

УДК 623.746: 629.7.083.003.13 (045)

¹М. В. Киндрачук, д-р техн. наук, проф.,

¹А. Л. Шевченко, асп.,

²В. А. Костин, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,

¹В. И. Вовк, инж.,

¹И. А. Слепухина, канд. физ-мат. наук, доц.

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС АЗОТИРОВАНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

¹Национальный авиационный университет, LSD-Tuning@ukr.net

²Институт сварки им. Е. О. Патона

Рассмотрены особенности влияния предварительной лазерной обработки на строение и свойства азотированных слоёв на титановом сплаве ВТ6. Показано, что качественный и количественный характер изменений в азотированном слое определяется предварительно сформированным структурно-фазовым состоянием.

Введение и состояние проблемы. Авиакосмическая промышленность остаётся самым крупным потребителем титановых сплавов. Титановые сплавы, способны к длительному функционированию при температурах от минус 253 °С до + 600 °С и кратковременному – до + 800 °С.

Сплавы типа ВТ6 ($\alpha + \beta$)-класса относятся к наиболее распространенным за рубежом титановым сплавам. Так, около 50 % используемого в авиационной и космической технике титана приходится на сплав Ti-6Al-4V или его аналоги [1] (отечественным аналогом являются сплавы типа ВТ6).

Сплав ВТ6 (ГОСТ 19807–91) – малопластичный, труднодеформируемый титановый сплав высокой прочности (ВТ означает, что организация-разработчик – Всероссийский НИИ авиационных сплавов; 6 – порядковый номер разработки сплава) с твердостью материала (штампованного) после отжига по Бринеллю составляет $HV\ 10^{-1} = 255\text{--}341\text{ МПа}$.

Этот сплав успешно применён для изготовления баллонов высокого давления топливных систем (окислитель, азот, гелий) в ракетах «Титан-2», «Атлас», «Апполон», «Поларис» и др. (работающих в широком интервале температур от минус 196 до +450 °С).

В своё время фирмой «Т. У. Brooks» было освоено производство болтов из сплава Ti-6Al-4V. Считается, что титановый крепёж (по усталостной прочности) обладает большей работоспособностью, чем аналогичный крепёж из стали.

Из титановых сплавов изготавливаются столь ответственные изделия, как втулки несущего винта вертолётных типа S-65, валы шасси, а также втулки хвостового винта, цапфы, скобы, корпуса осевых шарниров, наконечники лопастей и т. п.

Из сплавов типа Ti-6Al-4V, Ti-8Al-10V, Ti-8Al-1Mo-1V производят диски и лопатки компрессоров низкого и высокого давления и температур до 400 °С. По данным фирмы «Pratt and Whitney» лопатки из сплава Ti-6Al-4V эксплуатировались в течение сем лет без поломок. Также имеются сведения об изготовлении компрессорных лопаток из композиционного материала в виде порошка сплава Ti-6Al-4V, армированного молибденовой проволокой.

Также сплав Ti-6Al-4V был применён для изготовления лопаток первых ступеней ротора морской паровой турбины, где наблюдалась сильная питтинговая коррозия на лопатках турбин, изготовленных из сплава, содержащего 12 % хрома. Титановые лопатки после 2000 ч эксплуатации не имели каких-либо признаков коррозионных и эрозионных повреждений.

Такое широкое распространение этого сплава объясняется удачным его легированием (степень легированности VT6 – 0,28). Алюминий в сплавах системы Ti-Al-V повышает прочностные и жаропрочные свойства, а ванадий относится к тем немногим легирующим элементам в титане, которые повышают не только прочностные свойства, но и пластичность.

Наряду с высокой удельной прочностью сплавы этого типа обладают меньшей чувствительностью к водороду по сравнению со сплавами OT4 и OT4-1, низкой склонностью к солевой коррозии и хорошей технологичностью.

Сплавы хорошо деформируются в горячем состоянии. Из сплавов типа VT6 получают прутки, трубы, профили, поковки, штамповки, плиты, листы. Они свариваются всеми традиционными видами сварки, в том числе и диффузионной. При электронно-лучевой сварке прочность сварного шва равна прочности основного материала, что выгодно отличает этот сплав от VT-22.

Сплавы типа ВТ6 применяют в отожженном и термически упрочнённом состояниях. Отжиг листов, тонкостенных труб, профилей и деталей из них обычно проводят при температуре 750–800 °С с последующим охлаждением на воздухе или вместе с печью. Отжиг прутков, поковок, штамповок и других крупногабаритных полуфабрикатов и деталей из них проводят при температуре 750–800 °С. Охлаждение вместе с печью крупных полуфабрикатов предотвращает их коробление, а для мелких деталей позволяет избежать частичной заковки. Однако в последнее время было доказано, что целесообразно повысить температуру отжига до 900–950 °С, что приведёт к повышению вязкости разрушения и ударной вязкости при сохранении высоких пластических свойств из-за формирования смешанной структуры с большой долей пластинчатой составляющей.

Рост применения титановых сплавов показывает и автомобильный сектор. В системах подвесок, например, замена стальных пружин на титановые даёт преимущество в виде уменьшения веса на 60 %. Так в 70-е годы в Англии было организовано производство титановых шатунов для гоночных автомобилей объёмом цилиндров 350 и 500 см³. При этом достигнуто уменьшение массы шатуна на 30 %, что привело к снижению инерционных нагрузок кривошипно-шатунного механизма, увеличению мощности двигателя на 12 л.с. и экономии горюче-смазочных материалов. Также в гоночных автомобилях титановые сплавы применяют в производстве коленчатых валов, впускных и выпускных клапанов, коромысла клапанов, соединительных тяг, передних и задних осей, втулок, гаек, торсионных рычагов, деталей подвески и выхлопной системы и др. Опыт использования титановых сплавов показывает, что наиболее целесообразно применение их для деталей высоконагруженных двигателей (рекомендованы сплавы средней прочности и жаропрочные), несущей конструкции автомобилей (сплавы средней прочности) и ходовой части (сплавы средней прочности и высокопрочные). По данным работы [1] применение сплавов титана для таких деталей автомобильных и дизельных двигателей, как шатуны, клапаны и глушители, позволит существенно увеличить мощность двигателя, повысить надёжность и долговечность ряда деталей возвратно поступательных систем.

Несмотря на то, что титановые сплавы являются уникальными материалами, характеризующимися сочетанием физико-химических и механических свойств их применение во многих случаях, ограничивается из-за низких антифрикционных свойств и их склонности к схватыванию, а также низкой твердости поверхности. Поэтому их применение в реальных узлах трения возможно только при наличии покрытий, наносимых различными методами.

В настоящее время для увеличения износостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости и поверхностной твердости титана и его сплавов применяют газопламенные, плазменные, детонационные покрытия и гальваническое хромирование [2; 3; 4]. Одним из таких методов является весьма перспективный метод ионного азотирования (ИА) [5], который начинает находить в последнее время всё большее применение в исследовательском и промышленном направлениях.

Суть ионно-плазменного азотирования заключается в том, что в разряженной (до 100–1000 Па) азотсодержащей газовой среде между катодом, на котором располагаются обрабатываемые детали, и анодом, в качестве которого служат стенки вакуумной камеры, возбуждается аномальный тлеющий разряд, образующий активную среду (ионы, атомы, возбужденные молекулы). Это обеспечивает формирование на поверхности изделия азотированного слоя, состоящего из внешней – нитридной зоны и располагающейся под ней диффузионной зоны.

При этом в зависимости от целей обработки в результате ИА возможно получение:

- диффузионного слоя с развитой нитридной зоной, обеспечивающей высокую сопротивляемость коррозии и прирабатываемость трущихся поверхностей для деталей, работающих на износ;
- диффузионного слоя без нитридной зоны для режущего и штампового инструмента и деталей, работающих при знакопеременных нагрузках в условиях изнашивания при высоких давлениях.

С помощью метода ИА можно улучшить такие характеристики изделий, как износостойкость, усталостную выносливость, антиадгезионные свойства, теплостойкость и коррозионную стойкость.

В частности, методом ИА давно и успешно обрабатываются следующие изделия многих ведущих авто- и машиностроительных предприятий мира:

- форсунки для легковых автомобилей, несущие пластины

автоматического привода, матрицы, пуансоны, штампы, пресс-формы (Daimler Chrysler);

- пружины для системы впрыска (Opel);
- коленчатые валы (Audi);
- распределительные (кулачковые) валы (Volkswagen);
- коленчатые валы для компрессора (Atlas, США и Wabco, Германия);
- шестерни для BMW (Handl, Германия);
- автобусные шестерни (Volvo);
- шестерни на Минском заводе колёсных тягачей (МЗКТ);
- шестерни и другие детали (МАЗ);
- шестерни большого (более 800 мм) диаметра (БелАЗ).

В данной работе проведено импульсное газотермоциклическое ионное азотирование (ГТЦ ИА) в пульсирующем пучке плазмы титановых образцов с целью улучшения антифрикционных свойств поверхности промышленных титановых сплавов. Исследован распространённый сплав ВТ6 (86,485-91,2 % Ti (основа); 3,5-6,8 % Al; 3,5-5,3 % V; до 0,3 % Zr; до 0,3 % Fe; до 0,15 % Si; до 0,1 % C; до 0,05 % N; до 0,015 % H₂; до 0,2 % O₂; 0,3 % прочих примесей), который относится к первым отечественным конструкционным титановым сплавам.

Так, до настоящего времени не существует единой точки зрения на механизм диффузионного насыщения азотом, однако большинство авторов [5; 6] считает, что определяющую роль при азотировании и особенно при низких температурах играют ионы молекулярного и атомарного азота. Если рассматривать азотирование как плазмохимический процесс, то необходимо дополнительное условие, при котором насыщение азотом осуществляется в плазме, содержащей атомы N и ионы N⁺, т.е. наряду с ионизацией необходимо создавать условия, при которых диссоциация азота максимальна.

Но, метод ИА – «медленный» процесс насыщения азотом изделий. Для увеличения скорости насыщения провели предварительную лазерную обработку (ЛО) поверхности титановых сплавов.

Цель работы – изучение влияния режимов предварительной ЛО на скорость азотирования и характеристики титановых сплавов.

Постановка задания. Легирующие элементы, которые входят в состав титановых сплавов, подразделяются на α- (Al), β- (Mn,

V, Mo, Cr, Fe, Nb, Si, W) – стабилизаторы и нейтральные упрочнители (Zr, Sn) [5]. При насыщении сплавов азотом проходит перераспределение легирующих элементов как между азотированным слоем и матрицей сплава, так и в самом азотированном слое.

Ограниченная растворимость ванадия в α -Ti сплава BT6 приводит к тому, что в меру стабилизации азотом α - твёрдого раствора ванадий выделяется с ГПУ-решётки, скапливается на границах зёрен и по ним диффундирует в более глубокие слои сплава BT6. Увеличение концентрации алюминия в приповерхностных слоях вследствие его перераспределения в твёрдом растворе уменьшает растворимость ванадия в них 0,5...1,2 % (массовых долях) в сплаве Ti-6Al против 1,5...3,5 в α -Ti), что обуславливает активизацию его выделения с твёрдого раствора и диффузионный отвод в глубину сплава. С увеличением температуры изотермической выдержки указанные процессы интенсифицируются, что отображается в увеличении скорости азотирования сплава [5].

Известно [7; 8], что в основе процесса ЛО (термоупрочнения) двухфазных титановых сплавов лежит полиморфное $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ превращение, которое включает наряду с ГПУ-ОЦК-перестройкой кристаллической решётки, диффузионное перераспределение легирующих элементов. Идентификация механизма $(\alpha+\beta)\rightarrow\beta$ превращения в условиях сверхвысоких скоростей нагрева, когда возникает несоответствие между скоростью нагрева и скоростью диффузионных процессов и выявление диффузионного $\beta\rightarrow\alpha+\beta$ или мартенситного $\beta\rightarrow\alpha'(\alpha'')$ механизмов превращения при повышенных скоростях охлаждения, являют собой весьма сложную экспериментальную задачу.

Разработаны способы упрочнения предварительно обработанных лазером поверхностей химико-термической обработкой (азотированием). Установлено, что предварительная ЛО ускоряет диффузионные процессы азотирования.

Методика исследований. Предварительную ЛО кольцевых образцов из титанового сплава BT6 ($\rho = 4430 \text{ кг/м}^3$) размером $39\times 20\times 2 \text{ мм}$ (микроструктура сплава BT6 в исходном состоянии полученную методом оптической металлографии показано на рис. 1) проводили на установке «ЛАТУС-31» при следующих режимах: мощность излучения – 800 Вт; диаметр пятна фокусирования – 5 мм; скорость передвижения лазерного луча – 0,5, 0,8 и 1,2 м/мин (рис. 2).

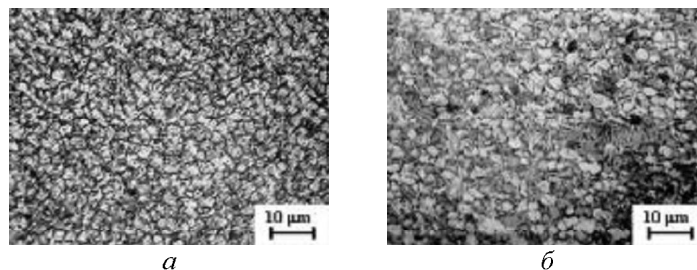


Рис. 1. Микроструктура сплава ВТ6 в исходном состоянии:
а – поперечное сечение; *б* – продольное сечение

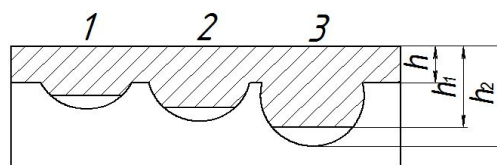


Рис. 2. Схема ЛО титанового сплава ВТ6:
1, 2, 3 – участки ЛО, которые соответствуют скоростям передвижения лазерного луча 0,5, 0,8 и 1,2 м/мин соответственно; *h* – глубина азотированного слоя без ЛО; *h₁* – глубина азотированного слоя в зоне ЛО; *h₂* – глубина ЛО

Диффузионное насыщение азотом предварительно подготовленных образцов проводили в среде 80 % N_2 + 20 % Ar (так как азотирование в аммиаке не применяется из-за увеличения хрупкости титана) при следующих параметрах технологического процесса: температура азотирования образцов – 800 °С; продолжительность импульсного ГТЦ ИА – 6 ч; величина исходного напряжения, которое подаётся на деталь – 400 В. Одну часть образцов азотировали без предварительной ЛО, вторую – с предварительной ЛО.

Для выявления микроструктуры титанового сплава ВТ6 использовали химическое травление образцов-свидетелей, в реактиве (1 часть NH_4F , 3 части HNO_3 , одна часть H_2O) в течении 45 с при температуре 20 °С на воздухе.

Замер микротвёрдости структурных составляющих проводили соответственно с ГОСТ 9450–89 с помощью микротвердомера ПМТ-3М при нагрузке на индентор 100 г, время выдержки под нагрузкой – 20 с, шаг измерения по толщине образца-свидетеля – 30...40 мкм. Также замер микротвёрдости проводили на микротвер-

доме Викарс М-400 Hardness Tester фирмы «LECO». В каждом случае проводилось не менее 9 замеров микротвёрдости исследуемой структурной составляющей. Приведенные значения микротвёрдости являются среднеарифметическими значениями замеров (рис. 5).

Фрактографические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе JSM-35 CF фирмы «JEOL» (Япония) оснащённого системой микроанализа INCA энергодисперсионным спектром.

Для изучения химического состава поверхностных слоёв использовали микрорентгеноспектральный метод, который обеспечивает высокую локальность исследований (до 1 мкм). Элементный состав образцов из титанового сплава анализировался с помощью энергодисперсионного спектрометра «INCA 450» фирмы «Oxford Instruments» (Англия). Для построения концентрационных карт распределения элементов по избранному участку использовалось разработанное фирмой «Oxford Instruments» программное обеспечение – программа SMARTMAP, основанная на дискретном сканировании электронным лучом на поверхности образца с фиксацией интенсивности характеристического излучения в каждой точке области сканирования, и составляла 128×128 точек или 165×165 мкм.

Результаты исследований. Вид зоны титанового сплава ВТ6 после предварительной ЛО и последующего за ней процесса импульсного ГТЦ ИА показано на рис. 3.

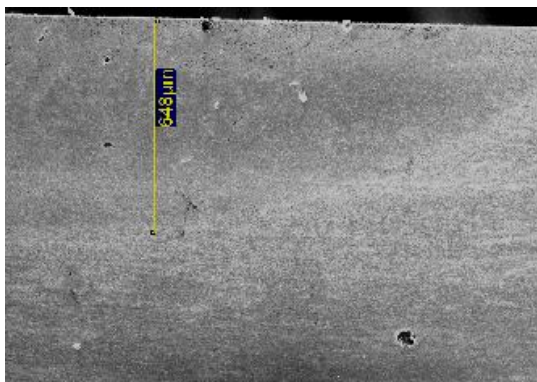


Рис. 3. Микроструктура титанового сплава ВТ6 после предварительной ЛО ($V = 0,5$ м/мин) и импульсного ГТЦ ИА, $\times 400$

В результате анализа морфологии структуры сплава ВТ6 установлено, что результирующее изменение структуры явилось следствием наложения двух процессов – фазового $(\alpha+\beta) \rightarrow \beta$ превращения и рекристаллизации. Рост зерна может происходить только в β -области. Также подтверждено [7], что при наносекундной обработке время пребывания в β -области мало, зерно не успевает вырасти большим и почти мгновенное охлаждение приводит к глобуляризации структуры. Так, в результате при охлаждении после скоростного нагрева происходит более равномерное образование β -превращённой фазы и более легированного α "-мартенсита.

Анализ полученных данных показал, что в зависимости от технологических параметров ЛО (в данном случае от скорости перемещения лазерного луча) изменяется фазовый состав, толщина (рис. 4) и микротвёрдость азотированного слоя.

График распределения микротвёрдости титанового образца в поперечном сечении по глубине титанового образца-свидетеля представлен на рис. 5. Микротвёрдость с удалением от поверхности в глубину слоя плавно снижается до уровня исходной матрицы.

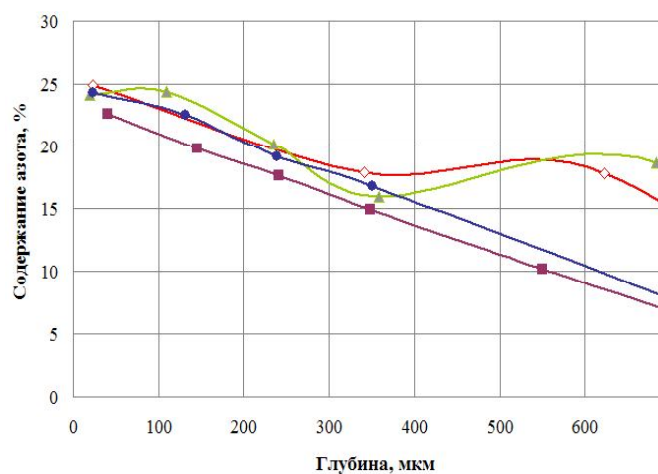


Рис. 4. Распределение содержания азота по глубине образца из титанового сплава ВТ6 после предварительной ЛО с последующим импульсным ГТЦ ИА: $\diamond$ – ЛО ($V=0,5$ м/мин); $\blacksquare$ – без ЛО; $\blacktriangle$ – ЛО ($V=0,8$ м/мин); $\bullet$ – ЛО ($V=1,2$ м/мин)

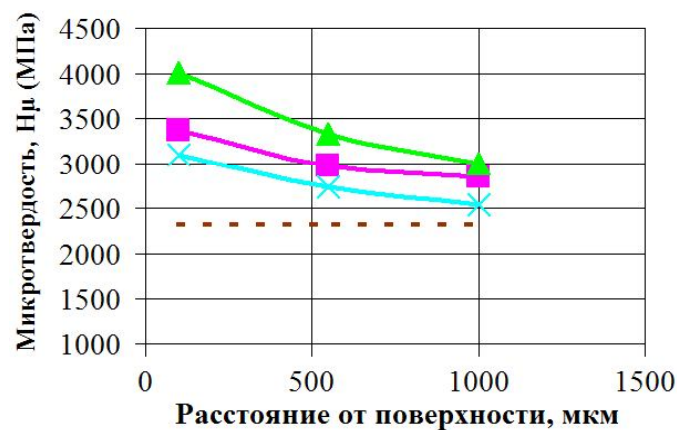


Рис. 5. Изменение микротвёрдости по глубине образца из титанового сплава ВТ6 в зависимости от скорости перемещения лазерного луча:
 - - исходная; ■ – ЛО ($V=0,5$ м/мин); ▲ – ЛО ($V=0,8$ м/мин); × – ЛО ($V=1,2$ м/мин)

При проведении элементного анализа образца-шлифа из титанового сплава, который проводился на сканирующем электронном микроскопе JSM-35 CF, было установлено, что в «зоне с ЛО», соответствующей режиму предварительной ЛО при скорости передвижения лазерного луча $V=1,2$ м/мин, «азотированный» слой составляет 50 мкм (см. рис. 4).

В результате исследований отмечено значительное (больше на 70 %) повышение твёрдости поверхности титановых сплавов относительно исходной. Это вызвано изменением фазового состава в поверхностном слое с образованием твёрдого раствора азота в α -Ti-фазе, нитрида TiN и диоксида TiO_2 и химического состава сплава. В сплавах с α - и ($\alpha+\beta$)-структурами после азотирования при температуре 1050 °С поверхностные слои неоднородны по составу и неравномерны по толщине, а после обработки при температуре 950 °С поверхностные слои гомогенные и имеют высокие свойства.

Проанализировав влияние параметров процесса азотирования установлено, что варьируя состав насыщающего газа, давление, температуру и время выдержки, можно получать слои заданной структуры, фазового состава и толщины поверхностного слоя, а также микротвёрдости, обеспечивая строго регламентируемые свойства

титана и сплавов. Оптимизация свойств упрочняемой поверхности обеспечивается за счёт необходимого сочетания нитридного и диффузионного слоёв, которые врастают в основной материал.

В настоящее время проводятся исследования триботехнических характеристик полученных покрытий, результаты которых будут представлены в дальнейших публикациях.

Выводы. В результате анализа полученных зависимостей, установлено, что уменьшение скорости предварительной ЛО поверхности титанового сплава производит существенное влияние на интенсивность образования твёрдых растворов разных фаз и химических соединений типа TiN. При этом качественный и количественный характер изменений в азотированном слое определяются предварительно сформированным структурно-фазовым состоянием.

Также установлено, что технологическое объединение ЛО поверхности и процесса азотирования значительно повышает микротвёрдость поверхности.

Список литературы

1. *Титановые сплавы в машиностроении* [Б. Б. Чечулин, С. С. Ушков, И. Н. Разуваева, В. Н. Гольдфайн]. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
2. *Киндрачук М. В.* Триботехнические свойства плазменных покрытий на титановом сплаве BT-22 / М. В. Киндрачук, Э. А. Кульгавый, А. Л. Шевченко, Е. В. Корбут // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2008. – Вип. 50. – С. 171 – 179.
3. *Киндрачук М. В.* Триботехнические характеристики детонационных покрытий на титановом сплаве BT-22 / М. В. Киндрачук, Э. А. Кульгавый, А. Л. Шевченко, А. П. Данилов // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2009. – Вип. 51. – С. 111 – 122.
4. *Orłowicz W., Mróz M.*: Odporność na zużycie ścierne uszlachetnionych powierzchniowo odlewów ze stopu C355. ARCHIWUM ODLEWNICTWA, –Т.4, z.12, – S. 197–202, 2004.
5. *Федірко В. М.* Азотування титану та його сплавів / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк. – К.: Наук. думка, 1995. – 222 с.
6. *Ахмадеев Ю. Х.* Азотирование технически чистого титана в тлеющем разряде с полым катодом / Ю. Х. Ахмадеев, И. М. Гончаренко, Ю. Ф. Иванов, Н. Н. Коваль, П. М. Щанин // ЖТФ. – Т.31, вып. 13. – 2005. – С. 24 – 30.
7. *Панова Т. К.* Полиморфные превращения в (α+β)-титановых сплавах

под действием ионных пучков / Т. К. Панова, Г. И. Геринг, Н. И. Писчасов, В. С. Ковивчак // Вест. Омск. ун-та, 1997. – Вып. 1. – С. 23 – 25.

8. Орлович А. В. Применение высокоскоростной кристаллизации для повышения износостойкости отливок из сплава Al-Si / А. Орлович, М. Мруз, А. Трытек // Трение и износ. – Т. 27, №1, –2006. – С. 95 – 97.

УДК 623.746: 629.7.083.003.13 (045)

Кіндрачук М.В., Шевченко О.Л., Костін В.А., Вовк В.І., Слєпухіна І.А. **Вплив попередньої лазерної обробки на процес азотування титанового сплаву BT6** // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 52. – С.140–151.

Розглянуто особливості впливу попередньої лазерної обробки на будову та властивості азотованих шарів на титановому сплаві BT6. У роботі показано, що якісний і кількісний характер змін в азотованому шарі визначається зазделегідь сформованим структурно-фазовим станом.

Рис. 5, список літ. 8 найм.

Kindrachuk M.V., Shevchenko O.L., Kostin V.A., Vovk V.I., Slepukhina I.A. **Influence of laser rough-down on the process of nitriding of titan alloy BT6**

The features of influence of laser rough-down are considered on a structure and properties of the nitrided layers on the titan alloy of BT6. It is in-process routine that high-quality and quantitative character of changes in the nitrided layer is determined by the preliminary formed structural-phase state.

Стаття надійшла до редакції 28.10.09.