

# ДИНАМИКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОДИФИКАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

*В.И. Федун, Ю.Е. Коляда*

*Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина*

*E-mail: fedun276@rambler.ru*

Приведены результаты металлографических исследований и рентгеноструктурного анализа сталей М76 и 5ХНМ при поверхностной модификации электронным пучком. Рассчитаны профили температур в образцах. Обсуждается влияние фазового состава и напряжений второго рода на микротвердость. Рассмотрен возможный механизм развития волновых процессов в расплавленных слоях и его влияние на микротвердость. В условиях эксперимента определяющими являлись термоупругие эффекты.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в области высоких технологий является поверхностная модификация металлов и сплавов концентрированными потоками энергии – лазерными пучками и пучками заряженных частиц [1-3]. Наибольший интерес представляет изучение модифицированных свойств конструкционных и инструментальных сталей, так как при этом существенно повышаются их эксплуатационные характеристики. В данном направлении проведено значительное количество исследований и опубликовано достаточно много работ, основные результаты которых хорошо обобщены, например, в [1].

Достоверно установлено, что в результате поверхностной модификации металлов и сплавов пучками заряженных частиц в несколько раз повышается микротвердость исходных материалов, глубина упрочнённого слоя в несколько раз превышает среднюю длину свободного пробега частиц пучка в данном веществе. Изучены фазовые превращения, происходящие при этом. Показано, что микротвёрдость возрастает за счет образования мартенситных структур. Во многих случаях зафиксирован периодический характер изменения микротвердости в глубь образца. Для реализации поверхностной модификации необходимы пучки с потоками мощности не менее  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. При этом обеспечивается быстрый нагрев поверхности образца и его остывание со скоростью  $10^6 \dots 10^7$  град/с, в результате чего происходит закалка поверхностного слоя. Кроме того, на величину и характер дислокаций влияют также и образовавшиеся, если позволяют условия, упругие волны большой амплитуды и ударные волны.

Цели, поставленные авторами в данной работе, обусловлены следующими обстоятельствами.

- Широкому промышленному внедрению указанных технологий препятствуют стоимостные характеристики применяемого оборудования. В этой связи наиболее перспективными являются микросекундные электронные пучки с энергией сотни килоэлектронвольт и током несколько килоампер. Это обстоятельство стало для авторов определяющим при выборе концентрированного источника энергии.

- При изучении механизмов поверхностной модификации необходимо четко различать факторы, обусловленные термозакалкой и воздействием упру-

гих волн большой амплитуды, которые часто присутствуют одновременно. Поэтому в данной работе созданы условия, при которых ударная волна не возникает, т.е. имеется только термическое воздействие электронного пучка на материал.

- Отсутствует в настоящее время механизм, объясняющий образование периодической структуры упрочненной зоны, установленный многими авторами.

- Структура фазовых превращений в глубь образца не является однородной, что впервые было отмечено в [4]. Однако этот вопрос также исследован недостаточно.

- Во многих экспериментах установлено наличие волнового рельефа застывшей поверхности и даны различные механизмы его образования [5], т.е. ответ на этот вопрос также неоднозначен.

Сформулированные проблемы и определили цель настоящей работы.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы, изготовленные из углеродистой стали М76 в отожженном состоянии и легированной стали 5ХНМ в закаленном состоянии, облучались пучком электронов на ускорителе [6] в двух режимах. В первом режиме энергия электронов составила  $E_I = 400$  кэВ, плотность тока  $j_I = 30$  А/см<sup>2</sup>, длительность импульса по основанию  $\tau = 10$  мкс. Во втором режиме энергия электронов  $E_{II} = 700$  кэВ, плотность тока  $j_{II} = 50$  А/см<sup>2</sup>, длительность импульса  $\tau = 10$  мкс. В обоих случаях форма импульсов напряжения колоколообразная. Образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда с размерами  $10 \times 10 \times 55$  мм. Поверхность образцов перед облучением полировалась. Образцы подвергались однократному воздействию пучка в вакууме.

Исследование результатов воздействия пучка на структуру образцов проводилось в двух направлениях: по поверхности и в глубь образца вплоть до основной структуры. Для исследований поверхности изготавливались “косые” шлифы. Фотографирование структур образцов осуществлялось на металлографическом микроскопе МИМ-7 и на электронном микроскопе ЭМВ-100ЛМ. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3. Рентгеноструктурные исследования проводились на аппаратах УРС-60 и ДРОН-2.

## 2.1. РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

После однократного воздействия пучка на поверхности образцов возникают пятна оплавления с измененной структурой и сильно выраженным волновым рельефом поверхности. На Рис.1 приведены фотографии шлифов образцов из стали М76 после обработки в режимах I и II. Видно, что образец, обработанный в режиме I (см. Рис.1,а), на свободной поверхности имеет ярко выраженный белый слой толщиной ~10 мкм, под которым можно наблюдать чередующиеся светлые и темные слои.

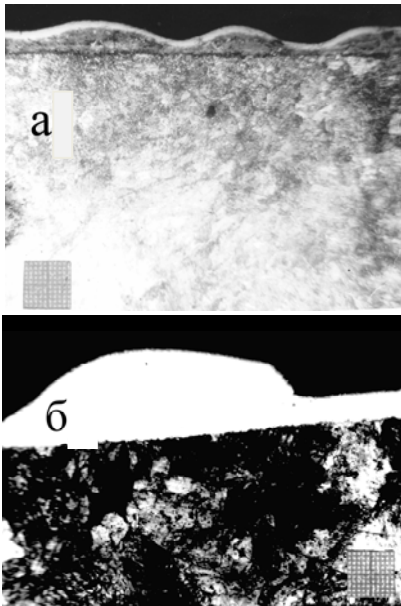


Рис.1. Рельеф поверхности и структура стали М76 после обработки в режимах I (а) и II (б) (×200)

Следует отметить, что белый слой имеет волновой рельеф, а граница перехода в основную структуру – плоская. Среднее расстояние от поверхности образца до исходной структуры ~30 мкм, а амплитуда волны ~10 мкм. При этом расстояние между выступами на поверхности образцов ~150 мкм.

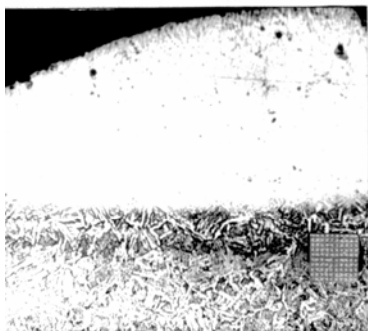


Рис.2. Рельеф поверхности и структура образца из стали 5ХНМ после обработки в режиме II (×200)

После обработки образцов из стали М76 (см. Рис.1,б) и 5ХНМ (Рис.2) в режиме II на рабочей грани образца образуется белый слой, непосредственно переходящий в основную структуру образца. Граница перехода близка к плоской, а свободная поверхность белого слоя, как и при обработке в режиме I, имеет форму волны. Средняя толщина белого слоя ~100 мкм, амплитуда волны ~40 мкм.

Пустоты в телах образцов не выявлены.

Из фотографии косо шлифа стали М76, облученной в режиме II (Рис.3), видно, что структура поверхностного слоя имеет дендритное строение.

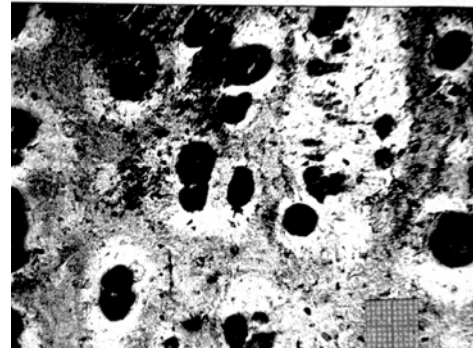


Рис.3. Фотография косо шлифа стали М76 после обработки в режиме II (×70)

На фотографиях (Рис.4) косых шлифов, сделанных в глубь образца из стали М76, обработанного в режиме II, выявлены структуры мелкодисперсного мартенсита, переходящие в более грубые структуры сорбита, троостита и пластинчатого перлита.

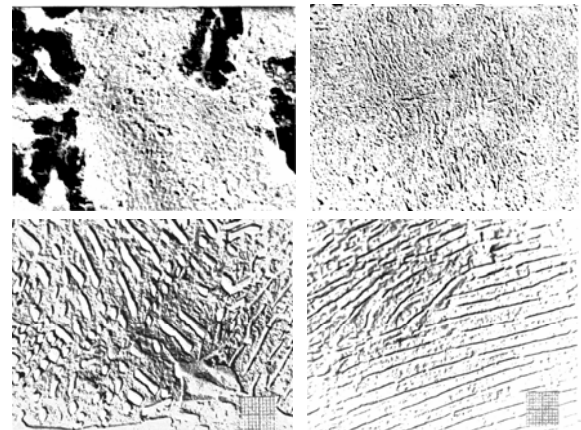


Рис.4. Фотографии косых шлифов стали М76 после обработки в режиме II (×12500)

Результаты измерения микротвердости образцов из стали М76 по методу Виккерса приведены на Рис.5. Следует отметить, что для образца, обработанного в режиме I, микротвердость монотонно убывает от 9000 до 3000 МПа на расстоянии ~40 мкм, что соответствует толщине визуально заметных на Рис.1 изменений исходной структуры образца.

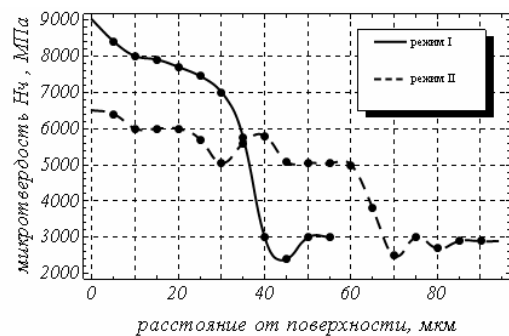


Рис.5. Микротвердость модифицированной поверхности стали М76

Для образцов, обработанных в режиме II, зависимость микротвердости от расстояния до поверхности носит более сложный характер (Рис.5 и б).

Для стали М76 ее максимальное значение 6900 МПа достигается на поверхности, заметен периодический характер изменения в глубь образца. Значение микротвердости на поверхности ~7000 МПа. В образце из стали 5ХНМ (см. Рис.6) на глубине ~50 мкм наблюдается максимум микротвердости ~8000 МПа. На расстоянии 70...80 мкм при переходе к основной структуре происходят периодические изменения в значениях микротвердости.

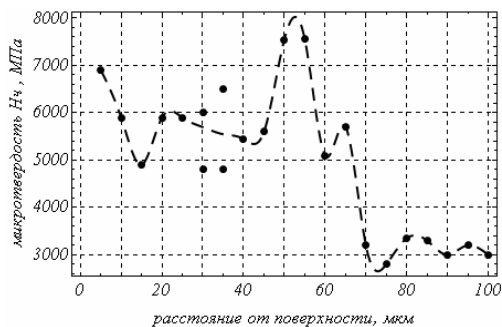


Рис. 6. Микротвердость модифицированной поверхности стали 5ХНМ

## 2.2. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕНТГЕНОСТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА

Результаты рентгеноструктурного анализа образцов, обработанных в двух режимах, приведены на Рис. 7 и 8.

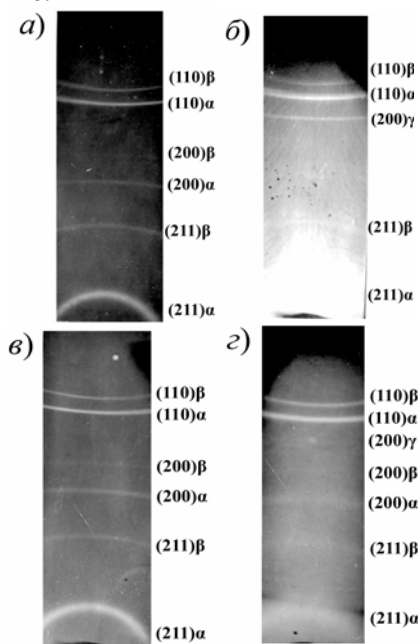


Рис. 7. Рентгенограммы исследуемых сталей

Рентгеновский фазовый анализ стали М76, подверженной воздействию импульсного электронного пучка, свидетельствует о наличии в поверхностном слое двух фаз: α и γ.

Дебаевские линии α-фазы стали М76 на рентгенограмме облученного образца (см. Рис. 7, б) по сравнению с рентгенограммой образца в исходном состоянии (см. Рис. 7, а) размытые, что свидетельствует о появлении в поверхностном слое напряжений II рода.

Вместе с тем необходимо отметить, что на дифрактограмме линии (211) α-фазы исследуемого образца (см. Рис. 8) наблюдается появление второго максимума малой интенсивности. Это может свиде-

тельствовать о появлении другой структурной составляющей – мартенсита, хотя на рентгенограмме четкого разделения линий α-фазы на дублеты и триплеты, характерные для мартенсита, не наблюдается. Следовательно, можно говорить о неполном превращении феррита в мартенсит.

Таким образом, высокую микротвердость модифицированного слоя можно объяснить как появлением мартенсита, так и высокой степенью микроискажений исходного феррита.

Линии основной α-фазы после воздействия электронного пучка широкие и размытые, что также свидетельствует о наличии напряжений II рода. Однако появление второго максимума на дифрактограмме линии (211) α-фазы не наблюдалось.

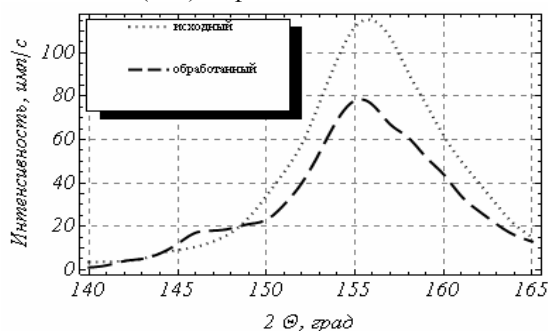


Рис. 8. Дифракционная линия (211) (излучение K<sub>α</sub>-Cr) исследуемых сталей после обработки электронным пучком

В результате рентгенографических исследований установлено, что наряду с α-фазой (см. Рис. 7, а и в), присутствующей в исходном состоянии, после облучения наблюдаются линии (200) γ-фазы (см. Рис. 7, г), что свидетельствует о присутствии аустенита, образовавшегося в результате высокотемпературного нагрева и последующего быстрого охлаждения. Эта линия имеет ярко выраженный характер для стали М76 и имеет малую интенсивность для стали 5ХНМ. Как известно [7], обнаружение остаточного аустенита в сталях с содержанием углерода <0,6% весьма затруднительно.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проведения анализа полученных результатов необходимо иметь представление о распределении температуры в образцах. Для этого численными методами решалась задача теплопроводности при наличии кратковременных объемных источников теплоты:

$$r c \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q(x, t). \quad (1)$$

Для рассматриваемых режимов обработки согласно [8] объемная плотность  $q(t, x)$  тепловых источников:

$$q(t, x) = j_0 \frac{dE}{edx} \sin \frac{\pi p t}{R_0} \sin \frac{\pi p x}{R_0} \quad E = E_0 \sin \frac{\pi p t}{R_0} \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{E}{R_0} \left[ 1 - \frac{x}{R_0} \right]^{5/4} \left[ 3 - 2e^{-\frac{Z+8}{4} \frac{x}{R_0}} \right]$$

$$R_0 = E^2 / (r b_1),$$

где  $R_0$  – глубина проникновения электрона в вещество;  $Z$  – порядковый номер элемента (для железа  $Z=28$ );  $c$  – элементарный заряд;  $j_0$  – плотность тока пучка электронов;  $\tau$  – время действия пучка;  $E_0$  – максимальная энергия электронов пучка;  $\rho$  – плотность материала образца;  $b_1$  – константа торможения (для железа  $b_1=2,35 \cdot 10^{-6}$  кэВ $^2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{см}^2$ );  $dE/dx$  – приведенные потери энергии электрона на единицу длины пробега.

Скорость  $V_f$  продвижения границы раздела жидкость-твердое тело определялась из условия:

$$r L V_f = I_f \frac{\lambda_c T}{\rho x} - I_c \frac{\lambda_l T}{\rho x}, \quad (3)$$

где  $\Lambda$  – удельная теплота плавления;  $\lambda_c$  и  $\lambda_l$  – коэффициенты теплопроводности кристаллической и жидкой фаз.

При расчетах принимались значения величин, взятые из литературных источников [9]. Результаты численного эксперимента для режима *I* приведены на Рис.9, а для режима *II* – на Рис.10.

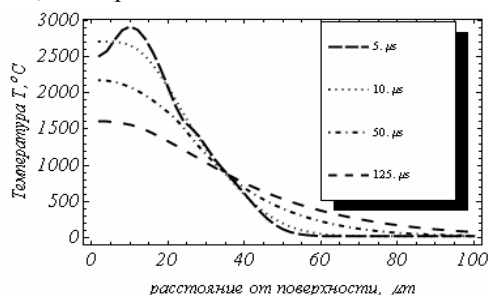


Рис.9. Профили температур в образце в различные моменты времени при обработке электронным пучком в режиме *I*

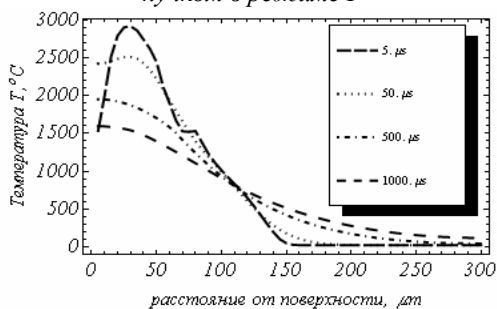


Рис.10. Профили температур в образце в различные моменты времени при обработке электронным пучком в режиме *II*

Из представленных результатов следует, что температура образцов при обработке их электронным пучком не достигала температуры интенсивного испарения (для железа  $T_{и.и} \approx 4000^\circ\text{C}$ ). В режиме *I* максимальная глубина проникновения электронов в вещество  $R_0=50$  мкм, расстояние от поверхности, на котором еще наблюдалась температура плавления  $Fe$  ( $T_{пл. Fe}=1535^\circ\text{C}$ ), составляло  $\sim 30$  мкм. Время существования жидкого  $Fe$  не превышало 150 мкс.

В режиме *II* глубина проникновения электронов в вещество  $R_0=150$  мкм, расстояние от поверхности, на котором еще наблюдалась температура плавления  $Fe$ , составляло  $\sim 80$  мкм. Время существования жидкого  $Fe$   $\sim 1$  мс.

Как видно из результатов расчетов, время пребывания стали в жидком состоянии в режиме *II* на порядок больше, чем в случае обработки образца в режиме *I*. Следовательно, скорость охлаждения расплавленного слоя в режиме *II* на порядок ниже, чем в режиме *I*.

## 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 4.1. РЕЛЬЕФ ПОВЕРХНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОЯ

При облучении всех образцов электронным пучком в обоих режимах зафиксировано плавление поверхностных слоев, которые при кристаллизации образуют плоскую границу перехода в основную структуру, а поверхность принимает волнообразный рельеф (см. Рис.1 и 2). Волновой рельеф поверхности указывает на то, что после облучения в расплавленном слое возбуждаются волны на поверхности жидкости.

Одним из возможных механизмов образования волновой поверхности является возбуждение капиллярных волн, дисперсионное соотношение для которых имеет вид [10]:

$$\omega_0^2 = \sigma_0 g k + \frac{a k^3}{r} \text{th}(kh), \quad (4)$$

где  $\omega_0$  и  $k$  – круговая частота и волновое число волны в слое жидкости;  $\alpha$  и  $\rho$  – коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкости;  $h$  – толщина слоя жидкости.

Факт существования застывшей волновой поверхности обусловлен наличием зарядов на поверхности расплавленного металла, что в свою очередь, приводит к развитию неустойчивости Тонкса-Френкеля [11, 12].

$$w^2 = \frac{k}{r} (r g - 4 p s_0^2 k + a k^2), \quad (5)$$

где  $\sigma_0$  – поверхностная плотность зарядов на поверхности жидкости;  $\omega$  – круговая частота волны.

Заряды на поверхности жидкости возникают, по всей вероятности, из-за наличия плазмы над поверхностью образца [2].

Кроме того, экспериментально были зафиксированы упругие колебания с частотой  $\sim 50$  кГц.

Решение уравнения (4) относительно  $k$  дает длину волны порядка 85 мкм, что сравнимо с расстояниями между выступами на поверхности. Приведенные оценки относятся к режиму *I*.

### 4.2. ФОРМИРОВАНИЕ И ХАРАКТЕР МИКРОТВЕРДОСТИ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ

Характерной особенностью упрочненных слоев для режимов *I* и *II* вне зависимости от исследуемых материалов является монотонность микротвердости по глубине для режима *I* и периодический характер микротвердости для режима *II*.

Следует учесть, что в режиме *II* флюенс превышал аналогичную величину в режиме *I* в 3 раза, а глубина проплавленного слоя оказывалась в 2 раза больше. Эти обстоятельства определяют амплитуду и период капиллярных волн, а также скорость охлаждения расплавленного слоя.

В частности, в режиме *I* зафиксирована меньшая толщина расплавленного слоя (по сравнению с режимом *II*), более короткое время кристаллизации и большая скорость остывания, что становится причиной образования слоя с монотонным характером микротвердости.

В режиме *II* время существования расплава, (см. Рис.9 и 10) на порядок выше, чем в режиме *I*. Это является причиной низкой скорости остывания и меньшей по величине микротвердости. Кроме того, в этом случае на процессы кристаллизации и остывания оказывают влияние колебания слоя жидкости по толщине, что и обуславливает периодический характер изменения микротвердости по глубине.

Возможно, что эти процессы наблюдаются и в режиме *I*, но дискретность измерений не позволила обнаружить эти особенности.

### ВЫВОДЫ

На основании проведенных металлографических исследований и рентгеноструктурного анализа поверхностной модификации сталей М76 и 5ХНМ электронным пучком в режимах, исключающих развитие упругих волн большой амплитуды, можно сделать следующие выводы:

– в модифицированном слое установлено формирование структур мелкодисперсного мартенсита, сорбита, троостита и пластинчатого перлита;

– обнаружены остаточные напряжения II рода, которые оказывают наибольшее влияние на величину микротвердости;

– формирование периодического характера микротвердости в исследуемых сталях определяется величиной флюенса пучка. В режиме *I* флюенс составил 30 Дж/см<sup>2</sup>, при этом характер изменения микротвердости - монотонно убывающий. В режиме *II* при переходе к флюенсу ~90 Дж/см<sup>2</sup> фиксировалась периодичность микротвердости;

– волновой рельеф обрабатываемой поверхности вызван, по всей вероятности, развитием неустойчивости капиллярных волн.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Бойко, А.Н. Валяев, А.Д. Погребняк. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц // *УФН*. 1999, т.169, №11, с.1243-1271.
2. А.Н. Диденко, А.Е. Лигачёв, И.Б. Куракин. *Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов*. М.: «Энергоатомиздат», 1987, с.184.
3. Н.Н. Рыкалин, А.Н. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. *Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов*. М.: «Машиностроение», с.1985-496.
4. П.Л. Грузин, В.Ю. Фомичёв и др. Формирование упрочнённых зон в железе под действием импульсного потока электронов // *Тезисы докладов 5-го Всесоюзного симпозиума по силовоточной электронике*. Томск, 1984, ч.2, с.150-152.
5. Н.Б. Волков, А.Я. Лейви, К.А. Талала, А.П. Яловец. Термокапиллярная конвекция в мишени, облучаемой интенсивным пучком заряженных частиц // *Журнал технической физики*. 2010, т.80, в.4, с.52-58.
6. Yu.E. Kolyada. High-current diode is intended for work in open air // *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Eindhoven, the Netherlands. August 17-21*. 1998, v.2, p.696-699.
7. А.П. Гуляев. *Металловедение*. М.: «Металлургия», 1978, с.647.
8. В.Ф. Попов, Ю.Н. Горин. *Процессы и установки электронно-ионной технологии*. М.: «Высшая школа», 1988, с.255.
9. *Физические величины: Справочник* / А.П. Бабичев, А.М. Братковский и др. / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: «Энергоатомиздат». 1991, с.1232.
10. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Гидродинамика*. М.: «Наука», 1986, с.735.
11. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред*. М.: «Наука», 1982, с.620.
12. М.Д. Габович, В.Я. Порицкий. Исследование нелинейных волн на поверхности жидкого металла, находящегося в электрическом поле // *Письма в ЖЭТФ*. 1981, т.33, в.6, с.320-324.

*Статья поступила в редакцию 25.05.2010 г.*

### DYNAMICS OF PHASE TRANSFORMATIONS BY ELECTRON BEAM SURFACE MODIFICATION OF METALS AND ALLOYS

*V.I. Fedun, Yu.E. Kolyada*

The results of metallography researches and X-ray structural analysis of steels by electron beam surface modification are submitted. The configuration of temperatures in samples are calculated. Influence of phase composition and residual stress on a microhardness are discussed. The possible mechanisms of development of wave processes in molten layers and there influence on a microhardness are considered. In the conditions of experiment determining were thermoelastic effects.

### ДИНАМІКА ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ПРИ ПОВЕРХНЕВІЙ МОДИФІКАЦІЇ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ ЕЛЕКТРОННИМ ПУЧКОМ

*В.І. Федун, Ю.Є. Коляда*

Наводяться результати металографічних досліджень та рентгеноструктурного аналізу сталей М76 і 5ХНМ при поверхневій модифікації електронним пучком. Розраховано профілі температур зразків. Розглянуто вплив фазового складу та напруг другого роду на мікротвердість. Розглянуто ймовірний механізм розвитку хвильових процесів в розплавлених шарах та його вплив на мікротвердість. В умовах експерименту визначальними виявились термопружні ефекти.