

КАВИТАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, НАПЛАВЛЕННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫМ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Ю.Ф. Лонин¹, А.Г. Пономарев¹, В.В. Уваров¹, В.Т. Уваров¹, Н.И. Базалеев²,
С.Е. Донец², В.Ф. Клепиков², В.В. Литвиненко², Е.М. Прохоренко²

¹ННЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины
Украина

²Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины
Украина

Поступила в редакцию 12.10.2010

В работе проведено исследование процесса дистанционной наплавки сильноточным релятивистским электронным пучком ряда материалов в виде фольг (алюминий, тантал) на различные металлические подложки на основе железа и вольфрама. Проводились металлографические исследования получаемых покрытий а также изучались особенности их структуры и проявления дефектов в процессе кавитационного износа и воздействия изгибающих напряжений.

Ключевые слова: сильноточный пучок электронов, дистанционная наплавка, модификация поверхности, дефекты структуры, кавитационная обработка.

В роботі проведено дослідження процесу дистанційної наплавки сильнострумовим релятивістським електронним пучком ряду матеріалів у вигляді фольг (алюміній, тантал) на різноманітні металічні підкладки на основі заліза та вольфраму. Проводились металографічні дослідження одержуваних покриттів а також вивчалися особливості їх структури в процесі кавітаційного зношення та дії згинаючих напружень.

Ключові слова: сильно струмовий пучок електронів, дистанційна наплавка, дефекти структури, кавітаційна обробка.

The remote facing of the various foils materials (aluminum, tantalum) on the substrates (iron, tungsten) by the impulse high-current relativistic electron beams were investigated in this paper. Metallographic examinations of gained coats were carried out and also features of their structure and appearance of defects in a process of the cavity deterioration and bent tensions were studied.

Keywords: high-current electron beam, remote facing, surface modification, structure defect, cavity treatment.

ВВЕДЕНИЕ

Наплавка является одним из способов модифицирования свойств поверхности металлических изделий, использующихся в качестве режущего инструмента, эксплуатирующихся в условиях кавитационного износа, подвергающегося ударным нагрузкам и др [1]. Использование для наплавления материала импульсных сильноточных релятивистских электронных пучков позволяет в перспективе достичь ряда положительных эффектов. Это обусловлено тем, что при воздействии импульсного электронного пучка происходит последовательность технологических процессов: расплавление наносимого материала, сообщение расплаву импульса движения в направлении подложки и активация электрон-

ной и ионной систем в условиях высокого давления и высоких температур. Указанный метод сочетает элементы процесса электронно-лучевой наплавки, наплавки взрывом, плазменной и индукционной наплавки.

Учитывая импульсный характер воздействия, такие традиционно проблемные этапы наплавки, как преимущественное испарение легкоплавких элементов, вызывающее возникновение шлаковых включений в переходной области покрытие-подложка, трещинообразование, несплошности и другие требуют отдельного изучения.

В работах [2,3] проводились исследования закономерностей возникновения неустойчивостей газоплазменного факела, возникающего при расплаве наносимого материала,

обусловленных причинами электродинамической природы. Вместе с тем даже при получении достаточно сплошного покрытия остается важной задача изучения зоны контакта “покрытие-подложка”. Поскольку наплавка покрытия производится в результате действия одиночного импульса, возникает также задача оценки количественного соотношения энергии пучка, затраченной на расплавление наносимого материала и энергии поглощенной материалом подложки, а также определения геометрических параметров покрытия и его адгезионных свойств.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка для наплавки покрытий была выполнена на базе ускорителя МИГ-1 ННЦ Харьковский физико-технический институт. Ускоритель характеризуется следующими параметрами пучка. Энергия электронов 0,3 – 0,5 МэВ, ток пучка 2 кА, длительность импульса 5 мкс. Наплавляемый материал представлял собой фольги (алюминий тантал), размещаемые перед подложкой (вольфрам, Ст. 45) на различных расстояниях, варьируемых от 5 до 40 мм. Более подробное описание схемы установки приведено в работе [3].

Излом части образцов проводили в среде жидкого азота, вторая часть образцов подвергалась излому при комнатной температуре. Установка для испытаний на кавитационную стойкость смонтирована на основе ультразвукового генератора УЗДН-22Т, частота 20 кГц, мощность 400 Вт.

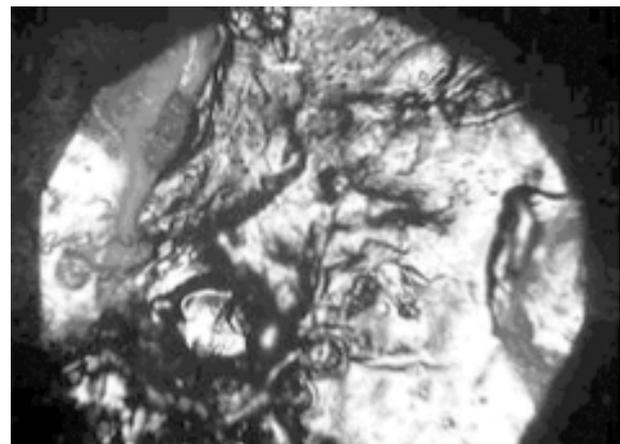
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Состояние покрытия. Известно, что наносимые покрытия характеризуются островковым характером контакта с подложкой, а также присутствием шлаковых включений, обусловленных более высокой летучестью легкоплавких элементов при испарении пучком и их осаждении на изделии. С целью определения удельного значения площади эффективного схватывания с подложкой, наносимые покрытия испытывали в условиях кавитационного воздействия. Данный вид воздействия был выбран как тестовый в силу того, что он обеспечивает преимущественное удаление шлаковых включений, а также тех

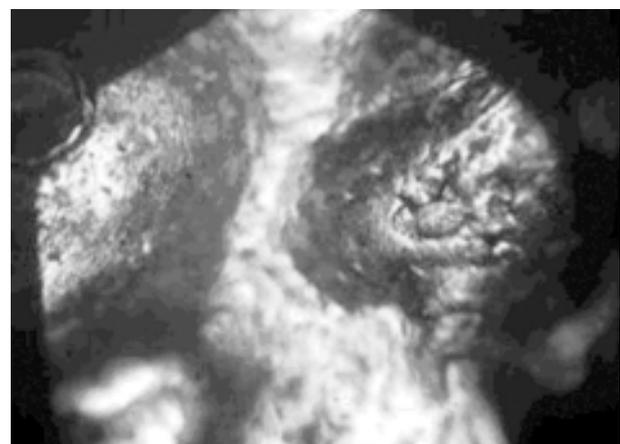
фрагментов покрытия, которые конденсируясь не имели достаточной энергии для создания адгезионной связи. Как уже отмечалось, данный метод наплавки имеет общие признаки с электроннолучевым и др. методами наплавки, однако в части количественной оценки целесообразно обратиться к геометрическим критериям, которые характеризуют стадии технологического процесса. Так описанный в работе [1] (на стр. 366) коэффициент формы в нашем случае запишется как:

$$\chi = \frac{S_o}{h_n}, \quad (1)$$

где S_o – площадь сплошного (неудаляемого в процессе кавитационной обработки) контакта покрытия с подложкой, h_n – глубина проплавления. Указанные величины определялись путем сравнения исходных наплавленных поверхностей (рис. 1а) с поверхностями



а)



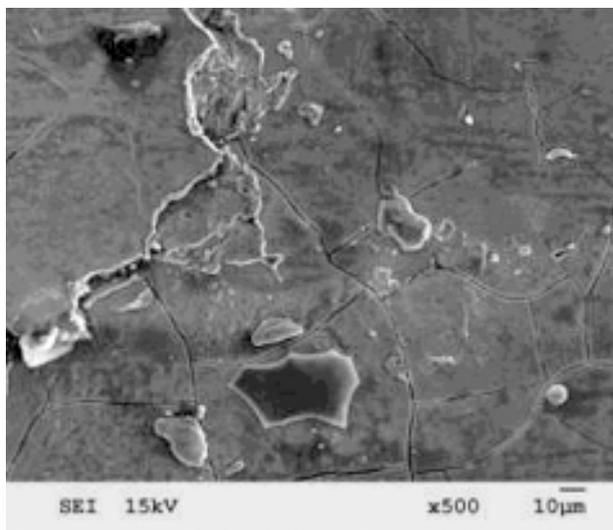
б)

10 мкм

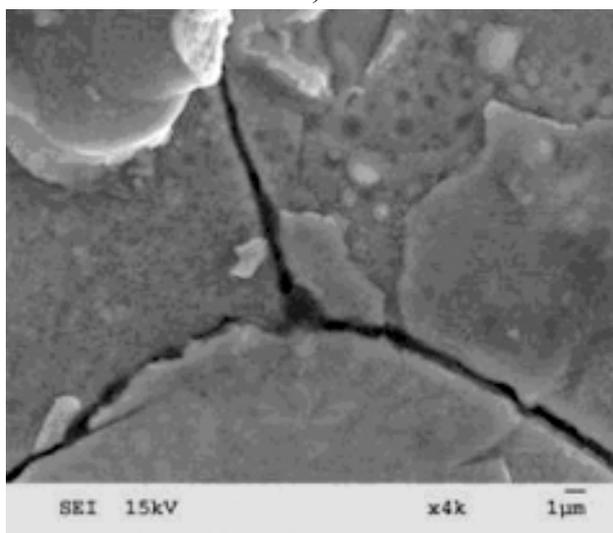
Рис. 1. Поверхности Ст 45 с наплавленным слоем тантала: а) – исходная; б) – после кавитационной обработки.

после кавитационной обработки (рис. 1б). Поскольку поверхность получаемого покрытия содержит конденсировавшиеся продукты легкоиспаряемых элементов с малым атомным весом, содержащиеся как примеси, и как естественные неустраненные загрязнения, для их удаления изделие подвергалось кавитационной обработке. Поверхность после кавитационной обработки приведена на рис. 1б.

Изображение этой же поверхности, подвергнутой изгибу, полученное на растровом электронном микроскопе с различным увеличением, приведено на рис. 2. Как видно в покрытии присутствует капельная составляющая, разлом поверхности происходит по линии раздела областей, имеющих сцепление с подложкой.



а)



б)

Рис. 2. Поверхность Ст 45 с наплавленным слоем тантала.

Глубину проплавления определяли путем изготовления шлифов перпендикулярно нанесенному слою и измерения глубины внедрения материала.

Также вводилась такая оценочная величина как коэффициент эффективной площади контакта:

$$\gamma = \frac{S_0}{S}, \quad (2)$$

где S – общая площадь нанесенного покрытия. По результатам проведенных наблюдений было установлено, что оптимальной является толщина фольги, обеспечивающая преимущественное плавление со стороны подложки.

Такой режим плавления обеспечивает максимальное ускорение частиц расплава и, соответственно, возможность образования достаточно сплошного покрытия. В качестве еще одного очевидного критерия по которому можно проводить оптимизацию технологии наплавки с использованием сильноточных релятивистских пучков электронов является коэффициент использования материала

$$\alpha = \frac{d_f}{d_s}, \quad (3)$$

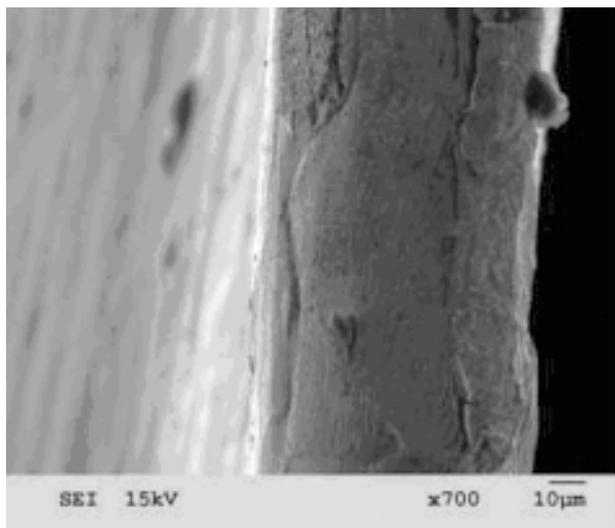
определяемый как соотношение толщины испаряемого слоя фольги d_f к толщине получаемого покрытия d_s . Данный параметр позволяет оценить эффективность использования наносимого материала, правильность выбора толщины фольги, расстояния от фольги до подложки.

Следует заметить, что в случае тонких фольг с толщиной, соизмеримой со средней длиной пробега электронов характер испарения материала существенно зависит от пространственного распределения поглощенной дозы. Очевидно, что для более эффективного выброса расплавленного материала покрытия и сообщения ему максимального импульса является предпочтительным, чтобы плавление начиналось со стороны, обращенной к мишени. Оценочной формулой для определения глубины пробега электронов l (мкм) может служить выражение [4]

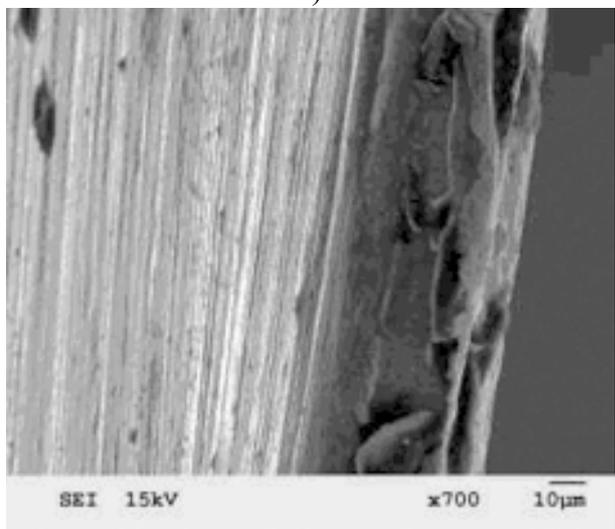
$$l = 6,67 \cdot 10^{-7} E^{5/3} / \rho, \quad (4)$$

где E – энергия электронов (эВ), ρ – плотность.

Поэтому нами были проведены металлографические исследования фольги тантала, облученной сильноточным импульсным электронным пучком. В частности был исследован низкотемпературный излом фольги утоненной вследствие облучения с исходной толщины 50 мкм до 30 мкм. С целью установления зоны максимального энерговыделения по структурным изменениям вдоль пробега электронов (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Излом фольги тантала: а) – облученный образец; б) – необлученный образец.

Как видно, после облучения структура становится более однородной, и, хотя в обоих случаях излом происходит по вязкому механизму, исходному образцу присуща большая хрупкость, что и привело при разрушении к

возникновению фрагментов ямочного разлома, имеющих протяженную форму.

Фольги тантала размещались на различных расстояниях от подложки d . Результаты проведенных исследований были систематизированы в табл. 1.

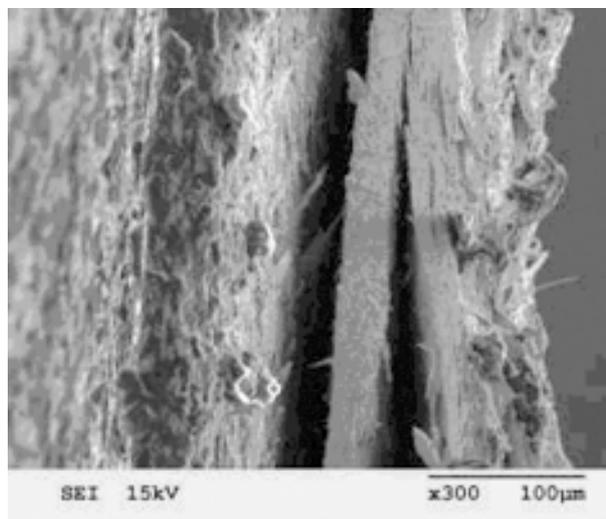
Таблица 1

Зависимость характеристик сцепления наплавленного слоя тантала на Ст. 45 от расстояния (фольга-подложка)

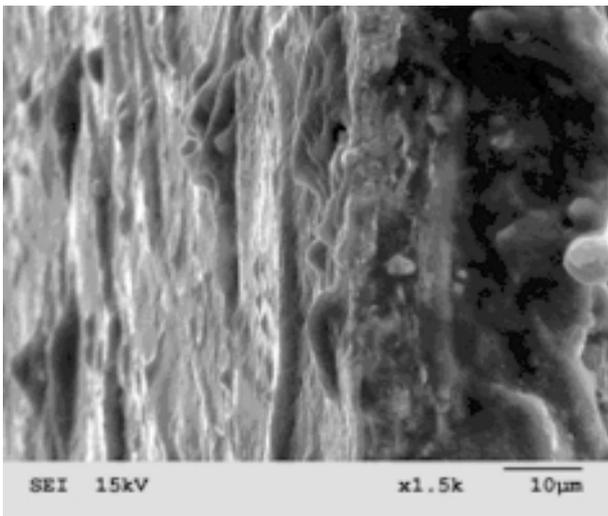
d , мм	α	γ	χ , мм
5	0,9	0,7	7
10	0,85	0,8	9
15	0,6	0,5	11

Проводимые исследования наплавки алюминия на вольфрамовые подложки представляли практический интерес для получения в приповерхностной области сплава вольфрама с алюминием, отличающегося жаропрочностью и устойчивостью к окислению. Ввиду существенно различающихся значений температуры плавления обоих материалов механизм возникновения контакта состоял в диффузионном проникновении расплава алюминия в поверхностную область вольфрама. При помещении в кавитационное поле покрытие легко удалялось с поверхности, а при низкотемпературном изломе наблюдалось отслоение материала покрытия от подложки, как это можно увидеть на рис. 4.

Вместе с тем более детальное рассмотрение позволяет увидеть, что алюминиевое покрытие имеет однородную мелкозернистую структуру. Достичь сплавления можно при дуплексной обработке, заключающейся в по-



а)



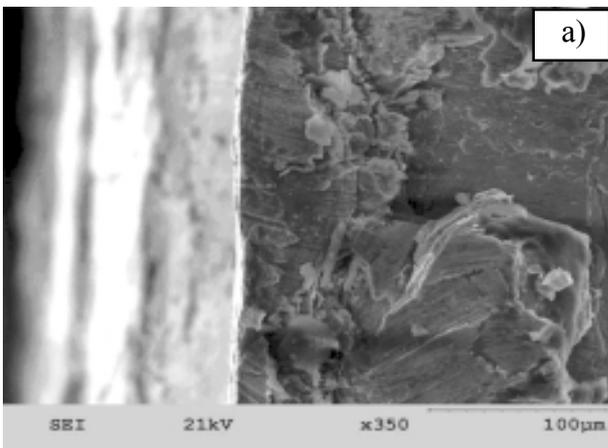
б)

Рис. 4. Излом поверхности вольфрама с наплавленным слоем алюминия.

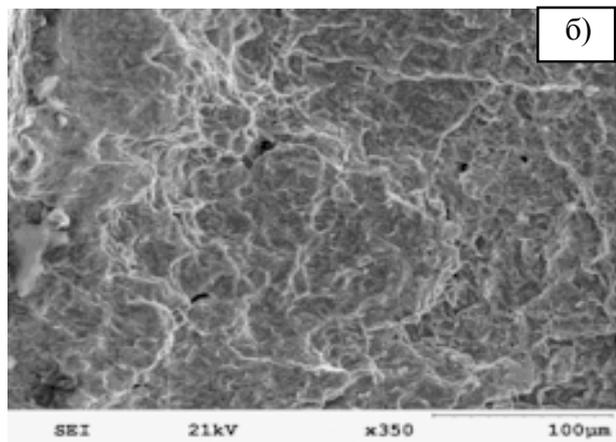
вторном облучении покрытия, осажденного на поверхности [5].

Состояние подложки. Так как микроскопические особенности разрушения как правило различаются даже в пределах небольшого участка, то далее приведены фактограммы, показывающие общие закономерности разрушения для всех исследованных полей зрения изломов массивных титановых и медным подложек, подготовленных при комнатной температуре.

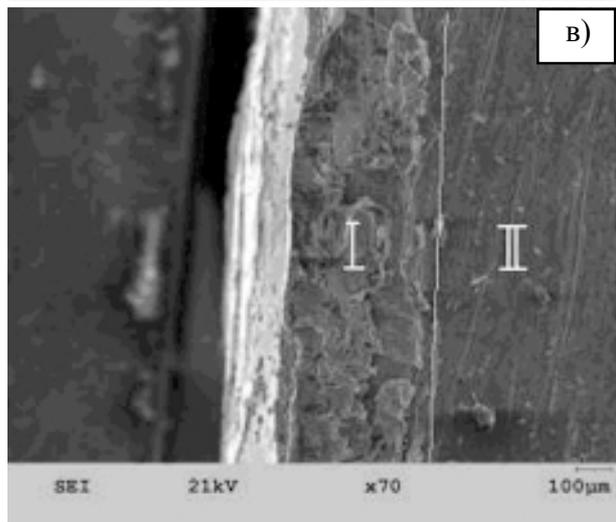
Для облученного титана четко различаются две зоны с различными механизмами разрушения. Для первой зоны (рис. 5в) виден скол в сочетании с межзёренным разрушением при наличии следов отрыва в механизме разрушения. Для второй зоны наблюдаются параллельные поверхности полосы рельефа, видимо вызванные акустическими волнами в образце, возбужденными СРЭП, перемежающиеся фасетки скола и вторичные трещины.



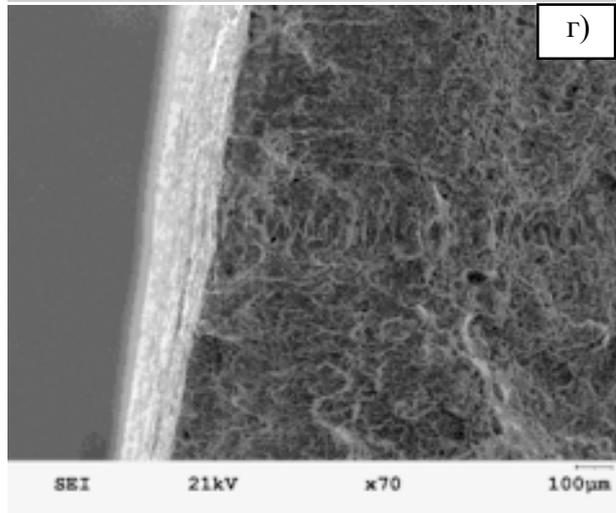
а)



б)



в)



г)

Рис. 5. Излом титана, облученного СРЭП – а) и в); необлученного – б) и г).

Для необлученного титана механизм разрушения по всей толщине образца одинаков: разрушение слиянием микропор с отрывом.

Для необлученного образца меди (рис. 6б, г). Крупные поры образовались, по-видимому, в результате локального разрушения по границе зерна, видны межзёренные фасетки,

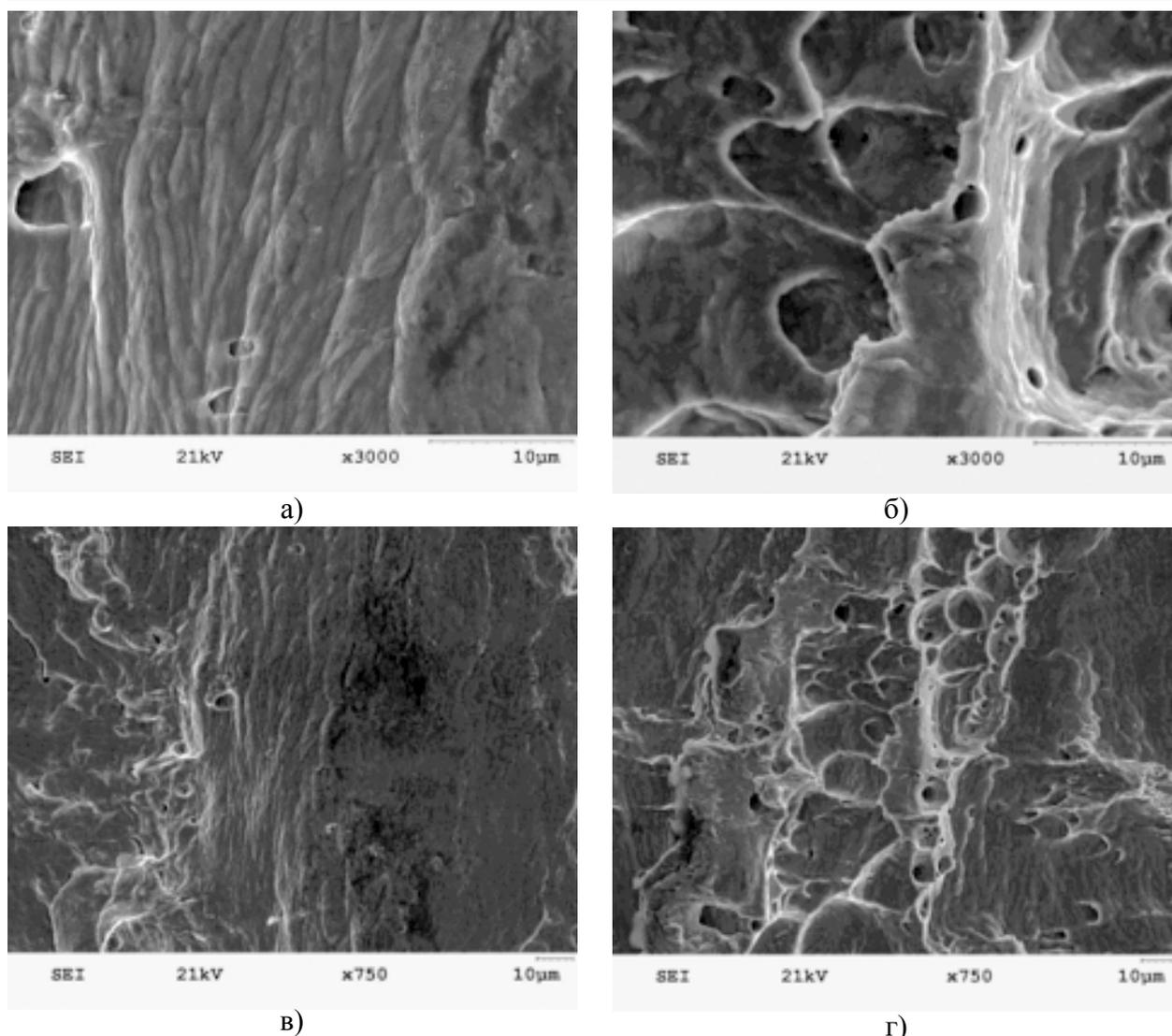


Рис. 6. Излом электротехнической меди, облученной СРЭП: – а) и в); необлученной – б) и г).

механизм вязкого разрушения – слияние микропор. Для облученного образца (рис. 6а, в) видны только ямочные внутрезеренные фасетки, межзеренных не видно, по всей видимости также присутствуют следы акустических волн, заметно меньшее количество микропор, хотя механизм разрушения такой же как и для необлученного образца.

ВЫВОДЫ

Дистанционная наплавка покрытий сильноточным релятивистским пучком электронов характеризуется возникновением дефектов, обусловленных преимущественным испарением быстролетучих элементов, осаждающихся на подложке и препятствующих возникновению контакта “покрытие-подложка”. Указанные типы дефектов проявляются в условиях кавитационного воздействия и могут служить причиной снижения эксплуата-

ционных свойств получаемых покрытий. При нанесении легкоплавких материалов для возникновения контакта с подложкой целесообразно повторное облучение. Установлено, что фактором, способным влиять на адгезионные свойства являются процессы, обусловленные действием сильноточного пучка на приповерхностные слои подложки: изменение зеренной структуры вследствие переплава и высоких скоростей охлаждения в условиях большого температурного градиента по толщине подложки; генерирование волн разрежения – сжатия, приводящих к уменьшению пластичности материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Инженерія поверхні. – К.: Наукова думка, 2007. – 558 с.

2. Клепиков В., Пащенко А., Пономарев А. и др. Дистанционное нанесение покрытий сильноточным релятивистским электронным пучком//ФиХОМ. – 2006. – № 3. – С. 24-28.
3. Клепиков В., Лонин Ю., Литвиненко В. и др. Использование сильноточного РЭП микросекундной длительности для формирования упрочняющих покрытий//ВАНТ. – 2008. – № 5 (50). – С. 91-95.
4. Бакшт Р.В., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Воздействие мощного кратковременного электронного потока на металлы//Разработка и применение источников интенсивных электронных потоков. – Новосибирск: Наука, 1976. – 153 с.
5. Погребняк А., Василюк В., Алонцева Д. и др. Структура и свойства покрытий из никелевого сплава после плавления электронным пучком//Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, Вып. 4. – С. 78-86.