.С., Шипко М.Н. Исследование влияния предварительной термической и магнитно-импульсной обработок на структуру и свойства сплавов // Материалы XIX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярополец, 18-22 февраля, 2013. М.: МАИ, 2013. Т.1. С. 119-122.