

А.В. ИОНИНА

канд. техн. наук

Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева

в г. Новокузнецке

Е.А. БУДОВСКИХ

доктор техн. наук, профессор, старший научный сотрудник

Сибирский государственный индустриальный университет

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА VT1-0 ПОСЛЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

В статье проведен анализ развития представлений о градиентных слоях и различных способов их формирования, с целью упрочнения и защиты поверхности металлов от неблагоприятных условий окружающей среды. В качестве обработки использовали электровзрывное легирование, а также различные виды комбинированной обработки. Из материала был выбран технически чистый титан марки VT1-0. Методами световой микроскопии прямых и косых шлифов было установлено, что в градиентных слоях по мере удаления от поверхности изменяется не только сама структура, но и такие характеристики, как концентрация примесей, легирующих элементов и, соответственно, степень завершенности этих превращений. Одновременно в этом же направлении изменяются размеры ячеек, зерен и субзерен, плотность дефектов и их субструктура. Установлено, что при электровзрывном науглероживании микротвердость поверхности достигает 800 НВ. Последующая электронно-лучковая обработка приводит к увеличению микротвердости поверхности до 2500...3000 НВ, формированию двух максимумов микротвердости на глубине 20 и 70...80 мкм от поверхности и увеличению глубины зоны упрочнения от 50 до 90...100 мкм. После электровзрывного карбоборирования микротвердость вблизи поверхности возрастает до 2500...3000 НВ. Толщина упрочненного поверхностного слоя достигает 120 мкм. Науглероживание титана приводит к формированию на поверхности несплошного покрытия.

Ключевые слова: градиентные покрытия, поверхность, структура, микротвёрдость, легирование, комбинированная обработка.

A.V. IONINA

Cand. of Techn. Sciences

Branch of Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev in Novokuznetsk

E.A. BUDOVSKIKH

Doctor of Techn. Sciences, Professor, Senior Researcher

Siberian State Industrial University

FEATURES OF THE FORMATION OF GRADIENT STRUCTURES ON THE SURFACE OF TITANIUM VT1-0 AFTER COMBINED TREATMENT

The article analyzes the development of ideas about gradient layers and various ways of their formation, in order to strengthen and protect the surface of metals from adverse environmental conditions. Electro-explosive alloying, as well as various types of combined processing, were used as processing. Technically pure titanium of the VT1-0 brand was selected from the material. By methods of light microscopy of straight and oblique cuts, it was found that in gradient layers, as they move away from the surface, not only the structure itself changes, but also such characteristics as the concentration of impurities, alloying elements and, accordingly, the degree of completeness of these transformations. At the same time, the sizes of cells, grains and subgrains, the density of defects and their substructure change in the same direction. It is established that during electroexplosive carburization, the microhardness of the surface reaches 800 NV. Subsequent electron beam processing leads to an increase in the microhardness of the surface up to 2500...3000 NV, formation of two microhardness maxima at a depth of 20 and 70...80 microns from the surface and an increase in the depth of the hardening zone from 50 to 90 ... 100 microns. After electro-explosive carboborization, the microhardness near the surface increases to 2500...3000 NV. The thickness of the hardened surface layer reaches 120 microns. Carburization of titanium leads to the formation of a discontinuous coating on the surface.

Keywords: gradient coatings, surface, structure, microhardness, alloying, combined processin.

DOI: 10.25791/pfim.02.2023.1253

1. Введение

Важную роль в формировании эксплуатационных и других прочностных свойств металлов играет поверхностных слой. Изменение физико-химических свойств твёрдого тела как раз происходит за счёт создания на поверхности такого упрочняющего слоя, а также созданием внутренних и внешних градиентных структур. Восстановить физико-химические свойства исходных поверхностей после эксплуатации, а также решать задачи по их изменению позволяет нанесение внешних градиентных покрытий. Модифицирование исходных поверхностей различными способами воздействия приводит к созданию внутренних градиентных покрытий. Однако существуют определённые проблемы формирования как внутренних, так и внешних градиентных покрытий. Они направлены на решение двух технологических задач:

- согласовать свойства покрытий со свойствами металлической основы детали;
- разработать высокоэффективные способы кардинального технологического изменения свойств поверхности.

Методологической основой данного исследования являются следующие основополагающие положения современного физического металловедения. Во-первых, это связь между строением сплавов и их свойствами, впервые установленная П.П. Аносовым (1799–1855 гг.). Во-вторых, это теория самоорганизации, в том числе теория формирования структуры поверхностных слоёв при внешних энергетических воздействиях.

Работы Ю.Ф. Иванова, Э.В. Козлова, А.М. Глезера, В.Е. Громова и др. [1–4] посвящены развитию представлений о градиентных слоях, формирующихся на

начальных этапах обработки поверхности, а также важнейшим положениям научного металловедения.

Исследования, проведённые авторами в работе [5], посвящены упрочнению поверхности высококонцентрированными источниками нагрева: плазменной струёй, лазерным лучом, электронным пучком. Кроме того, рассматривается процесс структурной самоорганизации, приводящий к созданию диссипативных структур по принципу самоприспособления к общим или каким-либо конкретным условиям существования, службы или эксплуатации конкретного металлического сплава.

Развитие структурной теории прочности металлических сплавов основано на взаимодействии новых достижений физики металлов, механики твёрдого деформируемого тела и материаловедения. Сочетание на синергетической основе этих механофизических наук позволяет по-новому рассмотреть эволюцию структуры сплавов в процессе разнообразных формоизменяющих, упрочняющих и разупрочняющих обработок.

Выделяют следующие процессы в зависимости от методов обработки:

- изменение химического состава и синтезирование новых фаз;
- искажение кристаллической решетки, изменение ее параметров и типа;
- разрушение кристаллической решетки (аморфизация);
- изменение зеренного строения материала.

Развитие исследований модифицированных слоёв показало, что наилучшими эксплуатационными свойствами обладают так называемые градиентные слои, свойства которых меняются по какому-либо направлению, например по глубине. Внимание к проблеме формирования «градиентных структур» было

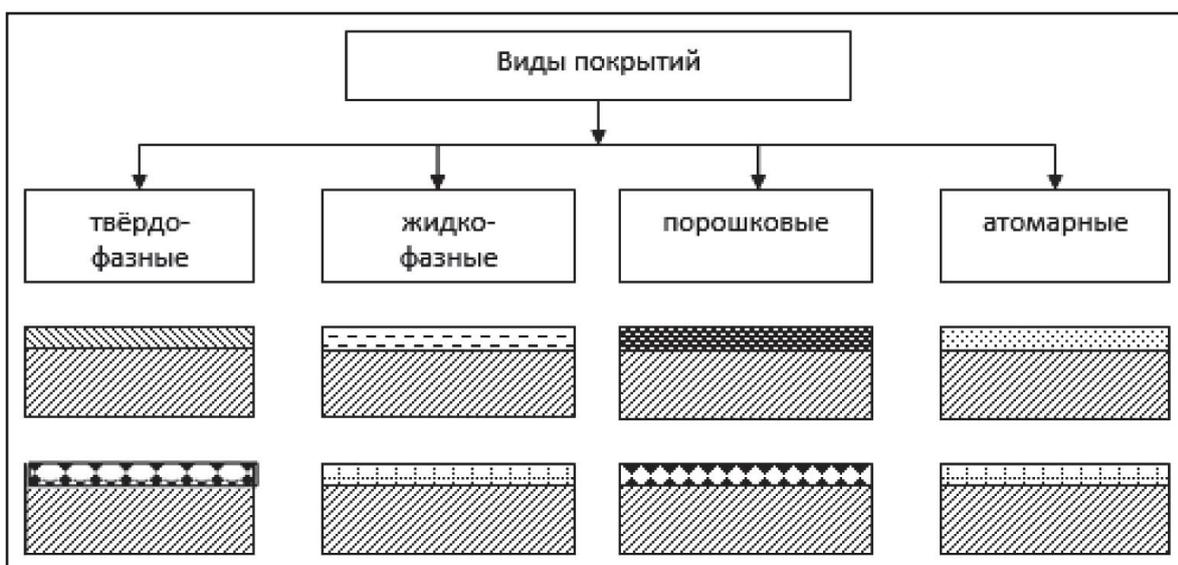


Рис. 1. Схема формирования видов покрытий на твёрдой поверхности

привлечено в работах Э.В. Козлова [1–4], после чего началось интенсивное количественное изучение этого вопроса. Оно стало возможным благодаря развитию специальных методов дифракционной электронной микроскопии.

Из неорганических материалов в настоящее время можно выделить множество способов нанесения покрытий различного назначения. Кроме того, их целесообразно классифицировать по их методам формирования для анализа физико-химических процессов, связанных с нанесением покрытий. Покрытия, формирующиеся на твёрдой поверхности, можно разделить на следующие группы: жидкофазные, атомарные, порошковые и твёрдофазные. Из схемы, приведённой на рис. 1 видно, что механизм и кинетика их формирования значительно отличаются.

Модифицирование исходных поверхностей различными способами воздействия приводит к созданию внутренних градиентных покрытий. Из схемы, приведённой на рис. 2 видно, что широко применяют следующие методы воздействия: термические, механические, термодиффузионные и высокоэнергетические с проникающими потоками частиц и излучений. Кроме вышеперечисленных в последнее время используют и методы комбинированной обработки, например, термомеханические, электровзрывное легирование (ЭВЛ) с последующей электронно-пучковой обработкой (ЭПО) и др.

Поэтому целью данной работы являются особенности формирования градиентных структур на поверхности титана VT1-0 после комбинированной обработки, с целью упрочнения и защиты его поверхности от неблагоприятных условий окружающей среды.

2. Материал и методы исследования

Для анализа образования градиентных структур исследовали технически чистый титан VT1-0, т.к. он

хорошо изучен после упрочнения поверхности с использованием концентрированных потоков энергии. В частности, в литературе имеются сведения о поверхностном упрочнении этого сплава при электровзрывном алитировании и бороалитировании и последующей ЭПО [6]. Выбор видов ЭВЛ был обусловлен возможностью при их использовании повысить микротвёрдость поверхности. В качестве взрываемого проводника использовали ленту углеродную марки ЛУ-П/0,1-50 массой 140 мг. При карбоборировании в область взрыва вводили порошковую навеску аморфного бора марки В массой 50, 100 и 150 мг.

Электровзрывную обработку проводили при поглощаемой плотности мощности $q_p = 5,5 \text{ ГВт/м}^2$ при времени импульса $\tau_p = 100 \text{ мкс}$. Данный режим обработки позволяет провести оплавление и легирование поверхности без выплеска расплава, развивающегося вследствие неоднородного давления плазменной струи на облучаемую поверхность. Последующую ЭПО поверхности легирования осуществляли на установке «Соло» Института сильноточной электроники Сибирского отделения РАН при следующих основных параметрах: поглощаемая плотность мощности q_e составляла 2,0, 2,25 и 3,0 ГВт/м² длительность τ_e импульсов 100 и 200 мкс; частота их следования $f_e = 0,3 \text{ Гц}$; количество N импульсов 5 и 10 имп (табл. 1). Обработку осуществляли в среде аргона при давлении 0,02 Па. Для каждого режима науглероживания определяли распределение микротвёрдости по глубине модифицированных слоев. Оптимальным считали режим, который обеспечивал максимальные значения микротвёрдости и глубины зоны упрочнения.

Исследования структуры упрочненных слоев проводили с использованием методов световой (микроскоп Olympus GX 51) и электронной сканирующей микроскопии (СЭМ) (микроскоп Carl Zeiss EV050). Упрочнение поверхности оценивали, определяя

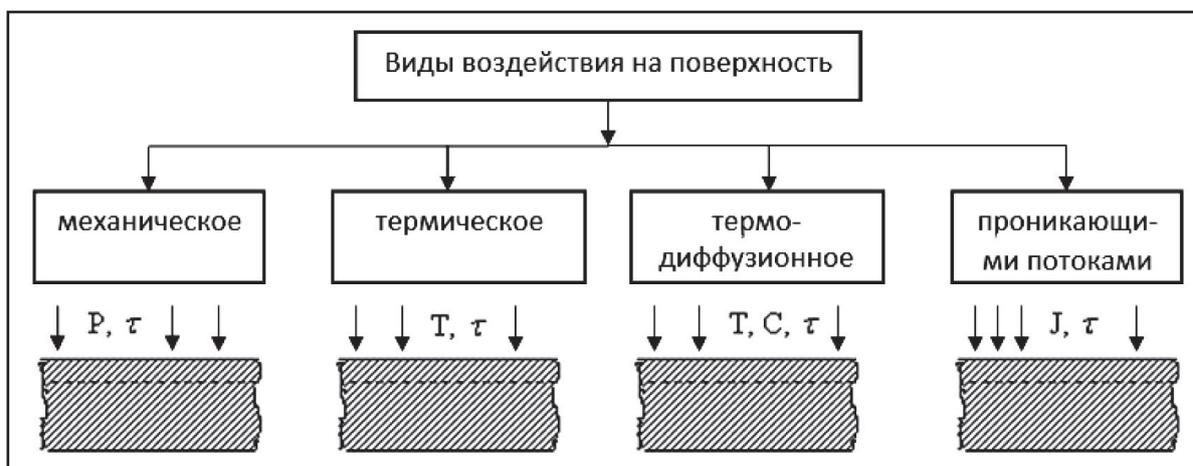


Рис. 2. Способы модификации поверхностей различными взаимодействиями: P – давление, T – температура, C – концентрация диффундирующего элемента, J – интенсивность потока, t – время

Виды и режимы комбинированной обработки стали 45

Упрочняемый материал	Виды комбинированной обработки	Оптимизированные режимы обработки
Технически чистый титан BT1-0	Электровзрывное науглероживание и последующая электронно-пучковая обработка	ЭВЛ: $q = 5,5 \text{ ГВт/м}^2$, $\tau = 100 \text{ мкс}$. ЭПО: Режим 1 – $q = 2,0 \text{ ГВт/м}^2$, $\tau = 100 \text{ мкс}$, $N = 10$. Режим 2 – $q = 2,25 \text{ ГВт/м}^2$, $\tau = 200 \text{ мкс}$, $N = 10$. Режим 3 – $q = 3 \text{ ГВт/м}^2$, $\tau = 200 \text{ мкс}$, $N = 5$.
	Электровзрывное карбоборирование и последующая электронно-пучковая обработка	

микротвердость модифицированных слоев (прибор HVS-1000A).

3. Результаты исследования и их обсуждение

По мере удаления от поверхности в градиентных структурах изменяются такие характеристики, как концентрация примесей, легирующих элементов, температурно-скоростные условия фазовых превращений и соответственно степень завершенности этих превращений. Одновременно в этом же направлении изменяются размеры фрагментов, ячеек, зерен и субзерен, плотность дефектов и их субструктура. Так, поверхностное легирование и нанесение покрытий кардинально меняют структуру поверхностных слоев, создавая диффузионные зоны и зоны термического влияния. Свообразные неоднородности структуры создаются при поверхностной коррозии. Изменение химического состава может повлечь за собой соседство принципиально разных структур, например, зеренных. В таких структурах может сильно меняться тип фазовых составляющих, набор присутствующих фаз и их морфология (рис. 3).

Благодаря таким видам обработки в поверхностном слое происходят процессы, которые приводят к изменению структуры исходного образца по глубине (рис. 4) [7, 8].

Распределение микротвёрдости после науглероживания имеет максимальное значение 800 НУ на поверхности обработки и монотонно падает до 180 НУ на глубине около 50 мкм. Ее повышение можно связывать, прежде всего, с образованием в зоне легирования упрочняющих частиц карбида титана. После ЭПО максимум микротвердости наблюдается уже не на поверхности, а на глубине около 20 мкм (рисунок 5, а). При этом его величина достигает 2500...3000 НУ. Таким образом, повышение микротвердости увеличивается в 14 раз по сравнению с микротвердостью основы материала. Увеличение длительности импульсов от 100 до 200 мкс приводит к значительному росту микротвердости вблизи поверхности облучения и формированию второго максимума на глубине 70...80 мкм (рисунок 5, б). Такое распределение микротвердости свидетельствует об интенсивных процессах взаимодействия титана с углеродом не только в зоне переплавления при ЭПО, но и в

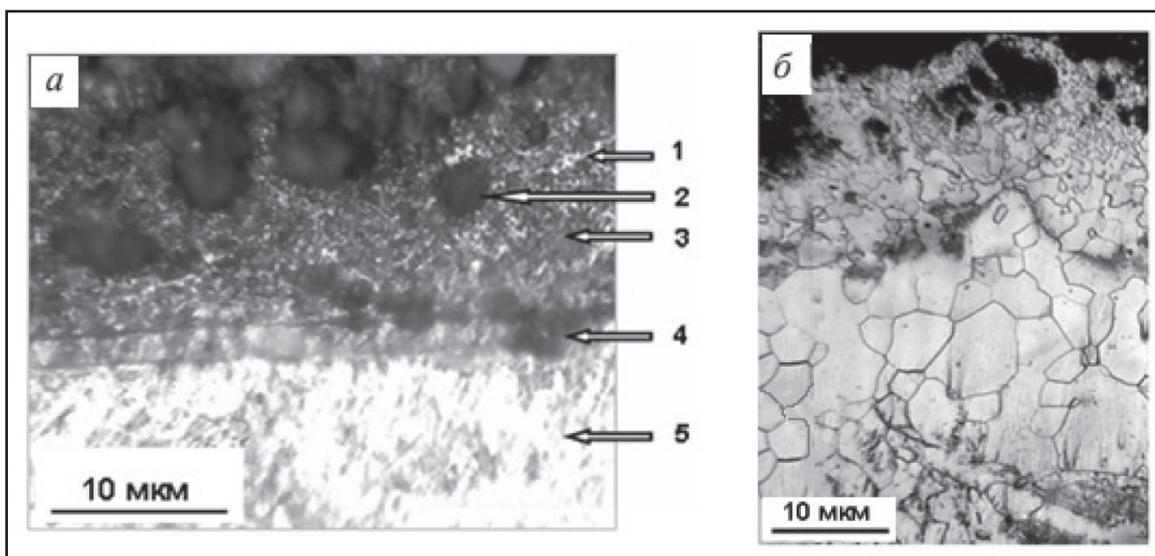


Рис. 3. Структура зоны электровзрывного легирования титана: а – только ЭВЛ; б – комбинированная обработка, сочетающая ЭВЛ + ЭПО

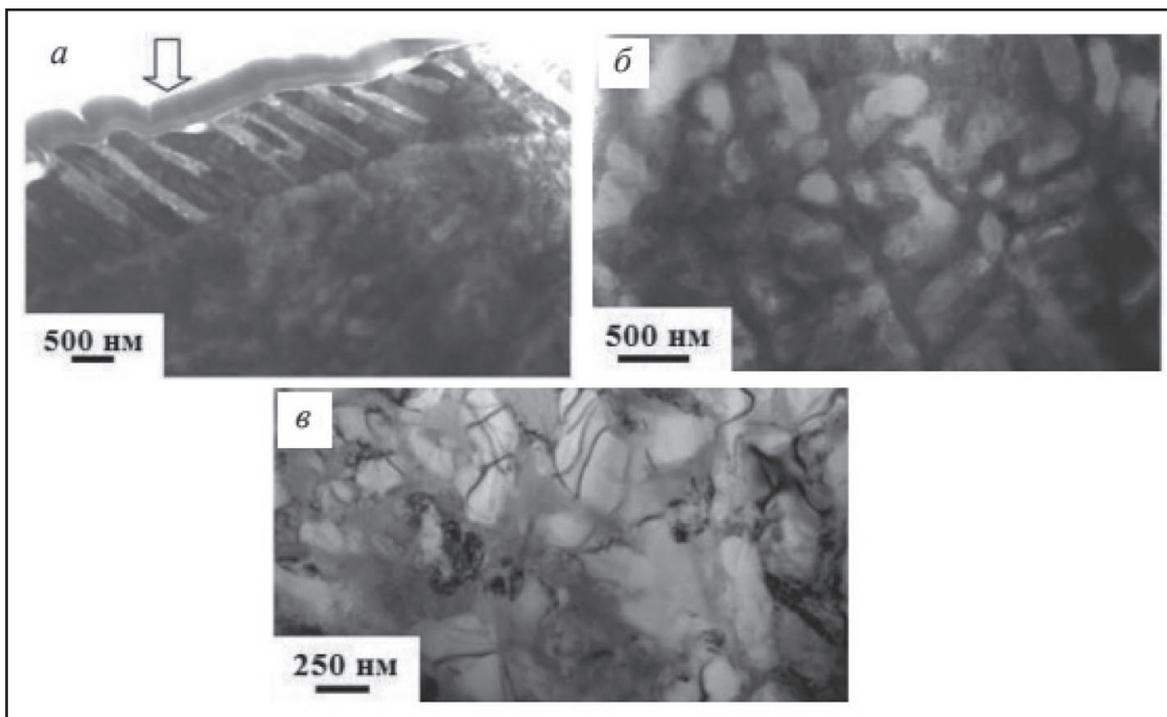


Рис. 4. Структура поверхностного слоя титана, подвергнутого комбинированной обработке, сочетающей ЭВЛ и ЭПО: а – структура поверхности модифицирования; б – структура слоя, расположенного на расстоянии 3 мкм от поверхности; в – на расстоянии ≈ 25 мкм от поверхности

более глубоких слоях, а также о влиянии механических напряжений со стороны формирующихся слоев друг на друга.

Подобные градиентные материалы по сравнению с обычными (гомогенными) характеризуются также более сложным поведением. К улучшению свойств материала или к деградации функционального градиента могут приводить именно химические реакции и диффузионные процессы. Следовательно, создание компонентов с градиентами, которые требуют заказчик с учетом возможных побочных эффектов при использовании этих материалов, является одной из задач в развитии технологии функциональных градиентных материалов [9, 10].

Одним из наиболее быстро развивающихся применений функциональных градиентных материалов является их использование в различных защитных покрытиях (энергетика, газовые турбины, химическая отрасль промышленности и т.д.). В этих областях покрытия должны оказывать сопротивление высоким температурам, агрессивным средам и термомеханическим циклическим воздействиям. По стоимости производства наиболее привлекательными являются относительно простые методы плазменного и газотермического напыления на воздухе.

Важным вопросом является снижение стоимости производства функциональных градиентных материалов по сравнению с гомогенными материалами,

имеющими, однако, более низкий уровень эксплуатационных свойств. С учетом тенденций повышения требований к материалам следует ожидать, что решение проблем при использовании таких материалов будет одним из широко применяемых направлений в материаловедении.

Области применения и перспективы развития метода обработки поверхности концентрированными потоками энергии

Диапазон технологических операций по модификации поверхности инструмента и различных деталей машин значительно расширяется при сочетании перечисленных преимуществ с наличием выпускаемого, апробированного в течение более чем 40 лет и надежного, оборудования.

В последние годы активно изучались возможности и перспективы поверхностного упрочнения металлических материалов концентрированными потоками энергии. Это было связано, прежде всего, с разработкой мощных источников лазерного излучения, позволяющих сравнительно простыми средствами автоматизировать процессы обработки с целью их практического использования. Широкий спектр исследований по лазерной обработке был отражен в целом ряде монографий, изданных как у нас в стране, так и за рубежом [6]. Однако, высокая стоимость

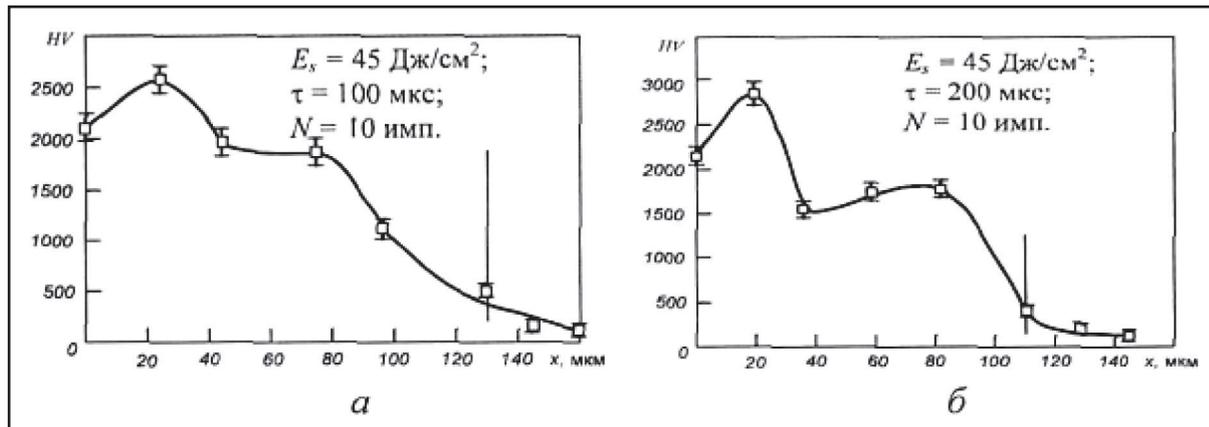


Рис. 5. Распределение микротвёрдости по глубине науглероженных слоёв титана после комбинированной обработки в различных (а, б) режимах (вертикальными линиями обозначена толщина упрочнённого поверхностного слоя)

необходимого оборудования и его низкая производительность до сих пор не привели к широкому распространению лазерного упрочнения в промышленности. Значительное развитие получили также методы упрочнения поверхности электронными пучками, прежде всего – импульсными. Также как и при использовании лазерного излучения, они позволяют проводить обработку с оплавлением поверхности. В то же время обнаружилось очевидное отставание в научных исследованиях и практических разработках плазменных методов упрочнения. Основное внимание уделялось использованию плазменных струй стационарных источников для нанесения порошковых покрытий. Вместе с тем, возможности использования концентрированных плазменных струй значительно шире, поскольку их воздействие на поверхность может приводить к её оплавлению и легированию.

Каждый из способов упрочнения поверхности металлов концентрированными потоками энергии имеет как преимущества, так и недостатки. Ни один из них не может быть признан универсальным. Каждый из них оптимален для решения только определённого круга задач. По мнению авторов работ [6, 7], значительными преимуществами перед другими способами легирования обладает электровзрывная обработка металлов. В едином технологическом процессе, она позволяет провести оплавление поверхностных слоёв, их жидкофазное легирование продуктами взрыва проводников с последующей самозакалкой. Для её реализации, могут быть использованы промышленные разрядно-импульсные установки, обладающие сравнительно низкой стоимостью, конструктивной простотой и высокой надёжностью

Исследования, проведённые в работе [9], показали, что результаты электровзрывной обработки определяются одновременным действием на поверхность высоких температур и давлений со стороны ударно-сжатого слоя, формируемого вблизи облучаемой

поверхности, адсорбции плазменных компонентов пучка образующимся расплавом, гидродинамическими процессами перемешивания, обусловленными течением расплава и взаимодействием его с конденсированными продуктами взрыва. Несмотря на сложности совместного анализа перечисленных факторов обработки, удалось построить ряд феноменологических моделей электровзрывной обработки, позволяющих определить пути её оптимизации. Исследования также показали, что электровзрывная обработка обладает достаточно гибкими возможностями управления режима воздействия на поверхность. Всё это открывает перспективы дальнейших разработок в этом направлении [11, 12].

4. Заключение

1. Анализ модифицированных слоёв показал, что наилучшими эксплуатационными свойствами обладают так называемые градиентные слои, свойства которых меняются по какому-либо направлению, например по глубине. Применение градиентных слоёв в области поверхностного упрочнения и защиты материалов показывает перспективность формирования градиентных слоёв с использованием концентрированных потоков энергии.

2. Установлено, что при электровзрывном науглероживании микротвёрдость поверхности достигает 800 HV. При ЭПО происходят увеличение микротвёрдости поверхности до 2500...3000 HV, формирование двух максимумов микротвёрдости на глубине 20 и 70...80 мкм от поверхности и увеличение глубины зоны упрочнения от 50 до 90... 100 мкм. После электровзрывного карбоборирования микротвёрдость вблизи поверхности возрастает до 2500...3000 HV. Толщина упрочнённого поверхностного слоя достигает 120 мкм. Науглероживание титана приводит к формированию на поверхности несплошного покрытия.

3. Выделены три характерные составляющие структуры поверхности. При последующей ЭПО происходит выравнивание рельефа поверхности обработки, объединение покрытия с зоной легирования.

Список литературы

1. Формирование градиентных структурно-фазовых состояний в поверхностных слоях 100-м дифференцированно закаленных рельсов / В.Е. Громов, А.А. Юрьев, Ю.Ф. Иванов [и др.] // *Металлы*. 2019. № 4. С. 58–64.
2. Козлов Э.В., Глезер А.М., Громов В.Е. Градиентные структурно-фазовые состояния в твёрдых телах // *Известия РАН. Сер. Физ.* 2003. Т. 67. № 10. С. 1374.
3. Градиентные структурно-фазовые состояния в рельсовой стали / В.Е. Громов, В.А. Бердышев, Э.В. Козлов [и др.] М.: Недра ком. ЛТД, 2000. 176 с.
4. Formation of Gradient Structure–Phase States in the Surface Layers of 100-m Differentially Quenched Rails / V.E. Gromov, A.A. Yur'ev, K.V. Morozov [et al.] // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. Vol. 2019. No 7. Pp. 710–715.
5. Будовских Е.А., Сарычев В.Д., Громов В.Е., Носарев П.С., Мартусевич Е.В. Основы технологии обработки поверхности металлов импульсной гетерогенной плазмой: Монография / СибГИУ, 2002. 170 с.
6. Ионина А.В. Модификация поверхности технически чистого титана ВТ1-0 после различных видов обработки // *Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы (современный мир в условиях глобальной турбулентности): Материалы VI Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 08–09 декабря 2022 года* / Отв. редактор Т.А. Евсина. редколлегия: Ю.А. Кузнецова [и др.]. Кемерово-Новокузнецк: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, филиал КузГТУ в г. Новокузнецке, 2022. С. 56–59.
7. Структурно-фазовые состояния и свойства поверхности стали 45 после электровзрывного боромеднения и электронно-пучковой обработки / Е.С. Ващук, Е.А. Будовских, Л.П. Башенко [и др.] // *Известия Алтайского государственного университета*. 2021. № 4(120). С. 17–23.
8. Иванов Ю.Ф., Почетуха В.В., Романов Д.А. [и др.] Структура и свойства покрытия на основе серебра, никеля и азота, сформированного комбинированным методом на меди. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18. № 1. С. 68–73.
9. Ultrastrong pure aluminum structure with gradient nanocrystals via selective pulsed laser melting: Computation framework and experiments / G.J. Cheng, D.D.C. Branco, L.S. De Vasconcelos [et al.] // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2021. Vol. 151. P. 104391.
10. Токмачева-Колобова А.Ю. Исследование механизма наноструктурирования приповерхностных слоев титана при воздействии лазерными импульсами наносекундной длительности. *Письма в Журнал технической физики*. 2021. Т. 47. № 3. С. 40–43.
11. Применение магнитоэлектрических градиентных структур / А.О. Никитин, В.А. Киселев, В.А. Мисилин, Р.В. Петров // *Вестник Новгородского государственного университета*. 2022. № 3(128). С. 102–107.
12. Создание градиентных структур в крупногабаритных заготовках эндопротезов из сплава ВТ6 термоводородной обработкой / А.В. Нейман, А.М. Мамонов, Е.О. Агаркова, А.В. Овчинников // *Титан*. 2021. № 2(71). С. 10–15.

References

1. Formirovanie gradientnykh strukturno-fazovykh sostoyaniy v poverkhnostnykh sloyakh 100-m differentsirovanno zakalennykh relsov [Formation of gradient structural-phase states in surface layers of 100-m differentially hardened rails] / V.E. Gromov, A.A. Yuryev, Yu.F. Ivanov [et al.] // *Metals*. 2019. No. 4. Pp. 58–64.
2. Kozlov E.V., Glezer A.M., Gromov V.E. Gradientnye strukturno-fazovye sostoyaniya v tverdykh telakh [Gradient structural-phase states in solids] // *Izvestiya RAS. Ser. Phys.* 2003. Vol. 67. No. 10. Pp. 1374.
3. Gradientnye strukturno-fazovye sostoyaniya v relsovoy stali [Gradient structural-phase states in rail steel] / V.E. Gromov, V.A. Berdyshev, E.V. Kozlov [et al.]. M.: Nedra com. LTD., 2000. 176 p.
4. Formation of Gradient Structure–Phase States in the Surface Layers of 100-m Differentially Quenched Rails / V.E. Gromov, A.A. Yur'ev, K.V. Morozov [et al.] // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2019. Vol. 2019. No. 7. Pp. 710–715.
5. Budovskikh E.A., Sarychev V.D., Gromov V.E., Nosarev P.S., Martusevich E.V. Osnovy tekhnologii obrabotki poverkhnosti metallov impulsnoy geterogennoy plazmoy: Monografiya [Fundamentals of metal surface treatment technology with pulsed heterogeneous plasma: Monograph]. SibGIU, 2002. 170 p.

6. Ionina A.V. Modifikatsiya poverkhnosti tekhnicheskhi chistogo titana VT1-0 posle razlichnykh vidov obrabotki [Modification of the surface of technically pure titanium VT1-0 after various types of processing]. // Voprosy sovremennoy nauki: problemy, tendentsii i perspektivy (sovremennyy mir v usloviyakh globalnoy turbulentsi): Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Novokuznetsk, 08–09 dekabrya 2022 goda / Otv. redaktor T.A. Yevsina. redkollegiya: Yu.A. Kuznetsova [i dr.]. – Kemerovo-Novokuznetsk: Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet imeni T.F. Gorbacheva, filial KuzGTU v g. Novkuznetske [Issues of modern science: problems, trends and prospects (the modern world in conditions of global turbulence): Materials of the VI International Scientific and Practical Conference, Novokuznetsk, 08-09 December 2022 / Editor-in-chief T.A. Evsina. editorial board: Yu.A. Kuznetsova [et al.]. – Kemerovo-Novokuznetsk: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, KuzSTU branch in Novkuetsk]. 2022. Pp. 56–59.
7. Strukturno-fazovye sostoyaniya i svoystva poverkhnosti stali 45 posle elektrovzryvnogo boromedneniya i elektronno-puchkovoy obrabotki [Structural-phase states and properties of the surface of steel 45 after electro-explosive boromedning and electron beam processing] / E.S. Vashchuk, E.A. Budovskikh, L.P. Baschenko [et al.] // Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta [Proceedings of the Altai State University]. 2021. No. 4(120). Pp. 17–23.
8. Ivanov Yu.F., Pochetukha V.V., Romanov D.A. [et al.] Struktura i svoystva pokrytiya na osnove serebra, nikelya i azota, sformirovannogo kombinirovannym metodom na medi [Structure and properties of a coating based on silver, nickel and nitrogen formed by a combined method on copper]. Fundamentalnye problemy sovremennoy materialovedeniya [Fundamental problems of modern materials science]. 2021. Vol. 18. No. 1. Pp. 68–73.
9. Ultrastrong pure aluminum structure with gradient nanocrystals via selective pulsed laser melting: Computation framework and experiments / G.J. Cheng, D.D.C. Branco, L.S. De Vasconcelos [et al.] // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2021. Vol. 151. Pp. 104391.
10. Tokmacheva-Kolobova A.Yu. Issledovanie mekhanizma nanostrukturirovaniya pripoverkhnostnykh sloev titana pri vozdeystvii lazernymi impulsami nanosekundnoy dlitelnosti [Investigation of the mechanism of nanostructuring of near-surface layers of titanium when exposed to nanosecond laser pulses]. Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Letters to the Journal of Technical Physics]. 2021. Vol. 47. No. 3. Pp. 40–43.
11. Primenenie magnitoelektricheskikh gradientnykh struktur [Application of magnetoelectric gradient structures] / A.O. Nikitin, V.A. Kiselev, V.A. Misilin, R.V. Petrov // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of the Novgorod State University]. 2022. № 3(128). Pp. 102–107.
12. Sozdanie gradientnykh struktur v krupnogabaritnykh zagotovkakh endoprotezov iz splava VT6 termovodorodnoy obrabotkoy [Creation of gradient structures in large-sized blanks of endoprostheses made of VT6 alloy by thermohydrogen treatment] / A.V. Neiman, A.M. Mamonov, E. O. Agarkova, A.V. Ovchinnikov // Titan. 2021. № 2(71). Pp. 10–15.

Сведения об авторах

Ионина Анна Валерьевна, канд. техн. наук, заведующая кафедрой технических дисциплин и информационных технологий

Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева в г. Новокузнецке 654006, Российская Федерация, Кемеровская область, Кузбасс, ул. Орджоникидзе, 7

Будовских Евгений Александрович, доктор техн. наук, профессор, старший научный сотрудник Сибирский государственный индустриальный университет

654007, Российская Федерация, Кемеровская область, Кузбасс, ул. Кирова, 42

Information about authors

Ionina Anna Valeryvna, Cand. of Techn. Sciences
Branch of Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev in Novokuznetsk

654006, Russian Federation, Kemerovo region, Kuzbass, st. Ordzhonikidze, 7

Budovskikh Eugene Alexandrovich, Doctor of Techn. Sciences, Professor, Senior Researcher
Siberian State Industrial University

654007, Russian Federation, Kemerovo region, Kuzbass, st. Kirova, 42