

УДК: 629.78.085;629.78.08

А. А. МАМАЕВА, Ж. Б. САГДОЛДИНА, С. Е. РОМАНЬКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЙ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ НА СВОЙСТВА Ti-AL

Приведены исследования структуры алюминидов титана после импульсно плазменной обработкой полученные с помощью термического напыления. Рассмотрены особенности формирования структуры алюминидных фаз на поверхности титанового сплава. Метод термического напыления использовался для получения различных фазовых структуры в системе Ti-Al. Установлено, что эволюция микроструктуры, температурно-временные интервалы существования фаз, кинетика превращений зависят от метода нанесения слоя.

Титан и его сплавы применяются во многих отраслях современной промышленности. Из них изготавливают детали летательных аппаратов; детали горячего тракта для стационарных энергетических установок и турбонагревателей; детали оборудования для всех энергоёмких отраслей промышленности, включая производство, стали и цветных металлов и нефтеперерабатывающую промышленность [1].

Интерес к сплавам на основе интерметаллидов титана TiAl обусловлен перспективностью их применения в изделиях авиакосмической техники взамен титановых и никелевых суперсплавов. Моноалюминид титана TiAl имеет упорядоченную ГЦТ-решетку типа L10, которая сохраняется до ~1440 °С. Высокое содержание алюминия определяет низкую плотность материала (3,8-4,0 г/см³) по сравнению с плотностью никелевых суперсплавов (8,3-8,9 г/см³), а также высокое сопротивление окислению и горению при температурах до 900 °С, что выгодно отличает TiAl от титановых сплавов. При использовании TiAl двукратное снижение веса таких конструкций, как газотурбинные двигатели, позволяет увеличить отношение тяги к весу. Замена жаропрочных сплавов на основе титана, никеля и железа на материалы из алюминидов титана (Ti₃Al, TiAl, TiAl₃) позволит снизить массу статических деталей на 20-50 %, повысить на 100-400 °С рабочие температуры, увеличить срок службы и надежность работы изделий благодаря повышенной жаростойкости [2, 3]. На данный момент крупнейшие авиакосмические корпорации занимаются разработкой новых технологий получения алюминидов титана и новых материалов на их основе. Прогнозируется, что именно композиционные материалы на основе алюминидов титана станут основными материалами в ракетостроении.

В настоящее время у разработчиков летательных аппаратов возникают постоянные проблемы с выбором материалов. Разрабатываемые в настоящее время новые композиционные материалы требуют непосредственного испытания в космическом пространстве с целью определения эксплуатационного ресурса.

В последнее время ведутся разработки по применению мощных импульсных пучков заряженных частиц в технологических целях. Уникальность воздействия таких пучков на твердые тела заключается в создании неравновесных термодинамических условий в приповерхностной области, возникающих в результате воздействия импульсов с высокими значениями плотности энергии. Происходящее при таком воздействии быстрое расплавление приповерхностного слоя и сверхбыстрое его охлаждение сопровождается процессами генераций микродефектов, явлениями массопереноса, испарением и диффузией химических компонентов. Поэтому воздействие мощным импульсным пучком может обеспечить создание поверхностных слоев с уникальными свойствами, получение которых принципиально невозможно при других известных технологиях, и проведение подобных исследований представляют большой научный практический интерес.

Эксперимент

Из листового титанового сплава с составом Ti-4%Al-1%Mn, были подготовлены образцы размерами 8×8×1 мм. Методом термического напыления на образцы, которые использовались в качестве подложки, наносился слой алюминия чистотой 99.9999 %. Напыление проводилось в вакууме 10⁻⁴ Па. Температура подложки при напылении составляла 150 °С, затем образцы последовательно отжигали в вакууме 10⁻⁴ Па в интервале температур 600-900 °С при последующем

охлаждении с печью. Время выдержки при каждой температуре составляло 2 ч.

Облучение образцов плазменным потоком, проводилось на установке типа коаксиального плазменного ускорителя (КПУ) предназначенного для получения ускорения плазменных потоков с параметрами: концентрация электродов – $10^{13}\sim 10^{15}$ см³, температура ионов до 110 эВ, скорость $\sim(4\cdot 10^7)$ см/с. Импульсный плазменный ускоритель ИПУ БАН-01. ИПУ формирует плазменный поток с температурой до 100 эВ, длительностью импульса 20 мкс. Разрядный ток ИПУ может достигать значения 400 кА.

Рабочим газом служил инертный газ аргон. В результате дугового разряда между электродами при прохождении рабочего газа образуется ускоренный поток плазмы с большой плотностью тока (порядка 200 кА) и температурой (3000 К).

Структуру образцов исследовали методами рентгеноструктурного анализа на дифрактометрах ДРОН-6 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении, сканирующей электронной микроскопии на микроскопе JСХА-733 и атомно-силовой микроскопий.

Результаты и обсуждение

Плазменная обработка проводилась в импульсной Аг плазме. Длительность импульса порядка 10 мкс. При разрядном токе 100-600 кА плотность энергии плазменного потока составляет 90-200 Дж/см².

Рентгенограммы Ti-Al структуры после отжига при температуре 700 °С после обработки Аг плазмой в зависимости от энергии приведены на рис. 1. Плазменная обработка Ti-Al покрытия приводит к образованию соединения Al_3Ti и TiAl , а также регистрируются соединения алюминиды марганца Mn_2Al . При этом минимальная объемная доля Al_3Ti содержится после обработки при энергии 90 Дж/см², с увеличением дозы алюминидные фазы на основе соединения Al_3Ti постепенно переходят в TiAl , а также уменьшается объем титана.

Сопоставление интенсивностей рентгеновских линий на рис. 2а показывает, что с увеличением температуры отжига до 900 °С, после плазменной обработки на рентгенограмме

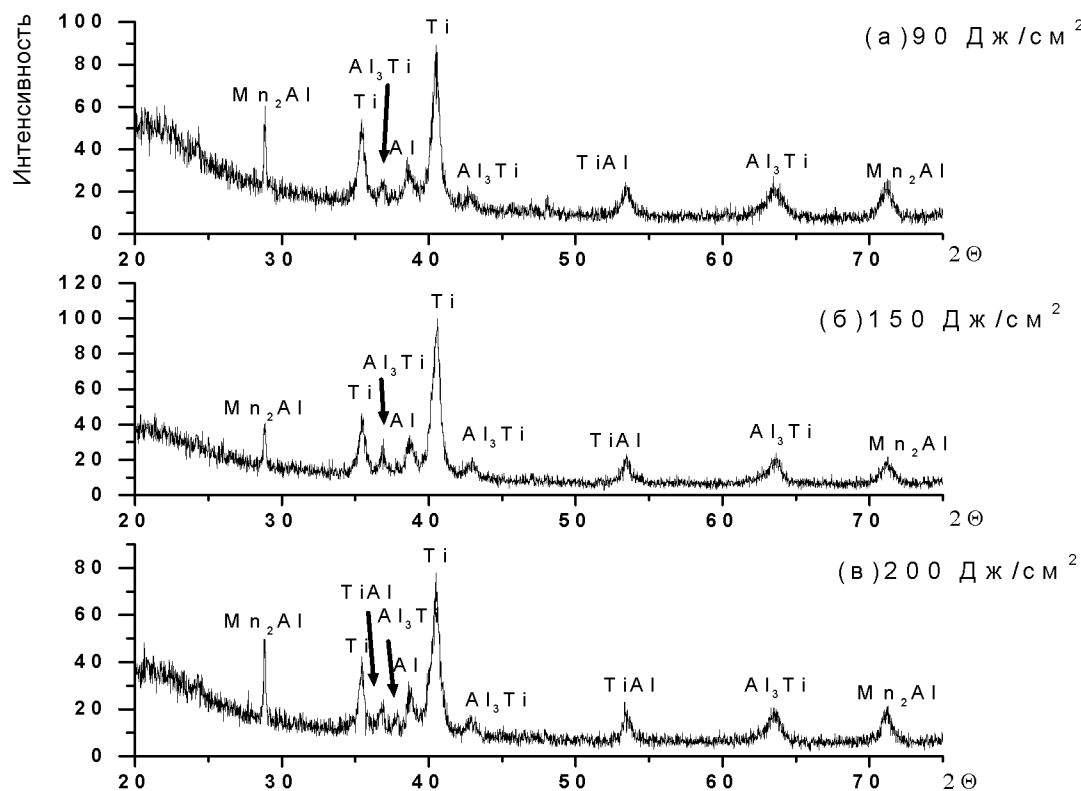


Рис. 1. Рентгенограмма Ti-Al образцов после отжига при температуре 700 °С после обработки Аг плазмой в зависимости от энергии

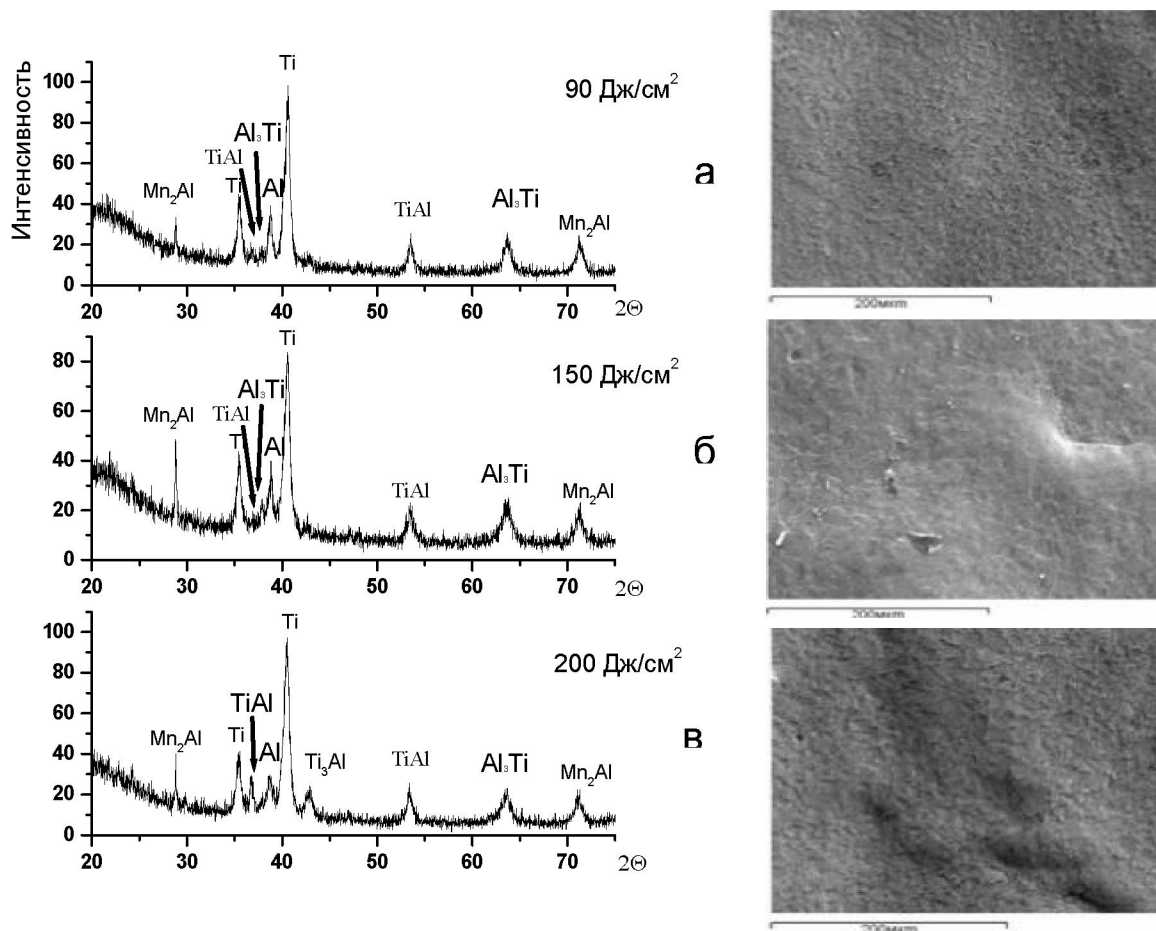


Рис. 2. Рентгенограмма и микроструктура Ti-Al покрытия после плазменной обработки и после отжига при температуре 900 °С: а - после обработки 90 Дж/см²; б - после обработки 150 Дж/см²; в - после обработки 200 Дж/см²

происходят заметные изменения которые так же сопровождаются с изменением микроструктуры поверхности при энергии 90 Дж/см². После увеличении энергии до 150 Дж/см² рис. 2б на рентгенограмме соединение Al₃Ti постепенно переходит в соединение TiAl а на микроструктуре образца при большой плотности воздействия происходит плавление поверхности, появляются ямки, бугорки и формируется своеобразный рельеф. Образование рельефа, по-видимому, обусловлено неравновесными термическими процессами, характерными для импульсного воздействия. При дальнейшем увеличении энергии до 200 Дж/см² на рентгенограмме (рис. 2в) происходит резкий скачок интенсивности соединения TiAl при увеличении энергии.

Наличие больших градиентов температур и давления во время обработки приводит к образованию дефектов на поверхности и в объеме кри-

сталла. Это означает, что в случае импульсного облучения, плазменный сгусток оказывает на поверхность материала сильное деформационное и термическое воздействие, которое приводит к наблюдаемым неоднородностям.

Эти данные хорошо согласуются с данными по химическому составу таблицы. После обработки плазмой с увеличением температуры отжига Mn уменьшается.

Химический состав элементов после отжига и после плазменной обработки

При различных температурах	Al%	Ti%	Mn%
При температуре 700 °С	13,69	85,43	1,26
При температуре 800 °С	6,37	92,37	1,19
При температуре 900 °С	5,85	92,96	0,87

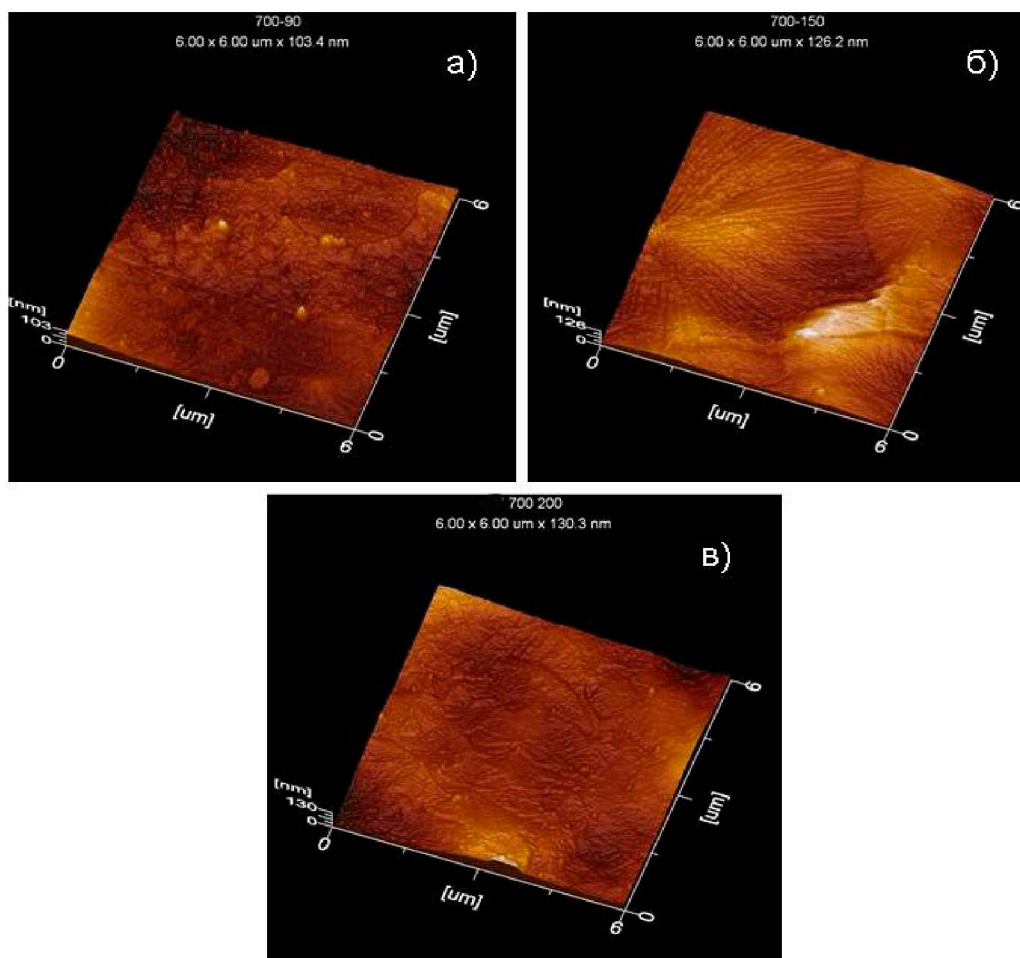


Рис. 3. Морфология поверхности после отжига при температуре 700 °С после плазменной обработки:
 а - после обработки 90 Дж/см²; б - после обработки 150 Дж/см²; в - после обработки 200 Дж/см²

После обработки плазмой с энергией 90 Дж/см², 150 Дж/см² и 200 Дж/см² изменение морфологии поверхности показано на рис. 3. Использовался полуконтактный метод с параллельной регистрацией фазы колебаний. Микроструктура покрытий после отжига при температуре 700 °С после обработки плазмой и при нормальном падении плазменного потока имеет сравнительно однородную структуру (рис. 3а), с небольшим количеством микрокапельной фазы, а с увеличением энергии до 150 Дж/см², в соответствии с рис. 3б на поверхности появляются кластеры в результате мощного удара к поверхности образца. При дальнейшем увеличении энергии как видно из рис. 3в, на поверхности наблюдаются мелкие каплеобразные полости, а на тех участках, куда попали сгустки плазмы, наблюдается сильные брызги, часть которых состоит из ямок и бугор-

ков, что связано сильным оплавлением и моментальным охлаждением поверхности.

На детальной морфологии поверхности как показано рис. 4а наблюдается своеобразный рельеф, где наблюдается ударная волна оставившая свои следы в виде равномерных каскадов. На образцах отжиг в течение 2 часов при температуре 900 °С с энергией 200 Дж/см² приводит к существенному изменению морфологию поверхности, наблюдается зернистая структура как показано на рис. 4б, укрупнение зерен, которые могут объединяться в более крупные зерна. Средний размер кристаллитов составляет 0,2-0,3 мкм. Укрупнение кристаллитов происходит в результате объединения отдельных выделений.

Импульсно плазменная модификация приводит к существенному изменению морфологию

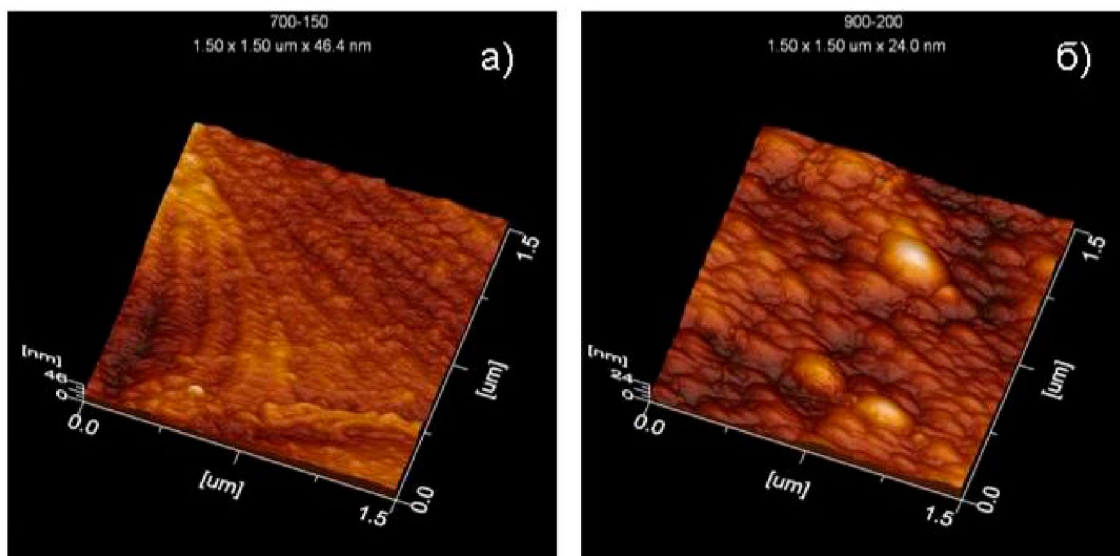


Рис. 4. Детальная морфология поверхности после плазменной обработки: а - после отжига при температуре 700 °С при энергий 150 Дж/см²; б - после отжига при температуре 900 °С при энергий 200 Дж/см²

пленки, на поверхности формируются характерные микрорельефы.

Это связано с тем, что при облучении исходной пленки образуются комплексы устойчивых сложных дефектов, таких как дислокации и кластеры. При отжиге, когда происходит интенсивная реакция между титаном и алюминием, дефекты служат центрами предпочтительного зарождения, которые относительно равномерно распределены по объему пленки.

Наибольший вклад может внести образования дислокационной структуры по механизму, основанному на рождении дислокационных петель в области каскадов атомных столкновений и их взаимодействий между собой. Это взаимодействие приводит к выталкиванию петель в глубь образца, где они закрепляются в дислокационных стопорах и друг на друге, образуя развитую дислокационную структуру.

Таким образом, природа неравномерного распределения облученного слоя достаточно сложна. Она может быть связана с эффектом дальнего действия, деформационным упрочнением, ударным и термическим характером воздействия импульсного потока плазмы.

Отслоение структуры после обработки не происходит. Это означает, что потоки плазмы могут использоваться для синтеза Ti-Al интерметаллидных фаз в композиционных структурах. То есть, плазменная обработка выравнивает и упрочняет поверхность покрытия.

Заключение. Были отработаны режимы плазменной обработки Ti-Al структур на поверхности титановой подложки. При увеличении энергии плазмы Ti начинает взаимодействовать с Al. Установлено, что TiAl соединения стабильны с увеличением энергии плазмы до 200 Дж/см².

Обработка плазменным потоком покрытия Ti-Al приводит к оплавлению поверхности, которое в свою очередь в результате реакции между Ti и Al приводит к образованию соединения Al₃Ti. В результате оплавления поверхность выравнивается и сглаживается. Микроструктура покрытия и объемная доля образующихся фаз зависят от энергий плазмы. Фазовый состав рассмотренных покрытий зависит от состава элемента.

Это означает, что потоки плазмы могут использоваться для синтеза Ti-Al интерметаллидных фаз в композиционных структурах. То есть, плазменная обработка выравнивает и упрочняет поверхность покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. С. 479.
2. Корнилов И.И. Титан. М.: Наука, 1975. С. 308.
3. Корнилов И.И. Металлография титановых сплавов. М.: Наука, 1978. С. 373.
4. Dimiduk D.M. Gamma titanium aluminides alloys – an assessment within the competition of aerospace structural materials // Mater. Sci. Eng. A 263. 281-288 (1999).

5. Kim Y.-W. Trends in the development of gamma TiAl alloys, Gamma Titanium Aluminides / Ed. Y.-W.Kim et al. / Miner., Metals & Mater. Soc. 1995. Pp. 637-654.

6. Appel F., Oehring M., Wagner R. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys // *Intermetallics*, 8. 2000. 1283-1312.

7. Поварова К.Г., Банных О.А. Принципы создания конструкционных материалов на основе интерметаллидов // *Материаловедение*. 1999. №2. С. 29-37; 1999. №3. С. 29-37.

8. Oh J., Lee W.C., Sung Gyu Pyo, Park W., Lee S., Kim N. // J. Microstructural Analysis of Multilayered Titanium Aluminide Sheets Fabricated by Hot Rolling and Heat Treatment Met. Trans. A. A33. 2002. P. 3649-3659.

9. Mizuuchi K., Inoue K., Sugioka M., Itami M., Kawahara M. Microstructure and mechanical properties of Ti-aluminides reinforced Ti matrix composites synthesized by pulsed current hot pressing // *Mater. Sci. Eng. A* 368. 2004. P. 260-268.

10. Li T., Grignon F., Benson D.J., Vecchio K.S., Olefsky E.A., Jiang F., Rohatgi A., Schwarz R. B., Meyers M.A. Modeling the elastic properties and damage evolution in Ti-Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites // *Mater. Sci. Eng.* 2004. A 374. P. 10-26.

11. Brady M.P., Tortorelli P.F. Alloy design of intermetallics for protective scale formation and for use as precursors for complex ceramic phase surfaces // *Intermetallics*. 2004. 12. P. 779-789.

12. Mishin Y., Herzig Chr. Diffusion in Ti-Al system // *Acta Mater.* 2000. 48. 589-623.

13. Wang Z.B., Tao N.R., Tong W.P., J. Lu, Lu K. Diffusion

of chromium in nanocrystalline iron produced by means of surface mechanical attrition treatment // *Acta Mater.* 2003. 51. P. 4319-4329.

Резюме

Титан құймасының беткі қабатына алюминийді жылулық тозаңдау әдісімен алынған плазмалық ағынның әсерін зерттеу келтірілген. Алюминийді фазалық құрылыстың титан құймасының беткі қабатында түзілу ерекшеліктері қарастырылған. Жылулық тозаңдалу әдісі Ti-Al жүйесінің құрылысын алу үшін қолданылды. Нәтижесінде үлгінің бетінде өте жақсы байланыспен сипатталатын соған сай қабаттар түзілуі және импульсті плазма технологиясы арқылы өңдеу қарастырылады. Микроқұрылым эволюциясы, температура-уақытты интервалында фазаның құрылуы, айналу кинетикасы, қабатты төсеу әдісіне байланысты.

Summary

In the article the results of research, structure titanium aluminides after pulsed plasma treatment received by means of thermal deposition are presented. The formation features of structure aluminide phases on a surface of a titanic alloy are considered. The method thermal deposition was used for reception various phase structures in system Ti-Al. It is established, that evolution of a microstructure, temperature-time intervals of existence of phases, kinetics transformations depend on a method of drawing of a layer.

ТОО «Физико-технический институт»

Поступила 28.03.08г.