УДК 539.4:539.5:539.8

DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-30-42

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ КОРОТКОИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Ушаков И. В., Симонов Ю. В.

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Российская Федерация*

Аннотация. В работе исследованы физико-механические свойства поверхностного слоя конструкционных титановых сплавов ВТ18у и ВТ9, обработанных лазерными импульсами. Лазерная обработка состоит из серии импульсов длительностью ≈ 20 нс. Использовались различные методы лазерной обработки, которые отличались плотностью мощности, частотой следования импульсов, алгоритмом формирования матрицы облучённых участков и так далее. Исследованы изменения микротвёрдости. Установлены зависимости микротвёрдости от нагрузки на индентор. Показано, что качество формируемой поверхности и её свойства определяются параметрами лазерных импульсов и технологией процесса обработки в целом. Установлены режимы, обеспечивающие повышение микротвёрдости материала, а также стойкости обрабатываемой поверхности к трещинообразованию и разрушению при локальном нагружении. Обсуждены механизмы комплексного улучшения механических свойств поверхностного слоя материала под воздействием лазерной обработки. Существенным достоинством предлагаемого метода обработки является одновременный рост микротвёрдости и стойкости к формированию трещин.

Ключевые слова: механические свойства; титановые сплавы; поверхностный слой; микротвёрдость; лазерная обработка

CONTROL OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE TITANIUM ALLOY SURFACE BY SHORT LASER PULSES

I. Ushakov, Yu. Simonov

*National University of Science and Technology 'MISiS',
Leninsky prosp. 4, 119049 Moscow, Russian Federation*

Abstract. The physical and mechanical properties of the surface layer of titanium alloys VT18u and VT9 processed by laser pulses are investigated. Laser processing consists of a series of pulses with a duration of ≈ 20 ns. Various laser processing methods are used, which differ in power density, pulse repetition rate, algorithm for forming a matrix of irradiated sections, etc. The changes in microhardness are examined. The dependences of microhardness on the load at the indenter are established. It is shown that the quality of the formed surface and its properties are determined by the parameters of laser pulses and the processing technology as

a whole. Regimes are established that provide an increase in the microhardness of the material, as well as the resistance of the treated surface to cracking and fracture under local loading. The mechanisms of complex improvement of the mechanical properties of the surface layer of a material under the influence of laser treatment are also discussed. A significant advantage of the proposed treatment method is the simultaneous increase in microhardness and resistance to crack formation.

Keywords: mechanical properties, titanium alloys, surface layer, microhardness, laser treatment

Введение

Сплавы на основе титана являются перспективными конструкционными материалами для современной авиационной и космической промышленности. В частности, титановые сплавы нашли применение при изготовлении лопаток газотурбинных двигателей [1; 2]. Преимущество титановых сплавов обусловлено их низкой плотностью и достаточно высокими значениями прочности.

Улучшение технических свойств титановых сплавов достигается варьированием доли различных легирующих соединений и различными видами обработки. Сплавы ВТ18у и ВТ9 можно отнести к комплексно-легированным титановым сплавам. Относительно большое содержание алюминия и циркония в сплаве ВТ18у способствует достаточно высокому сопротивлению ползучести в условиях высоких температур, что существенно для газотурбинных двигателей. Данный титановый сплав относится к одному из наиболее жаропрочных сплавов на базе титана. Сплав ВТ18у является высокопрочным, а специфика его элементного и фазового составов обеспечивает высокое значение длительной прочности. Авиационные детали из этого материала способны выдерживать длительные нагрузки при значениях температуры до 873 К.

Упрочнение поверхностного слоя позволяет повысить износостойкость лопаток в целом [3; 4]. Для поверхностных слоёв деталей были разработаны различные технологии упрочнения. Эти технологии направлены на повышение микротвёрдости поверхности, создание сжимающих напряжений, повышение ударной вязкости и т. д.

В случае формирования упрочнённого поверхностного слоя необходимо контролировать толщину этого слоя, а также его адгезию к основному материалу. Свойства слоя должны быть такими, чтобы не возникало трещин на границе между упрочнённым и исходным материалом. Это связано с тем, что во время эксплуатации механическим нагрузкам подвергается как поверхность лопатки, так и материал в объёме детали.

Существуют различные методы упрочнения поверхности: напыление, лазерные аддитивные технологии, дробеструйная обработка, лазерный пиннинг, плазменно-электролитическая обработка и т. д. [5–10]. Некоторые из этих методов активно используются на практике. Другие виды обработки показали хорошую эффективность в лабораторных условиях, однако их сложно реализовать в реальном производстве [1; 3; 8]. Это, например, относится к технологии использования сильноточных импульсных электронных пучков [3].

Одним из перспективных методов формирования свойств поверхности является лазерная обработка [6]. Современные лазерные установки являются достаточно надёжными, экономичными и простыми в использовании. Следует отметить, что за последние десятилетия технологии лазерной обработки материалов получили большое развитие. Удалось значительно повысить эффективность лазерных систем. Значительные успехи достигнуты в формировании необходимых параметров лазерных импульсов: длительности импульса, плотности мощности, распределения энергии в области облучения и т. д. Были разработаны точные и надёжные системы механического позиционирования деталей, обрабатываемых лазерным излучением.

Все перечисленные методы воздействия имеют определённые достоинства и недостатки, связанные как с конечным состоянием образцов, так и с технологичностью процесса обработки. В настоящее время достаточно трудно разработать такой метод обработки, который позволил бы существенно улучшить качество лопаток в целом по сравнению с другими современными способами. Поэтому новые методы обработки должны эффективно формировать требуемые свойства материала, а также быть более технологичными и дешёвыми.

Ранее была предложена технология селективной лазерной обработки наноструктурных плёнок [6; 7]. Удаётся подбирать такие параметры воздействия, при которых существенно повышается их микротвёрдость и стойкость к растрескиванию.

Цель данной работы заключается в исследовании специфики изменения механических свойств при воздействии лазерного излучения, а также в определении параметров лазерной обработки, при которых возможно одновременно повысить твёрдость поверхностного слоя, а также его стойкость к растрескиванию.

Методика эксперимента

Исследования проведены на нескольких образцах конструкционных титановых сплавов: BT18y ($\text{Ti}_{85,85}\text{Al}_{6,5}\text{Zr}_4\text{Sn}_2\text{Nb}_1\text{Mo}_{0,5}\text{Si}_{0,15}$) и BT9 ($\text{Ti}_{88,3}\text{Al}_{6,4}\text{Mo}_{3,3}\text{Zr}_{1,5}\text{Si}_{0,3}\text{Fe}_{0,2}$). Поверхность сплава BT18y перед использованием подвергалась шлифовке и полировке.

Поверхность исследуемых образцов была обработана нано- и миллисекундными лазерными импульсами. Лазерная обработка осуществлялась с использованием трёх лазерных установок.

Первая установка – LS-2134-E4 (ELS-03): частота следования импульсов $\nu = 1\text{--}100$ Гц, длина волны излучения $\lambda = 532$ нм, энергия одиночного импульса $E \approx 15\text{--}20$ мДж, длительность воздействия одиночного импульса $\tau \approx 15\text{--}20$ нс.

Вторая установка – Bulat (модель LRS-150 AU): частота следования импульсов $\nu = 1\text{--}200$ Гц, длина волны излучения $\lambda = 1,064$ мкм, энергия импульса $E \approx 60$ Дж, длительность воздействия одиночного импульса $\tau \approx 0,2\text{--}20$ мс.

Третья установка – длиннофокусный импульсный лазер с диодной накачкой Nd^{3+} : YAG: частота лазера $\nu = 100\text{--}300$ Гц (использовали 200 Гц), длина волны $\lambda = 1064$ нм, энергия импульса $E = 10\text{--}20$ мДж.

Материалы подвергали обработке согласно четырём алгоритмам. Алгоритмы лазерной обработки и полученные результаты описаны в следующем разделе статьи.

Далее проводили серии механических испытаний исходной поверхности материала, всех обработанных и пограничных участков. Указанные участки индентировали пирамидками Виккерса и Берковича с использованием модернизированного микротвердомера ПМТ-3М и нанотвердомера NHT-2. Использовались стандартные и модернизированные методы тестирования [11].¹

Экспериментальные результаты и обсуждение

Многие методы обработки титановых сплавов предполагают достаточно сложные и дорогостоящие технические мероприятия [3; 9; 12]. Как следствие, не все из этих методов обработки находят масштабное применение на практике.

Большой практический интерес представляет создание эффективных, воспроизводимых и дешёвых методов формирования свойств поверхности титановых сплавов. В данной работе свойства поверхности формируются исключительно за счёт лазерного излучения. Современные лазерные установки имеют высокий коэффициент полезного действия, обеспечивают контроль параметров лазерного излучения, оснащены высокоточными системами пространственного позиционирования обрабатываемых образцов.

Внедрение оксидов и нитридов металлов в поверхностный слой титанового сплава способствует повышению микротвёрдости. В случаях, при которых удаётся задействовать механизм повышения микротвёрдости за счёт химических реакций с атмосферным кислородом и азотом, появляется возможность удешевить технологии обработки. Вместо создания специальной защитной среды можно проводить обработку при нормальных физических условиях.

1. Первый режим облучения (лазер ELS-03 и лазер Nd³⁺: YAG) обеспечивал формирование прямоугольной области обработки за счёт нескольких последовательных этапов. На первом этапе формировали матрицу облучённых участков в соответствии со схемой, показанной на рис. 1а. Матрица состоит из непересекающихся областей лазерной обработки. Плотность мощности варьировали от $0,5 \times 10^{12}$ Вт/м² до 90×10^{12} Вт/м². Затем формировали вторую матрицу, смещённую относительно первой (рис. 1б). Первая и вторая матрицы не перекрываются. Последующие этапы обработки включают формирование дополнительных матриц облучённых областей, смещённых относительно первых двух. Они полностью перекрывают облучённые участки. Описанную выше обработку повторяли от 2 до 5 раз. Размеры диаметров облучаемых участков можно изменять при переходе к следующему циклу обработки.

¹ Также см.: Государственный стандарт Союза ССР: Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Москва, 1976. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78).

Рис. 1. Схема последовательных этапов облучения поверхности сплава: а) первый этап; б) второй этап. Микрофотография поверхностного слоя, сформированного по первому способу: в) диодным лазером Nd^{3+} : YAG; г) лазером ELS-03.

Микроструктура данной поверхности, исследованная с помощью оптической микроскопии, не содержит микротрещин и элементов растрескивания. В целом её микрорельеф соотносится с неровностями, имеющимися в необработанной зоне. Характерно наличие на поверхности сферических областей, образовавшихся при быстром охлаждении расплава в атмосфере. На свойства материала влияют химические процессы. Начиная с температуры 673K процессы диффузии азота и кислорода в титан резко активизируются. Присутствие оксидов TiO_2 и нитридов TiN в титановых сплавах заметно повышает их микротвёрдость и износостойкость.

2. Второй режим (лазер ELS-03). Поверхность облучали лазерными импульсами с частотой 100 Гц, которые фокусировали под поверхность. За счёт изменения глубины фокусировки варьировали диаметр облучённой области от 0,05 мм до 2 мм. Образец перемещали на 15 мм в направлении «х» с постоянной скоростью 185 мм/с. Затем образец смещали в направлении «у» и т. д. Обработку продолжали до формирования зоны облучения размером 15×15 мм (рис. 2).

Рис. 2. а) на микрофотографии чётко видны смещённые вдоль оси «х» круглые области лазерной обработки; б) структура поверхности с большим увеличением.

За счёт большего размера облучаемой поверхности и поступательного движения образца формируется больший по размерам и более стабильный газоплазменный факел. Соответственно, формируется более стабильная защитная атмосфера. При этом снижается давление, оказываемое лазерной плазмой. Получаемая поверхность гладкая и имеет характерные участки оплавления.

Трещин на обработанной поверхности не фиксировали, в том числе после локального нагружения алмазной пирамидкой Виккерса с нагрузкой до 4,9 Н включительно.

3. Третий способ обработки основан на обработке образца миллисекундными лазерными импульсами (Bulat LRS-150 AU).

Обрабатывали как одиночными импульсами, так и серией импульсов. За счёт обработки единичными импульсами сформировано несколько одиночных участков обработки с диаметром пятна порядка 1,3 мм. Равномерное движение образца в одном направлении приводило к образованию на его поверхности оплавленной дорожки шириной около 1,3 мм (рис. 3).

Рис. 3. а) поверхность после обработки единичным миллисекундным импульсом; б) область, сформированная при воздействии серии миллисекундных лазерных импульсов на движущийся образец. Белыми стрелками показаны трещины.

Поверхность имеет сложный и неоднородный рельеф с углублением в центре. Формируемые поверхности оказываются подверженными разрушению и трещинообразованию. На всех микрокартинах присутствуют трещины. В большинстве единичных зон оплавления имеется одна большая радиальная трещина, но могут присутствовать и короткие радиальные трещины. Указанные трещины образуются при изменении градиента температурного поля в оплавленной области при остывании. Вытянутая зона также покрыта трещинами.

Воздействие миллисекундных лазерных импульсов приводит к сильному разогреву материала заготовки, что в свою очередь, может способствовать изменению структуры материала. Испытания на микротвёрдость проводили в обработанных областях, а также в местах, удалённых от границ области оплавления на 100 мкм и более. В пределах зон оплавления микротвёрдость оказалась выше по сравнению с необработанными участками поверхности примерно на 60%. При нагрузке $F = 0,49$ Н микротвёрдость в среднем 350 МПа, в то время как микротвёрдость необработанного материала 220 МПа.

Микротвёрдость постепенно снижается при переходе от внутренних участков зоны обработки к её границе и далее за пределы области оплавления. На расстоянии более 100 мкм от границы области оплавления микротвёрдость ниже, чем на исходной поверхности образцов примерно в 2 раза. Наличие трещин в области обработки и снижение микротвёрдости в окрестностях обработанных

областей из-за перегрева свидетельствует о неэффективности данного режима лазерного облучения.

4. Четвёртый способ обработки схож со вторым методом обработки. Использовали лазер ELS-03. Отличие свойств поверхности обусловлено особенностями фокусировки и количеством полных циклов обработки (рис. 4). На первом этапе обработки лазерное излучение фокусируют на высоте 5 мм над поверхностью. Далее последовательность обработки поверхности идентична указанной в методе № 2, но при каждом последующем проходе точка фокусировки с шагом в 1 мм приближается к поверхности материала. На последнем, шестом проходе, излучение фокусировали на поверхность. Микротвёрдость поверхности после обработки существенно возрастает, особенно в тонком поверхностном слое толщиной 1 мкм.

Рис. 4. Упрочнённая поверхность сплава ВТ9 после лазерной обработки на установке ELS-03 по четвёртому способу. Видны фрагменты плёночного покрытия, образованного в результате взаимодействия атмосферы с веществом.

5. Использование нескольких вариантов нагрузки позволяет проанализировать изменение механических свойств лазерно-обработанных участков при изменении глубины внедрения индентора. Кроме того, применение разных величин нагрузок позволяет установить, насколько материал чувствителен к возникновению трещин при индентировании.

Обработанные и необработанные участки поверхности сравнивали между собой по следующим критериям: величине микротвёрдости по Виккерсу и Берковичу, формированию трещин при нагружении пирамидкой Виккерса с использованием больших нагрузок.

Обработка титановых сплавов, как правило, требует создания защитной или сильно разреженной атмосферы. В нашем случае была предпринята попытка обойтись без защитной атмосферы. Этого достигали за счёт создания квазистабильного газоплазменного факела. Время существования газоплазменного факела на порядок превышает время воздействия лазерного импульса. В результате разлетающиеся и окисляющиеся пары титанового сплава формируют более или менее эффективную защитную атмосферу. Такая методика частично себя оправдала. При использовании четвёртого режима обработки на поверхности формируется окрашенная плёнка, характерная для поверхностного слоя, насыщенного оксидами и нитридами титана. В этом случае можно ожидать высокой

микротвёрдости в указанном слое. Это предположение было экспериментально подтверждено при испытаниях сплава ВТ9 на нанотвердомере NHT-2 пирамидкой Берковича. Микротвёрдость можно рассчитывать несколькими способами [11]. В данном случае, при построении зависимости рассчитывали микротвёрдость как функцию от нагрузки. Такая зависимость показывает «динамическую микротвёрдость». Разные методы расчёта нано- и микротвёрдости имеют преимущества и недостатки. В нашем случае рассчитанное значение микротвёрдости будет меньше (рис. 5), чем микротвёрдость, оцениваемая по ГОСТ¹, с учётом эффектов, описанных в [11].

Рис. 5. а) изменение твёрдости необработанной поверхности сплава ВТ9 при изменении нагрузки на индентор; б) зависимость твёрдости от нагрузки на индентор для сплава ВТ9 после лазерной обработки согласно режиму № 4 на установке ELS-03.

Для необработанного материала при нагрузке на пирамидку Берковича, равной 0,05 Н, значение твёрдости составляет $H_v \approx 534$ МПа (рис. 5). В диапазоне малых нагрузок (около 0,001 Н) наблюдаются флуктуации твёрдости около значений 4500 – 5000 МПа.

Для обработанного материала, показанного на рис. 4, отмечено существенное увеличение твёрдости (рис. 5). При максимальной нагрузке на пирамидку Берковича, равной 0,05 Н, значение твёрдости составляет 1516–1589 МПа. Это в 3 раза превышает величину твёрдости на исходной поверхности материала ВТ9. Флуктуаций твёрдости в зоне «малых» нагрузок для лазерно-обработанной области не наблюдается.

Высокая микротвёрдость при низких нагрузках свидетельствует о значительном упрочнении поверхностного слоя. Параметры используемых режимов лазерного облучения позволяют создать газоплазменный факел. В этих условиях оксиды и нитриды титана способны проникать в поверхностный слой и повышать его твёрдость.

¹ Государственный стандарт Союза ССР: Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Москва, 1976. ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78).

Существенным является вопрос структуры упрочнённого слоя и его глубины. Структура обработанного слоя не должна содержать дефектов, концентраторов механических напряжений, желательно добиваться плавного изменения механических свойств. В таких покрытиях снижается вероятность формирования трещин между исходным материалом и поверхностью. Область деформационного упрочнения также должна учитываться при определении общей толщины обработанного слоя. Косвенную информацию об упрочнённом слое можно получить за счёт индентирования большими нагрузками с использованием пирамидки Виккерса (рис. 6). Зависимости № 1 и № 2 демонстрируют значительное увеличение микротвёрдости. Микротвёрдость для большинства экспериментальных точек этих зависимостей примерно на 25–40% выше по сравнению с необработанным материалом.

Для зависимости № 2 микротвёрдость практически линейно возрастает с 229 МПа до 375 МПа с увеличением нагрузки от 0,49 Н до 1,96 Н. При дальнейшем увеличении нагрузки микротвёрдость существенно не уменьшается.

Толщина обработанного слоя оценивалась только косвенно. Глубина вдавливания индентора составляла около 12 мкм при максимальной нагрузке $F = 4,9$ Н. Необходимо учитывать упругопластическое восстановление материала после вдавливания. Реальная глубина внедрения индентора будет значительно больше 12 мкм [11].

Рис. 6. Показаны зависимости микротвёрдости по Виккерсу от нагрузки при вдавливании. Зависимости № 1, 2 соответствуют режимам лазерной обработки № 1, 2. Зависимость № 3 соответствует исходному материалу.

Существует несколько механизмов, ответственных за изменения микротвёрдости. В результате сверхбыстрого плавления и последующего охлаждения металла возможна аморфизация поверхности. Происходит процесс испарения поверхностного слоя в зоне воздействия лазерного излучения. Формируется ударная волна с ударным давлением до 10^{10} Па. В этом случае следует ожидать деформационного упрочнения материала. При использовании режима № 2 нагрев может стимулировать процессы релаксации напряжений [6; 13].

Полученные результаты должны оцениваться по нескольким критериям. Оптимальная техника обработки должна быть относительно простой, дешёвой и

воспроизводимой. Режимы № 1 и № 2 соответствуют этим критериям. Лазерная обработка не предполагает каких-либо дополнительных процедур. Не требуется защитной атмосферы, нанесения специальной краски и жидкости (в отличие от метода лазерного пиннинга).

Предлагаемый способ имеет перспективы развития, связанные с комбинированием режимов № 1 и № 2 и/или использования второго лазера с высокой частотой следования импульсов для создания защитной атмосферы.

Существенным преимуществом рассмотренного режима лазерной обработки является увеличение стойкости к формированию трещин. Этим данный режим обработки выгодно отличается от традиционных методов поверхностного лазерного упрочнения, при которых рост микротвёрдости сопровождается увеличением хрупкости.

Экспериментально установлена вероятность формирования трещин при локальном нагружении. При индентировании необработанного образца вероятность формирования трещин возрастала с 20% при нагрузке 0,49 Н до 34% при нагрузке 1,96 Н для сплава ВТ18у.

При индентировании облучённых участков образцов сплава ВТ18у нагрузками от $F_1 = 0,49$ Н до $F_2 = 4,9$ Н формирование трещин не фиксировали.

Заключение

1. Предложены способы обработки поверхности титановых сплавов ВТ18у и ВТ9, обеспечивающие одновременное повышение микротвёрдости и стойкости к формированию трещин.

Удаётся повысить микротвёрдость в поверхностном слое толщиной 1 мкм в 2–3 раза, а в слое толщиной 10–20 мкм на 20–40%.

На исходной поверхности сплава ВТ18у вероятность формирования трещин при нагружении пирамидкой Виккерса достигает 34% при нагрузке 1,96 Н. В обработанном сплаве, при использованных режимах нагружения, трещины не формируются.

2. Воздействие серии лазерных импульсов длительностью в двадцать наносекунд с высокой плотностью мощности позволяет на короткое время сформировать газоплазменный факел, создающий относительно эффективную защитную атмосферу. Незначительное попадание азота и кислорода в поверхностные слои титанового сплава способствует повышению микротвёрдости, что и было достигнуто при режиме обработки № 4.

3. Предлагаемый способ обработки основан только на использовании лазерного излучения и электронно-механической системы точного перемещения. Это обеспечивает невысокую стоимость и простоту предложенного способа лазерной обработки.

Статья поступила в редакцию 27.09.2019 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние релаксационных процессов на эффективность обработки поверхности деталей сильноточными импульсными электронными пучками / Шулов В. А., Пайкин А. Г., Теряев Д. А., Быценко О. А., Энгелько В. И., Ткаченко К. И. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 1 (97). С. 16–19.
2. Структурно-фазовые изменения в поверхностных слоях деталей из титанового сплава ВТ9 при облучении сильноточными импульсными электронными пучками / Шулов В. А., Энгелько В. И., Громов А. Н., Теряев Д. А., Быценко О. А., Ширваньянц Г. Г. // Физика и химия обработки материалов. 2014. № 1. С. 12–16.
3. Применение сильноточных импульсных электронных пучков для модифицирования поверхности лопаток газотурбинных двигателей (обзор) / Шулов В. А., Громов А. Н., Теряев Д. А., Энгелько В. И. // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. № 1. С. 38–48.
4. Application of high-current pulsed electron beams for the restoration of operational properties of the blades of gas-turbine engines / Shulov V. A., Teryaev D. A., Shirvanyants G. G., Engelko V. I., Gromov A. N., Bytsenko O. A. // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2015. Vol. 56. Iss. 3. P. 333–338.
5. Порог пробоя сквозных отверстий в металлических фольгах мощным лазерным излучением (часть 1) / Калашников Е. В., Бугаев А. А., Кантор М. Ю., Куприенко Д. В., Чикиряка А. В. // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2016. № 1. С. 44–59.
6. Ушаков И. В., Сафронов И. С. Влияние лазерной обработки на микротвёрдость и особенности разрушения тонких лент аморфно-нанокристаллического металлического сплава // Физика и химия обработки материалов. 2013. № 2. С. 11–15.
7. Ушаков И. В., Сафронов И. С. Механические характеристики тонкой ленты многокомпонентного аморфно-нанокристаллического металлического сплава, обработанного сериями наносекундных лазерных импульсов // Тяжёлое машиностроение. 2012. № 10. С. 6–9.
8. Структурные изменения в сплавах типа сендаст при быстрой кристаллизации спиннингованием и лазерной обработке / Шефтель Е. Н., Банных О. А., Капуткин Д. Е., Струг Р. Е., Климова Л. М. // Известия Российской Академии наук. Металлы. 1994. № 4. С. 89–95.
9. DLC-coating application to improve the durability of ceramic tools / Grigoriev S., Volosova M., Fyodorov S., Lyakhovetskiy M., Seleznev A. // Journal of Materials Engineering and Performance. 2019. Vol. 28. Iss. 7. P. 4415–4426.
10. Duradji V. N., Kaputkin D. E., Duradji A. Y. Electrolyte-plasma Modification of Surface of Ti-based Alloy during Electrohydrodynamic Mode of Anodic Process // Journal of The Electrochemical Society. 2017. Vol. 164. No. 9. P. E226–E232.
11. Боярская Ю. С., Грабко Д. З., Кац М. С. Физика процессов микроиндентирования. Кишинёв: Штиинца, 1986. 293 с.
12. Якушкин А. А., Высыкайло Ф. И. Проблемы разрушения поверхности оболочек тепловыделяющих элементов ядерных энергетических установок // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2018. № 4. С. 92–111.
13. Андрианов И. К., Гринкруг М. С. Численный метод расчета теплоотдачи для требуемого температурного поля на поверхности контакта лопатки и теплозащитного покрытия при поперечной схеме охлаждения // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2015. № 2. С. 34–43.

REFERENCES

1. Shulov V. A., Paikin A. G., Teryaev D. A., Bytsenko O. A., Engel'ko V. I., Tkachenko K. I. [The effect of relaxation processes on efficiency of part surface treatment with intense pulsed electron beams]. In: *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening technologies and coatings], 2013, no. 1 (97), pp. 16–19.
2. Shulov V. A., Engel'ko V. I., Gromov A. N., Teryaev D. A., Bytsenko O. A., Shirvanyants G. G. [Structure and phase changes in the surface layers of the parts made of the VT9 titanium alloy irradiated with a high-power pulsed electron beam]. In: *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2014, no. 1, pp. 12–16.
3. Shulov V. A., Gromov A. N., Teryaev D. A., Engel'ko V. I. [Application of intense pulsed electron beams for the surface modification of the blades of gas-turbine engines (review)]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya* [Universities Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings], 2015, no. 1, pp. 38–48.
4. Shulov V. A., Teryaev D. A., Shirvanyants G. G., Engelko V. I., Gromov A. N., Bytsenko O. A. Application of high-current pulsed electron beams for the restoration of operational properties of the blades of gas-turbine engines. In: *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2015, vol. 56, iss. 3, pp. 333–338.
5. Kalashnikov E. V., Bugaev A. A., Kantor M. Yu., Kuprienko D. V., Chikiryaka A. V. [The threshold breakdown of through holes in metal foils by high-power laser radiation (part 1)]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2016, no. 1, pp. 44–59.
6. Ushakov I. V., Safronov I. S. [Effects of laser treatment on microhardness and peculiarities of fracture of metal thin tapes with amorphous/nanocrystalline alloy structure]. In: *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 2013, no. 2, pp. 11–15.
7. Ushakov I. V., Safronov I. S. [Mechanical characteristics of a thin ribbon of a multicomponent amorphous-nanocrystalline metal alloy treated with a series of nanosecond laser pulses]. In: *Tyazheloe mashinostroyeniye* [Russian Journal of Heavy Machinery], 2012, no. 10, pp. 6–9.
8. Sheftel' E. N., Bannykh O. A., Kaputkin D. E., Strug R. E., Klimova L. M. [Structural changes in Sendast alloys during fast crystallization by spinning and laser processing]. In: *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Metallurgiya* [Russian metallurgy (Metallurgy)], 1994, no. 4, pp. 89–95.
9. Grigoriev S., Volosova M., Fyodorov S., Lyakhovetskiy M., Seleznev A. DLC-coating application to improve the durability of ceramic tools. In: *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, vol. 28, iss. 7, pp. 4415–4426.
10. Duradji V. N., Kaputkin D. E., Duradji A. Y. Electrolyte-plasma Modification of Surface of Ti-based Alloy during Electrohydrodynamic Mode of Anodic Process. In: *Journal of The Electrochemical Society*, 2017, vol. 164, no. 9, pp. E226–E232.
11. Boyarskaya Yu. S., Grabko D. Z., Kats M. S. *Fizika protsessov mikroindentirovaniya* [Physics of microindentation processes]. Chisinau, Shtiintsa Publ., 1986. 293 p.
12. Yakushkin A. A., Vysikailo F. I. [Modification of the surface and coating application on fuel cladding tubes for nuclear reactors.]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2018, no. 4, pp. 92–111.
13. Andrianov I. K., Grinkrug M. S. [Numerical method of heat emission calculation for the required temperature field on the contact surface of a blade and thermal barrier coating in a cross-cooling scheme]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Fizika-matematika* [Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics], 2015, no. 2, pp. 34–43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ушаков Иван Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры физики Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»;
e-mail: ushakoviv@mail.ru;

Симонов Юрий Владимирович – аспирант, ассистент кафедры физики Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»;
e-mail: MAK.101@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan V. Ushakov – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Physics, National University of Science and Technology “MISIS”;
e-mail: ushakoviv@mail.ru;

Yuri V. Simonov – postgraduate student, assistant lecturer at the Department of Physics, National University of Science and Technology “MISIS”;
e-mail: MAK.101@yandex.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Ушаков И. В., Симонов Ю. В. Управление физико-механическими свойствами поверхности титановых сплавов короткоимпульсным лазерным излучением // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2019. № 4. С. 30–42.

DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-30-42

FOR CITATION

Ushakov I. V., Simonov Yu. V. Control of physical and mechanical properties of the surface of titanium alloys by short laser pulses In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2019, no. 4, pp. 30–42.

DOI: 10.18384/2310-7251-2019-4-30-42