

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПОВЕРХНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов, О.А. Столбоушкина, В.Е. Громов

Экспериментально изучено влияние электрического потенциала на кривые ползучести технически чистого А1. Методами сканирующей электронной микроскопии проведены исследования поверхности разрушения и микрорельефа боковой поверхности вблизи поверхности разрушения образцов, формирующихся в условиях ползучести. Показано, что наложение потенциала +1 В приводит к некоторому снижению вязкого характера разрушения технически чистого алюминия при деформации в условиях ползучести и рассмотрены возможные причины, способствующие этому.

Ключевые слова: ползучесть, поверхность разрушения, потенциал.

Введение

Разработка эффективных способов внешнего электрического воздействия на прочность и пластичность материалов и создание на этой базе высокопроизводительных технологических процессов обработки представляет собой важную и актуальную проблему, решение которой во многом связано с пониманием физической природы деформирования с наложением полей и токов [1, 2]. Деформационное поведение металлов и сплавов чувствительно как к токовому воздействию, так и к электрическим потенциалам. Наиболее изучено в этом плане влияние обработки короткими мощными импульсами электрического тока, которая, оказывая влияние на дефектную субструктуру, может изменять распределение внутренних напряжений, фазовый состав, зеренную структуру и, в конечном итоге, существенно снижать сопротивление деформированию [1, 2]. Природа токового воздействия сложна и включает в себя ряд взаимосвязанных эффектов: электронно-пластический, пондемоторный или пинч-эффект, скин-эффект, выделение джоулева тепла [3]. Задачи выделения этих эффектов в чистом виде, установления их иерархии и выяснения удельного вклада каждого из них в пластификацию материалов являются в последнее время предметом многочисленных исследований [4].

Кроме значительного эффекта прямого токового воздействия на процесс деформирования (отмечаемого, в частности, при ползучести [5]) изменения деформационных характеристик можно достичь при изменении электрического потенциала поверхности [6, 7], величина которого контролирует ход многих практически важных процессов, таких как коррозия, износ и т.д. Эффект электрического потенциала на пластическое течение металлов и сплавов изучен в меньшей степени [1]. В [8] выявлено ускорение ползучести и снижение долговечности при наложении слабого потенциала 1 В к изолированному образцу А1, подвергаемому испытанию на ползучесть.

Цель данной работы состоит в анализе количественных характеристик структуры поверхности разрушения технически чистого алюминия, формирующейся в условиях ползучести при наложении потенциала +1 В и без него.

Материал и методика исследования

Исследования выполнены на отожженных при 770 К в течение двух часов рекристаллизованных проволочных образцах диаметром 2,5 мм и с длиной рабочей части 200 мм. Для записи деформации ползучести использована установка с программным модулем, позволяющим фиксировать во времени удлинение испытываемого образца, вызванное действием постоянного растягивающего напряжения 36,7 МПа ($\sim 10^{-4}$ ϵ) при комнатной температуре. В процессе деформации с момента приложения нагрузки непрерывно фиксировалась общая деформация удлинения образца как функция времени $\epsilon(t)$ [9]. Статистический анализ проводили по 15 образцам, подвергнутым испытаниям на ползучесть, как с приложением электрического потенциала +1В, так и без него с использованием стандартных методов математической статистики [10]. Средняя квадратичная ошибка среднего значения скорости ползучести $\langle \dot{\epsilon} \rangle$ вычислялась по формуле $s_n = \pm \sqrt{\sigma_n^2/n}$, где

$\sigma_n^2 = \frac{\sum((\dot{\varepsilon}) - \dot{\varepsilon}_i)^2}{n-1}$ - дисперсия измеренных значений $\dot{\varepsilon}_i$ при $n = 15$. При сравнении средних значений скорости ползучести без потенциала $\langle \dot{\varepsilon}_0 \rangle$ и с ним $\langle \dot{\varepsilon}_E \rangle$ вычислялась статистическая значимость принимаемой гипотезы об их различии по критерию Стьюдента $\hat{t} = \frac{\langle \dot{\varepsilon}_E \rangle - \langle \dot{\varepsilon}_0 \rangle}{\sqrt{\sigma_{n_E}^2 + \sigma_{n_0}^2}} \cdot \sqrt{n}$ [10].

Анализ поверхности разрушения осуществлялся методами сканирующей электронной микроскопии.

Результаты исследования и их обсуждение

Типичные кривые ползучести технически чистого алюминия, полученные в обычных условиях (кривая 1) и при потенциале поверхности +1 В (кривая 2), приведены на рис. 1. На установившейся стадии процесса ползучести технически чистого алюминия при потенциале поверхности +1 В при сравнимом относительном удлинении протекает с большей скоростью. Так, скорость ползучести алюминия при потенциале +1 В $\dot{\varepsilon}_E = 0,042 \pm 0,004$ 1/ч, а без него $\dot{\varepsilon}_0 = 0,025 \pm 0,002$ 1/ч, следовательно, относительное изменение скорости ползучести при приложении потенциала, определяемое как $\frac{\Delta \dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} = \frac{\langle \dot{\varepsilon}_E \rangle - \langle \dot{\varepsilon}_0 \rangle}{\langle \dot{\varepsilon}_0 \rangle}$, составляет 0,63, что находится в соответствии с нашими данными, приведенными в [8]. Статистическая оценка полученных величин по \hat{t} -критерию Стьюдента ($\hat{t} = 13,44$) показывает, что при числе степеней свободы $n = n_E + n_0 - 2 = 15 + 15 - 2 = 28$ с более чем 95 %-ным уровнем вероятности должна быть принята гипотеза о том, что соответствующие значения $\langle \dot{\varepsilon}_0 \rangle$ и $\langle \dot{\varepsilon}_E \rangle$ принадлежат к выборкам из различных генеральных совокупностей, то есть различаются значимо. Аналогичное ускорение ползучести наблюдается и при отрицательном потенциале -1 В. Следует ожидать, что эта особенность скажется на количественных характеристиках структуры поверхности разрушения образцов алюминия.

Поверхность разрушения содержит остаточные признаки, которые указывают на протяженность при разрушении высокоэнергетического (вязкого) и низкоэнергетического (хрупкого) распространения трещин. Поэтому для оценки степени вязкости металла часто используют макроскопический вид поверхности излома. Для поверхности изломов гладких цилиндрических образцов, испытанных на растяжение, характерны три зоны: а) волокнистая; б) радиальная; в) зона среза [11]. Волокнистая зона отвечает области медленного роста трещины. Она расположена в центре излома и окружает очаг разрушения, который обычно находится на оси растяжения или рядом с ней. При переходе трещины от медленного роста к быстрому или нестабильному ее распространению образуются радиальные рубцы, которые совпадают с общим

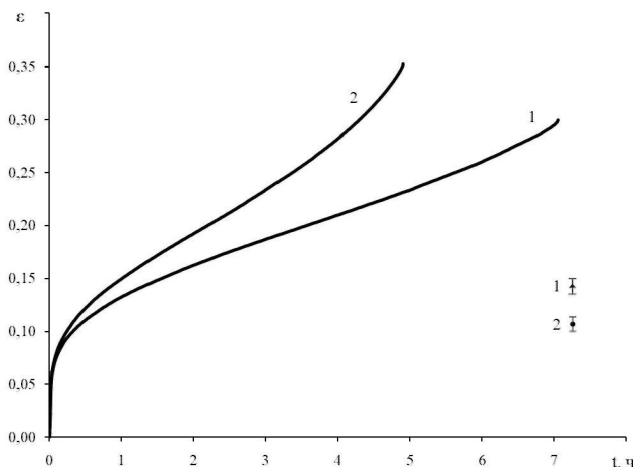


Рис. 1. Типичные кривые ползучести технически чистого алюминия, полученные в обычных условиях (кривая 1) и при потенциале поверхности +1 В (кривая 2)

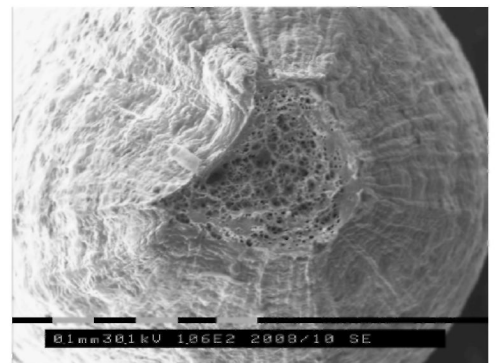


Рис. 2. Макроскопический вид поверхности излома технически чистого алюминия. Сканирующая электронная микроскопия

направлением распространения трещины. Отмечено, что чем больше относительная доля радиальной зоны в изломе, тем более хрупким является состояние испытываемого материала. Зона среза состоит из ровного кольцеобразного участка, смежного со свободной поверхностью образца. Установлено, что с уменьшением вязкости снижается доля зоны среза в изломе материала. Отсутствие зоны среза при испытании гладких образцов возможно в случае чрезвычайно хрупкого состояния [11, 12].

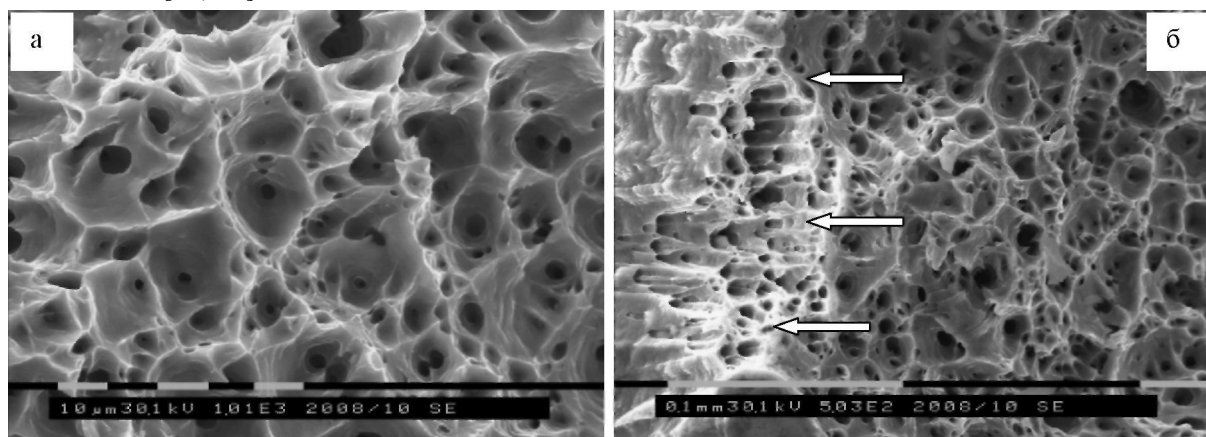


Рис. 3. Фрактограммы поверхности разрушения технически чистого алюминия, испытания на ползучесть при наложении потенциала $\varphi = +1$ В. На (б) стрелками указаны ямки сдвига

Анализ поверхности излома цилиндрических образцов технически чистого алюминия, разрушенных при растяжении в условиях ползучести, позволил выявить (независимо от условия проведения эксперимента) две зоны - волокнистую зону и зону среза; радиальная зона отсутствует (рис. 2). Основную площадь поверхности разрушения занимает волокнистая зона. Зона среза в образце, разрушенном без наложения потенциала, составляет 10-12 %; в образце, разрушенном в условиях приложенного потенциала 1 В, относительная площадь, занятая зоной среза, составляет 5-7 %. Следовательно, можно сделать предварительное заключение о том, что наложение потенциала 1 В приводит к снижению вязкости технически чистого алюминия при деформации в условиях ползучести.

Типичные для испытанных образцов фрактограммы, демонстрирующие ямки разрушения волокнистой зоны, приведены на рис. 3, а. Ямки, как правило, разделяют на три группы: равноосные, ямки сдвига и ямки отрыва, последние наблюдались довольно редко. Ямки сдвига формируются в зоне боковых скосов и часто содержат систему овальных ямок, вытянутых в одном и том же направлении - направлении сдвига. Характерные микрофотографии, демонстрирующие присутствие на поверхности разрушения алюминия различных видов ямок, равноосных и сдвига, приведены на рис. 3, а и б, соответственно. Следует отметить, что в наших экспериментах ямки сдвига преимущественно формировались при ползучести алюминия в условиях наложения потенциала.

Испытания образцов технически чистого алюминия приводят к формированию поверхности разрушения с широким диапазоном размеров ямок вязкого излома (рис. 4). Выполненный в настоящей работе статистический анализ поверхности разрушения показал, что средний размер (диаметр) ямок вязкого излома зависит от условий проведения эксперимента. А именно, при деформации без наложения потенциала средний размер ямок вязкого излома $1,84 \pm 1,3$ мкм; наложение потенциала приводит к уменьшению среднего размера ямок вязкого излома в $\sim 1,25$ раза. Одновременно с этим уменьшается и интервал существования размеров ямок: в экспериментах без потенциала максимальный размер ямок достигал 7 мкм; наложение потенциала приводит к уменьшению максимального размера ямок до 5 мкм.

Зона среза в исследованных образцах также содержит ямки вязкого излома (рис. 5). Проведенные количественные исследования показали, что в этом случае средние размеры ямок вязкого излома при испытаниях без потенциала практически совпадают со средними размерами ямок волокнистой зоны (рис. 4, а, б). При наложении потенциала 1 В средний размер ямок вязкого изло-

ма в зоне среза снижается в $\sim 1,3$ раза по сравнению с размерами ямок волокнистой зоны соответствующего образца (рис. 4, в-е).

Считается, что размер ямок (диаметр и глубина) зависит от числа мест зарождения микропор и относительной пластичности матрицы [11, 12]. Чем больше мест зарождения, тем меньше размер ямок. Следовательно, наложение потенциала приводит к увеличению мест зарождения ямок вязкого излома (микропор) при испытаниях технически чистого алюминия. Местами зарождения ямок вязкого излома являются частицы вторых фаз, внутрифазные (границы раздела зерен) и межфазные (границы раздела частица / матрица) границы раздела, внутризеренные дефекты (субзеренные границы, дислокации). Можно ожидать, что наложение потенциала 1 В не приводит (ввиду его малости) к изменению фазового состава, размеров и морфологии частиц второй фазы, состояния и плотности межфазных и внутрифазных границ раздела.

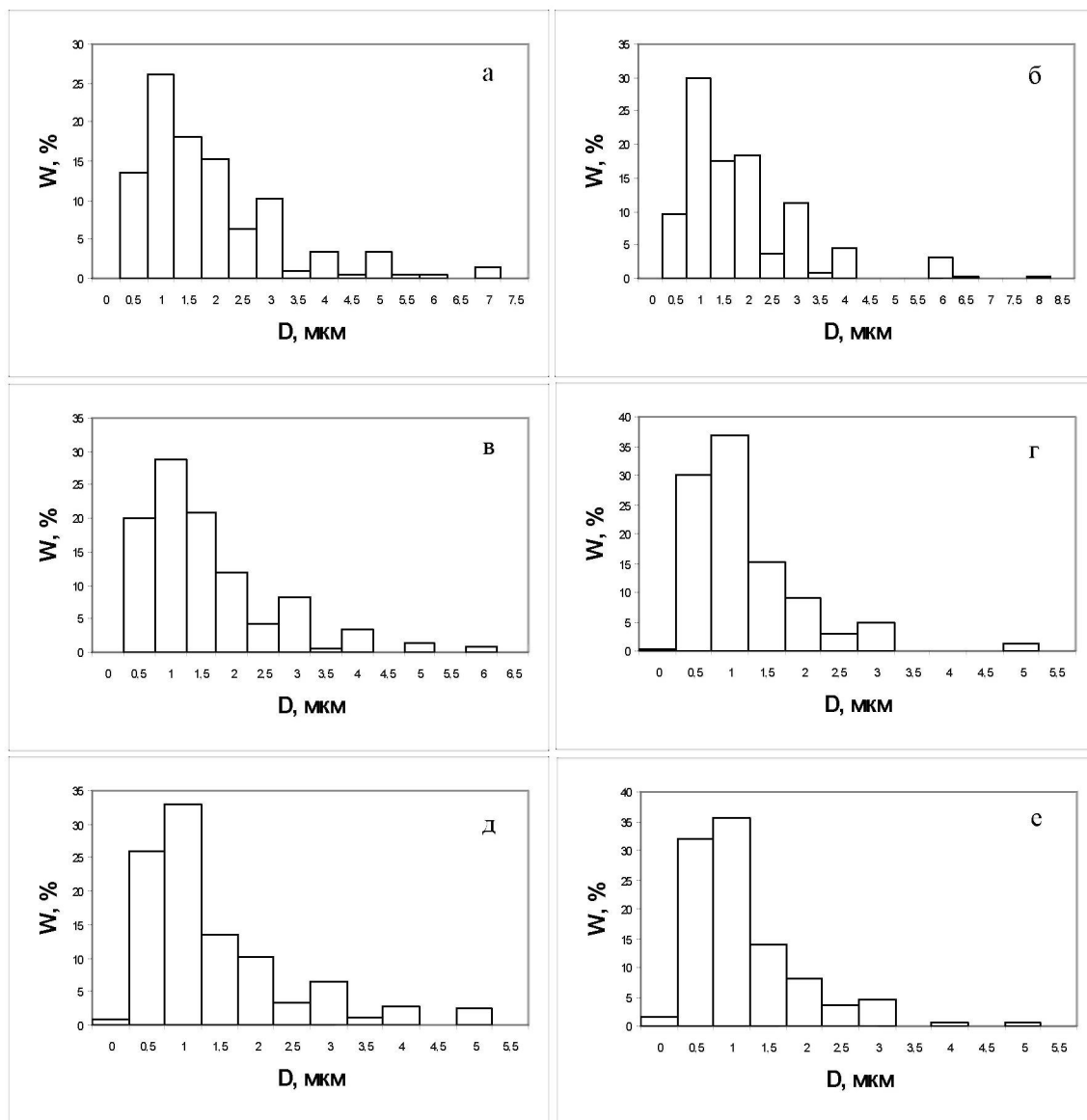


Рис. 4. Распределение ямок вязкого излома по размерам: а) $D = 1,84 \pm 1,3$ мкм, б) $D = 1,85 \pm 1,25$ мкм – испытания без потенциала; в) $D = 1,53 \pm 1,07$ мкм, г) $D = 1,17 \pm 0,8$ мкм, д) $D = 1,4 \pm 1,06$ мкм, е) $D = 1,12 \pm 0,8$ мкм – при потенциале 1 В; а, в, д – зона волокнистого излома; б, г, е – зона среза

Следовательно, полученные результаты могут косвенно свидетельствовать о том, что наложение потенциала оказывает влияние на эволюцию (скорость накопления и аннигиляции, механизмы зарождения и схему перестройки) дефектной субструктуры объема и приповерхностного слоя прутка при ползучести технически чистого алюминия по сравнению с ползучестью алюминия без потенциала.

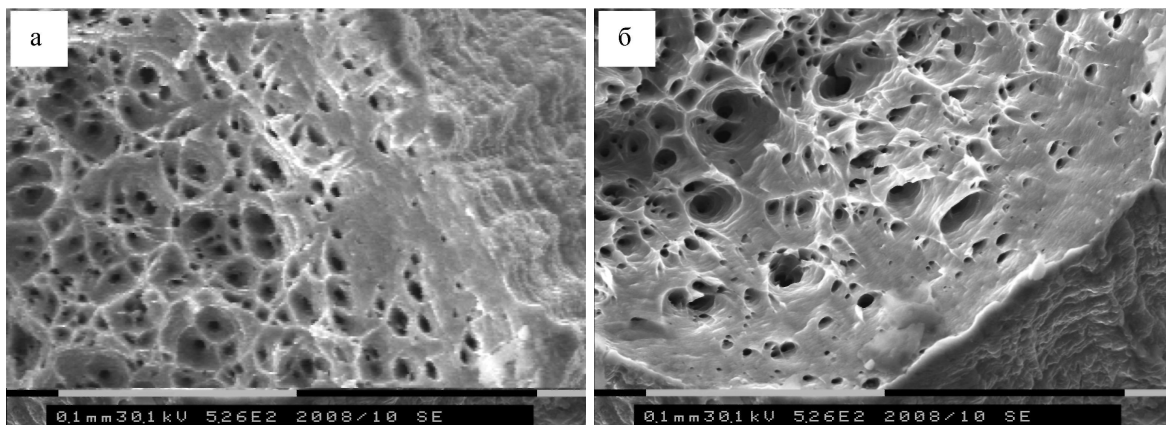


Рис. 5. Фрактограммы поверхности разрушения технически чистого алюминия:
а – без потенциала; б – при наложении потенциала +1 В

Таким образом, выполненный в настоящей работе количественный анализ поверхности разрушения, формирующейся в условиях ползучести технически чистого алюминия, позволяет заключить, что наложение потенциала 1 В, приводящего к ускорению ползучести, снижает вязкий характер разрушения технически чистого алюминия при деформации в условиях ползучести, оказывая влияние на состояние дефектной субструктуры объема и поверхностного слоя материала.

Считаем своим приятным долгом выразить признательность д.ф.-м.н., профессору Л.Б. Зуеву за обсуждение результатов эксперимента и критические замечания.

Литература

1. Громов, В.Е. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, В.Я. Целлермайер. - М.: Недра, 1996. - 293 с.
2. Физические основы и технологии обработки современных материалов. Т. 1. / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. - Ижевск: Изд-во «ИКИ», 2004. - 590 с.
3. Conrad, H. On the mechanisms for electroplastic effect in metals / H. Conrad, A.F. Sprecher, S.L. Mannan // Acta met. - 1986. - V. 34. - № 7. - P. 1145-1162.
4. Electroplastic effect in metals: Proceedings of China-Russia Symposium / Institute of Advanced Materials, Siberian State University of Industry; Ed. by V. Gromov, G. Tang. - Novokuznetsk, 2007.-319 p.
5. Громов, В.Е. Эффективность действия различными видами тока на ползучесть монокристаллов Zn / В.Е. Громов, В.И. Стащенко, О.А. Троицкий // Известия АН СССР. Серия «Металлы». - 1991. - № 2. - С. 154-158.
6. Клыпин, А.А. Связь электронной эмиссии с ползучестью металлических материалов / А.А. Клыпин, Е.С. Соловьев // Проблемы прочности. - 1976. - № 11. - С. 45-49.
7. Клыпин, А.А. О пластической деформации металлов при наличии электрического воздействия / А.А. Клыпин // Проблемы прочности. - 1975. - № 7. - С. 20-26.
8. Коновалов, С.В. О влиянии электрического потенциала на скорость ползучести алюминия / С.В. Коновалов и др. // Физика твердого тела. - 2007. - Т. 49. - Вып. 8. - С. 1389-1391.
9. Коновалов, С.В. Автоматизированная установка для регистрации и анализа ползучести металлов и сплавов / С.В. Коновалов и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2007. - Т. 73, № 8. - С. 64-66.
10. Зажигаяев, Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаяев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. - М.: Атомиздат, 1978. - 232 с.
11. Фрактография и атлас фрактограмм: справ, изд. / под ред. Дж. Феллоуза; пер. с англ. - М.: Металлургия, 1982. - 490 с.
12. Энгель, Л. Растровая электронная микроскопия. Разрушение: справочник / Л. Энгель, Г. Клингеле. - М.: Металлургия, 1986. - 232 с.

Поступила в редакцию 14 января 2009 г.

EFFECT OF ELECTRIC POTENTIAL ON THE CREEP FAILURE SURFACE OF ALUMINUM

The article studies the effect of electric potential on technically pure aluminum creep curves. The investigations of failure surface and microrelief of side surface near failure surface being formed in the aluminum creep process are carried out by methods of scanning electron microscopy. It is shown that +1 V potential application leads to some decrease of fracture viscosity on the creep process of technically pure aluminum and the possible reasons of such behavior are considered.

Keywords: creep, failure surface, potential.

Ivanov Yurii Fedorovich - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the group of material science in the laboratory of the plasma emissive electronics, Institute of High Current Electronics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk-62.

Иванов Юрий Федорович - доктор физико-математических наук, профессор, руководитель группы материаловедения в лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск-62.

e-mail: yufi@mail2000.ru

Konovalev Sergey Valerievich - Candidate of Science (Physics and Mathematics), associate professor of the Physics department, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk.

Коновалов Сергей Валерьевич - кандидат технических наук, доцент, кафедра физики, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк.

e-mail: konovalev@physics.sibsiu.ru

Gromov Victor Evgenievich - Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Physics department, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk.

Громов Виктор Евгеньевич - доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк.

e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Stolboushkina Oksana Andreevna - postgraduate student of the Physics department, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk.

Столбоушкина Оксана Андреевна - аспирант, кафедра физики, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк.