

УДК 621.791.81

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МАТРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ 1201 И 6111 В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЖИМЕ ПРЕДПЛАВЛЕНИЯ

В.В. Брюховецкий, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.В. Пойда, В.П. Пойда*, А.Г. Пономарев, М.А. Прихода*, Е.М. Прохоренко, В.Т. Уваров****

*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины
 61002, г. Харьков, ул. Чернышевского, 28, а/я 8812
 E-mail: ntcefo@yahoo.com*

**Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4*

***Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"
 61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1*

Received 1 February 2012, accepted 22 February 2012

В работе рассмотрены особенности воздействия релятивистского импульсного пучка электронов на процессы структурообразования в поверхностном слое промышленных алюминиевых сплавов 1201 и 6111 в режиме предплавления. Показано, что в подобранном режиме предплавления - до макроскопического плавления поверхности в зоне воздействия пучка - осуществляется локальное плавление и последующая кристаллизация отдельных объемов микроструктуры поверхностного слоя сплавов. Предполагается, что появление подобных участков микроструктуры сплавов 1201 и 6111 может быть связано и с плавлением неравновесных эвтектик и с плавлением участков сегрегации легирующих элементов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: импульсный пучок, электроны, алюминиевые сплавы, микроструктура поверхностного слоя.

СТРУКТУРНІ ЗМІНИ В ПОВЕРХНЕВОМУ ПРОШАРКУ МАТРИЧНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ 1201 І 6111 В ЗОНІ ДІЇ ІМПУЛЬСНОГО ПУЧКА ЕЛЕКТРОНІВ В РЕЖИМІ ПЕРЕДПЛАВЛЕННЯ

В.В. Брюховецький, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко, А.В. Пойда, В.П. Пойда*, А.Г. Пономарьов, М.А. Прихода*, Е.М. Прохоренко, В.Т. Уваров****

*Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України
 61002, м. Харків, вул. Чернишевська, 28, а/с 8812*

**Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
 61022, м. Харків, м. Свободи, 4*

***Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України
 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1*

В роботі розглянуто особливості дії релятивістського імпульсного пучка електронів на процеси структуроутворення в поверхневому прошарку промислових алюмінієвих сплавів 1201 і 6111 в режимі передплавлення. Показано, що в підбраному режимі передплавлення до макроскопічного плавлення поверхні в зоні дії пучка - здійснюється локальне плавлення і наступна кристалізація окремих ділянок мікроструктури поверхневого прошарку сплавів. Зроблено завбачення, що виникнення таких ділянок мікроструктури алюмінієвих сплавів 1201 і 6111 може бути пов'язане з плавленням нерівноважних евтектик і з плавленням ділянок сегрегації легуючих елементів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: імпульсний пучок, електрони, алюмінієві сплави, мікроструктура поверхневого прошарку.

THE STRUCTURAL CHANGES IN SURFACE LAYER OF MATRIX ALUMINUM ALLOYS 1201 AND 6111 IN AREA OF PULSED BEAM OF RELATIVISTIC ELECTRONS INFLUENCE IN PRE-MELTING REGIME

V.V. Bryukhovetsky, V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenko, A.V. Poida, V.P. Poida, A.G. Ponomaryov, M.A. Pryhoda, E.M. Prokhorenko, V.T. Uvarov

*Institute of Electrophysics & Radiation Technologies NAS of Ukraine
 P.O. Box 8812, Chernyshevsky St. 28, Kharkiv, 61002, Ukraine*

*V.N. Karazin Kharkiv National University NAS of Ukraine
 Svoboda square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine*

*National Scientific Center "Kharkiv institute of physics and techniques" NAS of Ukraine
 Akademichna St. 1, Kharkiv, 61108, Ukraine*

In this work the features of the relativistic pulsed beam of electrons influence on the processes of structure formation in surface layer of industrial aluminum alloys 1201 and 6111 in pre-melting regime are investigated. It is shown, that in selected pre-melting regime - till the macroscopic surface melting in beam influence zone - the local melting and the subsequent crystallization of separate volumes of surface layer microstructure of alloys occurs. It is supposed, that the appearance of similar areas of microstructure of aluminum alloys 1201 and 6111 can be associated as with the nonequilibrium eutectics melting as with the melting of the segregations of alloying elements.

KEY WORDS: pulsed beam, electrons, aluminum alloys, microstructure of surface layer.

Воздействие направленных потоков энергии широко используется в современных технологиях обработки различных материалов. Одним из вариантов такой обработки является воздействие на материал интенсивного

импульсного пучка электронов. Действие такого пучка является комбинированным: ударным, тепловым и радиационным [1,2]. Оно приводит к очень быстрому нагреву материала. Затем следует также относительно быстрое охлаждение за счет отвода тепла внутрь образца. Как правило, при таком воздействии используются плотности потока энергии, приводящие к оплавлению поверхности исследуемого образца [3-5]. Однако возможность смены энергетических параметров релятивистского импульсного пучка электронов позволяет изучить воздействие пучка на материал, как в режиме оплавления, так и в режиме предплавления.

Сплавы на основе алюминия являются основным конструкционным материалом не только в самолето- и ракетостроении, но и в ядерной энергетике, из них, в частности, производят центрифуги для обогащения урана 235. Поэтому в проблеме создания и внедрения новых алюминиевых сплавов важное место занимают требования повышенной прочности, пластичности, длительного срока эксплуатации, простоты обработки, работоспособности в экстремальных температурных, динамических и усталостных условиях. При любом уровне прочности отношение прочности к массе у алюминиевых сплавов примерно в 2,8 раза большее, чем у стали. Большинству предъявляемых требований отвечают сплавы системы Al-Mg-Cu, имеющие примерно в 10 раз большую, чем чистый алюминий, прочность. Свойства приповерхностных прослоек металлов и присутствующих интерметаллидов очень часто играют определяющую роль в сохранении эксплуатационных характеристик сплавов в условиях их использования в качестве конструкционных материалов. Обработка же изделий потоками энергии дает возможность целенаправленно модифицировать их свойства.

В общем случае слой металла, имеющий отличающиеся от основной массы детали структуру, фазовый и химический состав, называют поверхностным. В условиях эксплуатации поверхностный слой детали подвергается наиболее сильному физико-химическому воздействию: механическому, тепловому, магнитоэлектрическому, световому, химическому и др. В большинстве случаев у детали начинают ухудшаться служебные свойства поверхности, например, износ, эрозия, кавитация, коррозия, усталостные трещины и другие разрушения развиваются вначале на поверхности. Поэтому к поверхностному слою предъявляются обычно более высокие требования, чем к основной массе детали.

Анализ микроструктуры образцов, облученных в режиме оплавления поверхностного слоя [3], показал, что в зоне действия пучка формируется двухслойная структура. Поверхностный слой образуется путем кристаллизации из жидкого состояния и зоны термического воздействия пучка, при этом осуществляется изменение элементного состава облученной поверхности. Пользуясь возможностью смены энергетических параметров релятивистского импульсного пучка электронов, воздействие пучка на материал можно исследовать как в режиме оплавления, так и в режиме предплавления. Режимы термической обработки подбирают с учетом фазовых и структурных превращений в материале с целью получения необходимого комплекса свойств. В режиме предплавления интенсивный тепловой нагрев не приводит к плавлению поверхностного слоя пластины, а только к его интенсивному нагреву. Целью данной работы было изучение особенностей воздействия релятивистского импульсного пучка электронов на процессы структурообразования в поверхностном слое промышленных матричных алюминиевых сплавов 1201 и 6111 в режиме предплавления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исходные образцы в виде пластин размером 100×100 мм² и толщиной 3 мм были вырезаны из холоднокатаных листов полуфабрикатов сплавов 6111 и 1201 (без покрытия и термообработки). Химические составы сплавов приведены в таблице. Облучение производилось высокопоточным импульсным пучком релятивистских электронов с плотностью потока энергии на мишени $W \approx 10^9$ Вт/см² (энергия пучка $E_n \approx 0,30$ МэВ, ток $I_n \approx 2000$ А, длительность импульса $\tau_n \approx 5 \cdot 10^{-6}$ с, диаметр пучка $D \approx 3$ см).

Структурные и топографические исследования поверхностных слоев образцов исследуемых сплавов проведены по стандартным методам металлографии с применением оптических микроскопов МБС-9 и МИМ-6. ДюрOMETрические исследования проведены при помощи микротвердомера ПМТ-3М.

Таблица

Сплав	Основные легирующие элементы, входящие в химический состав исследуемых сплавов						
	Массовая доля легирующих элементов, %						
	Mg	Cu	Ti	Si	Zn	Mn	Zr
6111	1,0	0,9	0,1	1,1	0,15	0,4	–
1201	0,02	6,2	0,05	0,05	0,02	0,27	0,2

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 приведен вид поверхности сплава 1201 облученного в режиме оплавления (а) и в режиме предплавления (б). Как видно из рис.1, при облучении в режиме оплавления на поверхности возникает микрорельеф, тогда как облучение в режиме предплавления не влияет на гладкость поверхности.

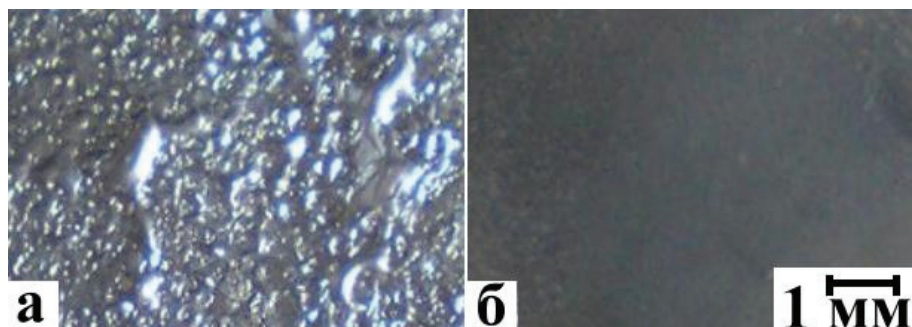


Рис.1. Вид поверхности сплава 1201 облученного в режиме оплавления (а) и в режиме предплавления (б).

Микроструктура образцов сплава 1201 характеризуется такими особенностями. Средний размер зерна \bar{d} равен 20 мкм, при этом зерна в образце равноосны, а в теле и на границах зерен присутствуют скопления интерметаллидных частиц. Из литературы [6] известно, что в сплаве 1201 наряду с основной упрочняющей фазой CuAl_2 могут присутствовать и другие интерметаллиды. Из приведенных выше данных о химическом составе сплава 6111 видно, что основными его легантами являются медь, магний и кремний, которые образует с Al эвтектическую диаграмму состояния. Известно [6], что атомы Mg и Si в алюминиевом твердом растворе стремятся к образованию фазы Mg_2Si . В работах [7,8] в сплавах 6013 и 6061, близких по составу к сплаву 6111, эта фаза была идентифицирована. Также были идентифицированы и частицы чистого Si. Согласно [8] в сплаве 6111 могут присутствовать фазы $\text{Al}_6(\text{Fe}, \text{Mn})$. Хром и марганец вызывают некоторое упрочнение.

В нашем случае использовались такие плотности потока энергии, при которых поверхность сплава нагревается до температуры выше эвтектической, но еще недостаточной для того, чтобы произошло макроскопическое оплавление поверхности. Хотя видимые изменения структуры поверхностного слоя в случае воздействия пучка электронов с указанными выше параметрами не наблюдаются, как показали дюрметрические исследования поверхности образцов, микротвердость, в среднем, в зоне воздействия пучка увеличивается на 25-30 % по сравнению с исходными образцами. Структурные исследования поверхностных слоев образцов сплавов, подвергнутых воздействию пучка электронов, позволили обнаружить некоторые особенности микроструктуры, которые не наблюдаются в исходных образцах изучаемых сплавов (рис. 2).

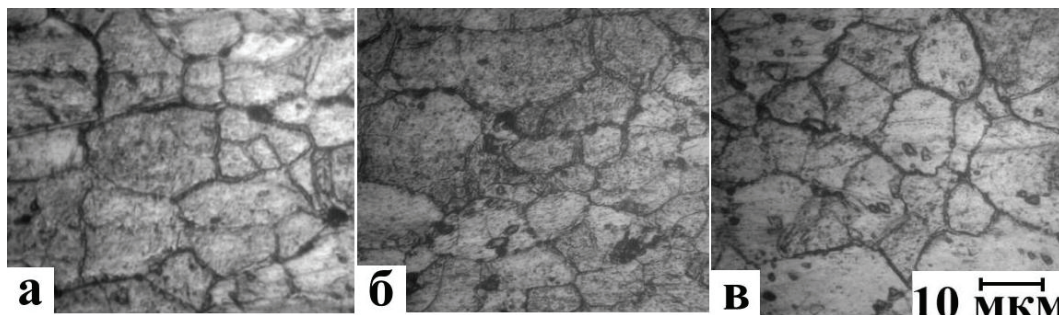


Рис. 2. Вид микроструктуры поверхностного слоя образца в зоне воздействия пучка электронов на разной глубине от поверхности: а) ~25 мкм; б) ~60 мкм; в) ~90 мкм.

Как видно из рис. 2, где приведен ряд микрофотографий структуры поверхностного слоя сплава 6111 в зоне воздействия пучка электронов, наблюдаются закристаллизовавшиеся участки расплава, как вдоль границ зерен, так и в виде отдельных фрагментов внутри исходных зерен. Такие микроструктурные особенности наблюдаются в приповерхностном слое в зоне воздействия пучка вплоть до 100 мкм вглубь образца. Толщина закристаллизовавшихся межзеренных прослоек постепенно уменьшается по мере углубления. На глубине около 100 мкм микроструктура зерен уже сходна с таковой для исходных образцов. Таким образом, очевидно, что хотя макроскопического плавления поверхности образцов не наблюдалось, однако, по-видимому, осуществлялось локальное плавление отдельных объемов микроструктуры поверхностного слоя. В результате этого в поверхностном слое образуется микроструктура, где исходные довольно крупные зерна окружают значительно более мелкие кристаллиты. Схематически такая ситуация приведена на рис.3.

В матричных сплавах системы Al-Mg-Cu-Si в контакте с твердым раствором на основе алюминия может находиться ряд интерметаллидных частиц, таких как Al_2Cu , Al_3Mg_2 , Mg_2Si , Al_2CuMg , Si и др. [6]. Из названных выше фаз Al_2Cu , Al_3Mg_2 и Si образуют с твердым раствором на основе алюминия бинарные эвтектические диаграммы, а фазы Mg_2Si и Al_2CuMg – квазибинарные эвтектические диаграммы. То есть, при наличии в сплаве указанных выше фаз при достижении эвтектической температуры для этих пар на контакте интерметаллидная фаза – α -твердый раствор начнется контактное плавление, сначала для контактирующей пары, имеющей наименьшую эвтектическую температуру, затем для более высокотемпературной эвтектики и т.д.

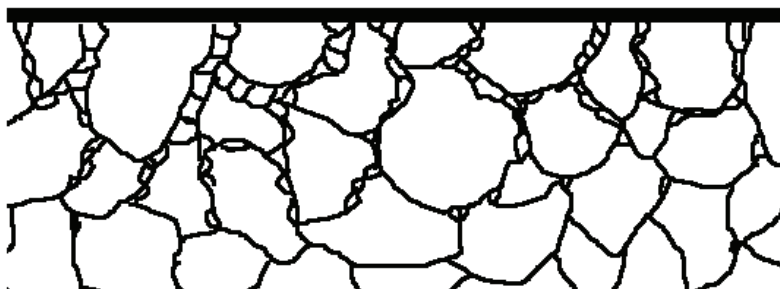


Рис.3. Схема структуры зерен приповерхностного слоя после облучения электронным пучком в режиме предплавления

А теперь рассмотрим, какие эвтектические реакции могли иметь место в условиях такой обработки поверхности сплавов 1201 и 6111. Наиболее низкую точку плавления $T = 723$ К имеет эвтектика $\alpha_{Al} + Al_3Mg_2$. При этой температуре могло бы начаться контактное плавление на межфазной границе матрица (α_{Al}) – включение Al_3Mg_2 . Однако фаза Al_3Mg_2 в этих сплавах находится в очень незначительном количестве, поскольку содержание Mg в сплавах составляет менее 1 %. Главную же роль в этом процессе, по-видимому, играет в обоих сплавах контактное плавление по реакции $Ж \leftrightarrow \alpha_{Al} + Al_2Cu$ при $T = 821$ К. Контактное плавление по реакции $Ж \leftrightarrow \alpha_{Al} + Si$, которое осуществляется при $T = 850$ К, также может играть в этом процессе немаловажную роль, поскольку частицы кремния, по-видимому, присутствуют в тонкой структуре сплава 6111. Могут также осуществляться и более сложные реакции, такие как $Ж \leftrightarrow \alpha_{Al} + Al_3Mg_2 + Al_6Mn$ при температуре $T = 710$ К, реакция $Ж \leftrightarrow \alpha_{Al} + Mg_2Al_3 + Mg_2Si$ при температуре $T = 721$ К, а реакция $Ж \leftrightarrow \alpha_{Al} + Al_2CuMg + Al_2Cu$ при $T = 780$ К. Также при более высокой температуре ($T = 798$ К), может осуществляться еще одна реакция, в результате которой образуется жидкая фаза, а именно тройное эвтектическое превращения $Ж \leftrightarrow \alpha_{Al} + CuAl_2 + Si$. Появление локальных участков жидкой фазы в сплавах может быть связано и с плавлением неравновесных эвтектик, а также с плавлением участков сегрегации легирующих элементов, температура плавления которых ниже, чем для сплава в целом.

Поскольку плавление было частичным, то основа матрицы сохранилась в твердом состоянии и кристаллизация расплава после воздействия пучка осуществлялась со стороны максимального отвода тепла. Подложкой для кристаллизации служили исходные не расплавившиеся зерна алюминиевой матрицы. После такого рода воздействия структура поверхностного слоя становится более дисперсной – наряду с крупными зернами в значительном количестве присутствуют мелкие кристаллиты – следовательно, повышается микротвердость поверхности. Таким образом, обработка поверхности импульсным релятивистским пучком электронов в режиме предплавления происходит при меньшей плотности потока энергии, чем в режиме оплавления и при этом исходная поверхность сохраняется в неискаженном плавлением виде. Такое воздействие дает возможность финишной обработки конструкционных изделий, без применения дальнейших технологических процессов обработки.

ВЫВОДЫ

В зоне воздействия пучка электронов в режиме предплавления получена качественно новая поверхность, для микроструктуры которой характерными элементами являются закристаллизовавшиеся участки расплава, как вдоль границ зерен, так и в виде отдельных фрагментов внутри исходных зерен. Толщина закристаллизовавшихся межзеренных прослоек постепенно уменьшается по мере углубления. Микротвердость такой поверхности, в среднем, увеличивается на 25-30 % по сравнению с исходными образцами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bogdankevich O.V., Rukhadze A.A. . O vozmozhnosti sozdaniya vysokogo davleniya v tverdom tele s pomoshch'yu sil'notochnogo elektronnoy puchka // Pis'ma v ZhETF. - 1971. - T.13. - Vyp.9. - S. 517-519.
2. Machurin E.S. Radiatsionno-termicheskie tekhnologicheskie protsessy obrabotki metallov // VANT, seriya "Radiatsionnaya tekhnika". - 1985. - Vyp.3(31). - S.99-103.
3. Klepikov V.F., Bryukhovetskiy V.V., Poyda A.V., Litvinenko V.V., Poyda V.P., Kivshik V.F., Uvarov V.T. Izmenenie struktury i sverkhplastichnykh svoystv alyuminievyykh splavov vozdeystviem impul'snogo puchka relyativistskikh elektronov // VANT. Seriya "Fizika radiatsionnykh povrezhdeniy i radiatsionnoe materialovedenie". - 2003. - №6 (84). - S.86-88.
4. Neklyudov I.M., Yuferov V.B., Sorokovoj L.G. The powerful pulsed electron beam effect on the metallic surfaces // VANT. Seriya «Yaderno-fizicheskie issledovaniya». - 2001. - №5(39). - R.191-193.
5. Kolyada Yu.E. . Formation of a layered structure of a metal strengthening zone under irradiation with the pulsed high-current electron beam // VANT. Seriya «Yaderno-fizicheskie issledovaniya». - 2001. - №3(38). - S. 184-186.
6. Mondolfo L.F. Struktura i svoystva alyuminievyykh splavov / Per. s angl. M.: Metallurgiya, 1979. - 640s.
7. Troeger L.P., Starke E.A. Jr. Particle-stimulated nucleation of recrystallization for grain-size control and superplasticity in an Al-Mg-Si-Cu alloy // Mater. Sci. and Eng. A. - 2000. - Vol.293. - P.19-29.
8. Kaibyshev R., Musin F., Gromov D. Effect of Cu and Zr additions on the superplastic behavior of 6061 aluminum alloy // Mater. Trans. - 2002. - Vol. 43, №10. - P.2392-2399.