

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛЕЙ 12Х21Н5Т И 08Х18Н10Т, ОБЛУЧЕННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫМ ТРУБЧАТЫМ РЕЛЯТИВИСТСКИМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В РЕЖИМЕ АБЛЯЦИИ

В.В. Белозеров², С.Е. Донец¹, В.Ф. Клепиков¹, В.Ф. Кившик¹, В.В. Литвиненко³,
Ю.Ф. Лонин⁴, А.Г. Пономарев⁴, В.Т. Уваров⁴

¹Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины

²Национальный технический университет "ХПИ" МОН МС Украины

³Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина МОН МС Украины

⁴ННЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины

Поступила в редакцию 23.06.2011

В статье представлены исследования физико-механических свойств сталей марок 12Х21Н5Т и 08Х18Н10Т, облученных сильноточным трубчатым релятивистским электронным пучком. Установлено изменение микротвердости образцов по глубине. Показано изменение фазового состава приповерхностной зоны обработанных образцов. Представлены фрактограммы образцов и распределение элементного состава по глубине.

Ключевые слова: фазовый состав, микротвердость, фрактограмма, электронный пучок.

У статті представлено дослідження фізико-механічних властивостей сталей марок 12Х21Н5Т та 08Х18Н10Т, опромінених сильнострумовим трубчастим релятивістським електронним пучком. Встановлено зміни у микротвердості в залежності від глибини. Показано зміни у фазовому складі приповерхневої зони оброблених зразків, де збільшується кількість залишкового аустеніту. Представлено фрактограми зразків та розподіл елементного складу в залежності від глибини.

Ключові слова: фазовий склад, микротвердість, фрактограмма, електронний пучок.

An analysis of physical and mechanical properties of steels 12H21N5T and 08KH18N10T irradiated by the tubular highcurrent relativistic electron beam is presented. Microhardness as a function of depth of the treated samples is established. The change of phase composition of the treated samples surface, where the amount of residual austenite increases is shown. Samples fractographs and distribution of elemental composition as a function of depth is presented.

Keywords: phase composition, microhardness, fraktograph, electron beam.

ВВЕДЕНИЕ

Сильноточные трубчатые релятивистские электронные пучки являются перспективным инструментом для ряда практических приложений, таких как получение нанодисперсных порошковых материалов, модификация поверхностных свойств изделий, дистанционная наплавка и др. В современных технологиях получения нанодисперсных материалов одно из ведущих мест занимает направление, основанное на обработке материалов концентрированными потоками энергии. С использованием различного технологического оборудования (генераторы импульсных токов, ускорители) энергия вводится в вещество в виде сильных импульсных токов [1], потоков плазмы, пучков заряженных частиц. Для каждого из указанных видов воздействия свойственны определенные механизмы раз-

ложения обрабатываемого вещества до микро- и наноразмерного состояния. Так действие сильных импульсных токов основано на термическом испарении расплава проводника с последующей его конденсацией в жидкости [2], использование плазменных потоков и пучков заряженных частиц также предполагает испарение вещества и его конденсацию в вакууме или в специальной атмосфере [3]. Указанные направления использования данных пучков упомянуты в связи с тем, что облучение металлов и сплавов сильноточными релятивистскими электронными пучками (СРЭП) в абляционном режиме сопровождается как выбросом вещества с поверхности [4], так и изменением свойств материала мишени. Известно [5], что свойства мишени модифицируются неравномерно по объему, при этом модифицированная область существ-

венно превосходит пределы проникновения частиц пучка. Фактор неоднородности существенно усиливается при облучении трубчатым пучком. Понимание особенностей изменения состояния мишени при облучении трубчатым СРЭП, а именно: структурно-фазовых превращений, перераспределение элементного состава, микротвердости, представляется важным для создания научных основ новых радиационных нанотехнологий.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве исследуемых образцов нами были использованы две марки коррозионностойких сталей 12Х21Н5Т и 08Х18Н10Т, поскольку их радиационная модификация представляет как практический интерес, так и научный в качестве модельных объектов. Для первой марки с содержанием ~5% Ni и ~21% Cr характерно кроме α и γ фаз еще присутствие σ -фазы (интерметаллида типа FeCr). Для второй марки с содержанием ~10% Ni и ~18% Cr характерна аустенитная структура [6].

Экспериментальные исследования проводились на ускорителе МИГ-1 [7] (в ННЦ “Харьковский физико-технический институт” НАН Украины, г. Харьков) со следующими параметрами: энергия электронов ~0,5 МэВ, ток пучка ≤ 2 кА, длительность импульса порядка 5 мкс. С целью повышения плотности энергии, выделяемой на поверхности мишени, и обеспечения большей неравномерности поля облучения формировался трубчатый электронный пучок. Внешний диаметр пучка составлял порядка 40 мм, толщина стенки пучка – 2 ÷ 3 мм, плотность энергии, выделяемой на поверхности облучаемой мишени в режиме абляции, достигала ~1 кДж/см². Мишени облучались тремя импульсами в вакуумной камере ускорителя при давлении в 10^{-4} ÷ 10^{-5} торр.

Ставилась задача исследования фрактограмм мишеней в области воздействия пучка, проведения металлографических исследований, оценки изменения фазового состава а также микротвердости.

Поверхность и поперечное сечение образцов исследовались с помощью оптического микроскопа МИМ-7, электролитическое тра-

вление произведено в растворе уксусной кислоты. Для фазового анализа образцов был использован рентгеновский дифрактометр ДРОН-3 в излучении λ -Cu с монохроматором на дифрагируемом пучке. Анализ изломов проводился на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-840. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3. Ток пучка на мишени измерялся с применением пояса Роговского и шунта [8].

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При воздействии серии импульсов трубчатого СРЭП на поверхности мишени образовывался кольцевой кратер с донной частью, берегами и наплавами, образовавшимися из-за взрывного выплескивания вещества мишени. Поверхность переплавленного слоя состоит из многочисленных макровыступов.

На рис. 1 и 2 показано поперечное сечение мишени образца стали марки 12Х21Н5Т и 08Х18Н10Т соответственно при одном и том же увеличении. Средняя толщина переплавленного слоя около 15 мкм, структура кото-

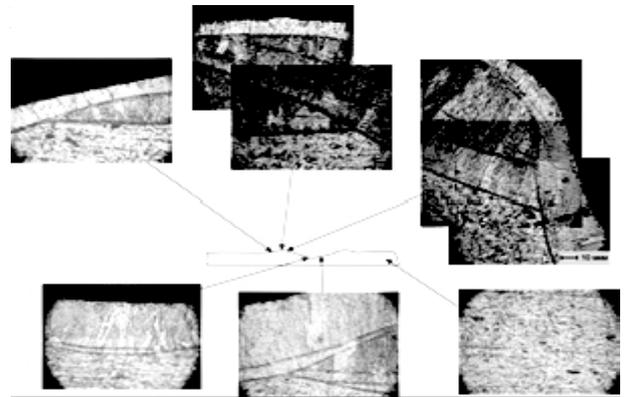


Рис. 1. Панорама шлифа стали марки 12Х21Н5Т.

Существует различие в толщине зоны термического воздействия в зависимости от участка кратера. В зоне берегов кратера и в зоне наплавов, достаточно толстая зона переплава и очень незначительная зона термического воздействия (переходная зона). Для участков донной части, из которых происходил выброс материала, наблюдается достаточно неглубокая зона переплава и намного превышающая ее зона термического воздействия. Это относится к обоим исследованным материалам (рис. 1 и 2). Очевидно, что зона переплава соответствует области максимального погло-

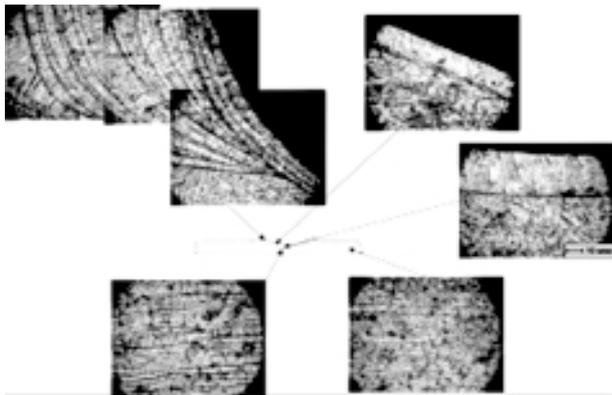


Рис. 2. Панорама шлифа стали марки 08X18Н10Т.

щения энергии пучка, тогда как в соседних областях значение удельной поглощенной энергии было достаточным лишь для иницирования твердофазной рекристаллизации, что и обеспечило наблюдение более обширной области термического влияния. Представляют интерес наблюдаемые полосы, воспроизводящие кривые, которыми очерчиваются границы кратера. Природа возникновения данных полос может заключаться как в наложении зон воздействия от предыдущих импульсов (в данном эксперименте их было всего три, тогда как полос значительно больше), так и в ликвации [9] по границе изолиний значений температуры, соответствующих пределам растворимости легирующих элементов. Нельзя исключать возможность наблюдения последствий электропластического эффекта [10], проявляющегося в динамическом воздействии импульсов тока на вещество мишени.

Поскольку модифицирующее действие электронного пучка на мишень состоит не только в радиационно-термическом механизме, но и в ударно-волновом, влияние которого распространяется глубже зоны термического воздействия, как показано на рис. 3, нами были проведены измерения микротвердости в указанных зонах.

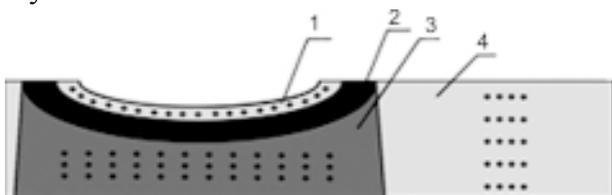


Рис. 3. Схема измерения на поперечном сечении образца (1 – зона плавления; 2 – зона термического воздействия; 3 – зона комплексного воздействия; 4 – не обработанная зона).

Таблица 1

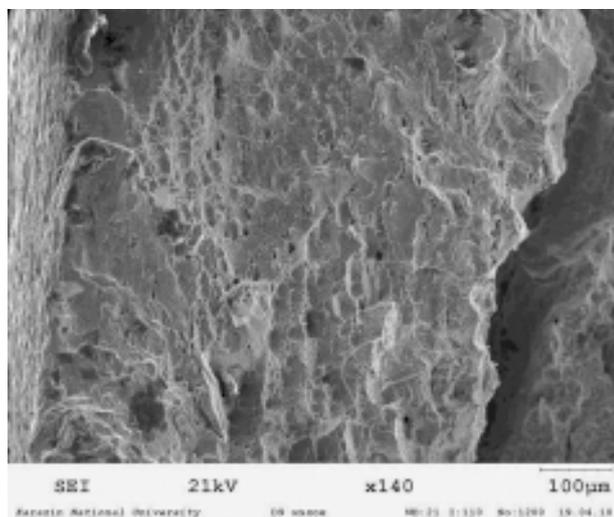
Значения микротвёрдость

Область	Микротвёрдость стали 12Х21Н5Т, МПа	Микротвёрдость стали 08Х18Н10Т, МПа
Зона комплексного воздействия	2530	1900
Зона термического воздействия	3450	2280
Зона плавления	2900	2120
Исходный образец	3200	2200

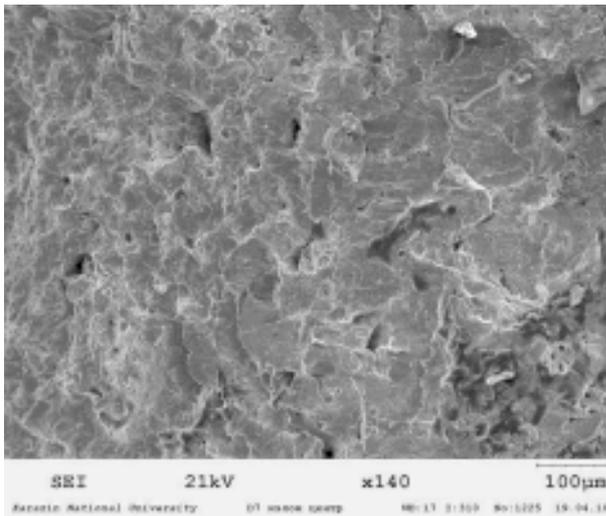
Как видно из табл. 1, незначительно упрочняется зона термического воздействия, тогда как в зоне переплава и в зоне ударно-волнового воздействия микротвердость снижается. Если для зоны переплава это может быть связано с преимущественным испарением легирующих элементов, то для зоны ударно-волнового воздействия можно трактовать, в том числе, и как разупрочнение вследствие движения фронта волны разрежения.

Фрактограммы приведены на рис. 4 и 5. Для получения излома образцы подвергались циклическим нагружениям. Переплавленный слой имеет столбчатую структуру, показывающую, что в нем происходила кристаллизация из расплава. В зоне термического воздействия видны фасетки средним размером 1 мкм, в то время как в исходном образце размер фасеток на порядок больше для обеих марок сталей.

Для выяснения содержания легирующих элементов в переплавленной области нами



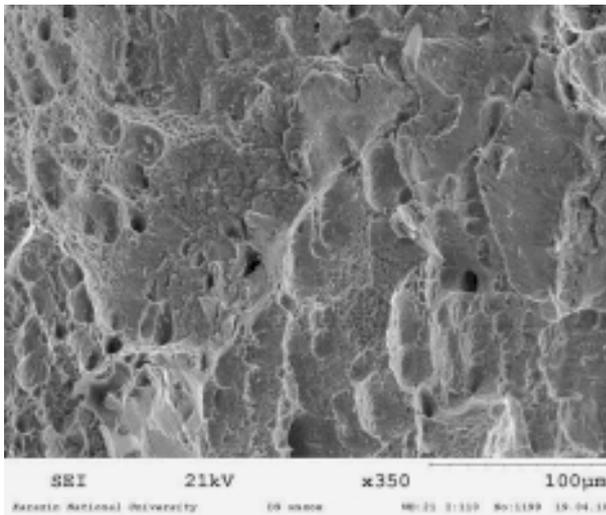
а)



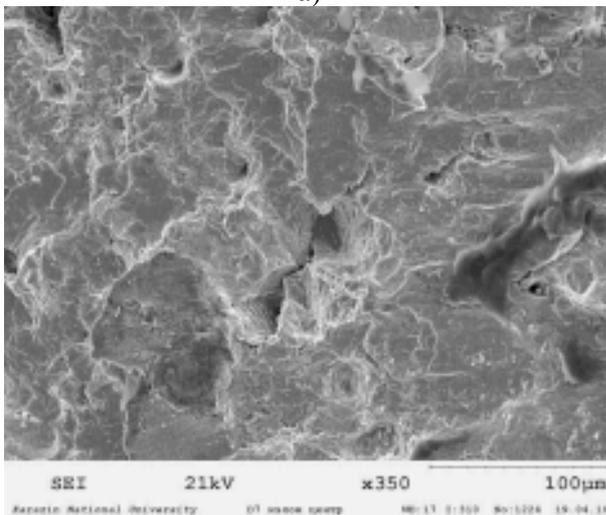
б)

Рис. 4. Излом 12X21H5T: а) – обработанный; б) – необработанный.

был проведен элементный анализ при исследовании шлифов облученных образцов.



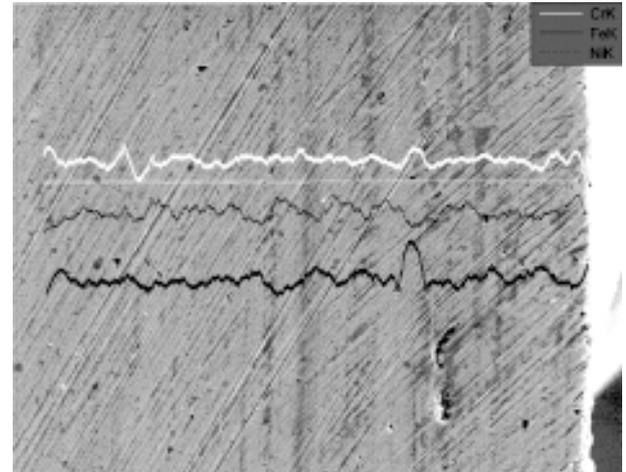
а)



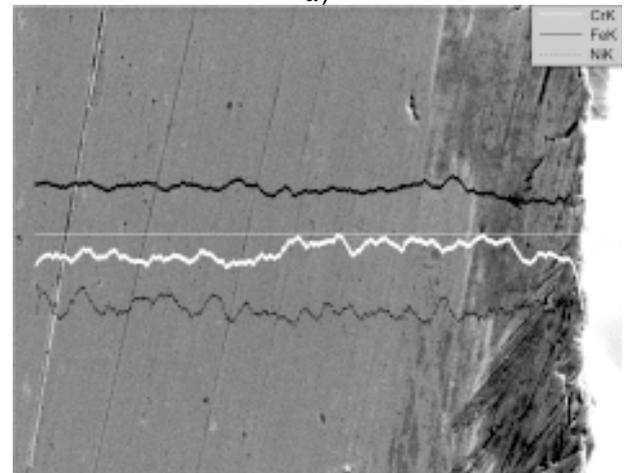
б)

Рис. 5. Излом 08X18H10T: а) – обработанный; б) – необработанный.

Проведенный элементный анализ рис. 6 показывает тенденцию к снижению содержания в приповерхностной области хрома и никеля.



а)



б)

Рис. 6. Изменение элементного состава в обработанной приповерхностной зоне сталей марок 12X21H5T – а) и 08X18H10T – б).

С помощью количественного фазового анализа рис. 7 было установлено что для двух марок сталей в приповерхностном слое толщиной 10-20 микрон присутствуют две фазы (α -Fe и γ -Fe), после облучения образцов уменьшается доля α -Fe (табл. 2), что также подтверждается из рассмотрения микроструктуры приповерхностного слоя в котором наблюдается значительно меньшее количество кристаллитов α -фазы. Фазовый состав переплавленного слоя состоит в основном из аустенита, но так же заметно очень малое количество δ - и α -железа. Для образца 12X21H5T в зоне термического воздействия на выступающих участках образовалась мартенситная структура, четко проявляется игольчатое

строение. Вследствие высоких скоростей охлаждения зоны переплава легирующие примеси вытесняются на фронт кристаллизации.

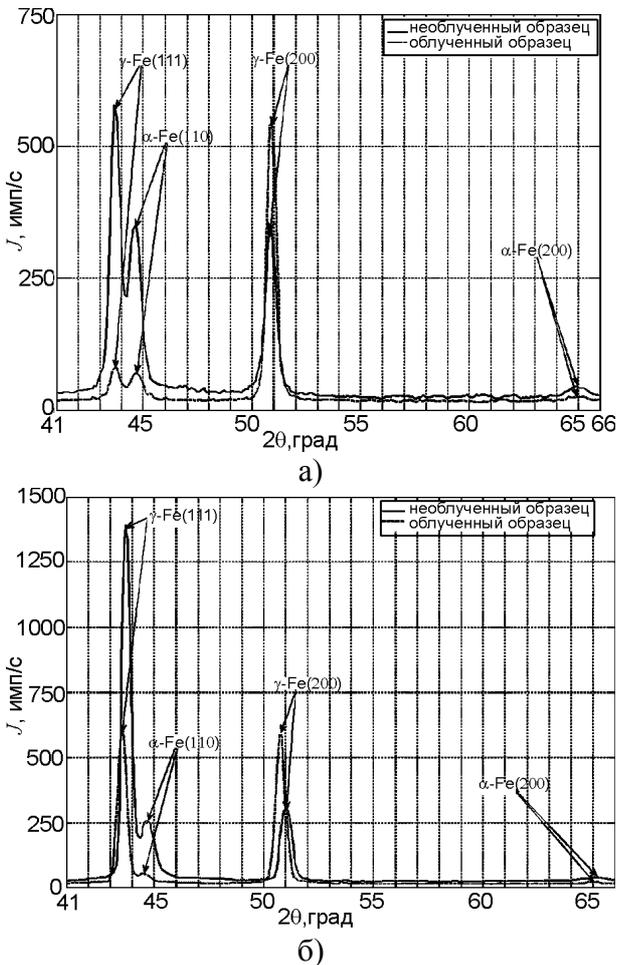


Рис. 7. Дифрактограммы сталей марок 12Х21Н5Т – а) и 08Х18Н10Т – б).

Значения микротвердости в зоне комплексного воздействия ниже, чем значения на той же глубине в необработанном образце наблюдаются для обеих марок стали.

Таблица 2

Количественный фазовый анализ с учетом текстурированности образца

Марка	Необработанный образец		Обработанный образец	
	Аустенит, %	Феррит, %	Аустенит, %	Феррит, %
12Х21Н5Т	85	15	93	7
08Х18Н10Т	87	13	97	3

Поскольку импульсный ток электронного пучка, проходящий через мишень, имеет амплитудное значение порядка 1,5 кА (осциллограмма тока пучка представлена на

рис. 8.), то еще одним из возможных факторов влияющих на структурно-фазовые превращения является упоминаемый выше электропластический эффект сопровождающий распространение деформационных (ударных) волн в материале мишени. Вследствие названного эффекта происходит, по-видимому, торможение γ - α превращения, причиной которого является повышение пластичности аустенита [11]. Последним фактом также может объясняться значения микротвердости в зоне комплексного воздействия.

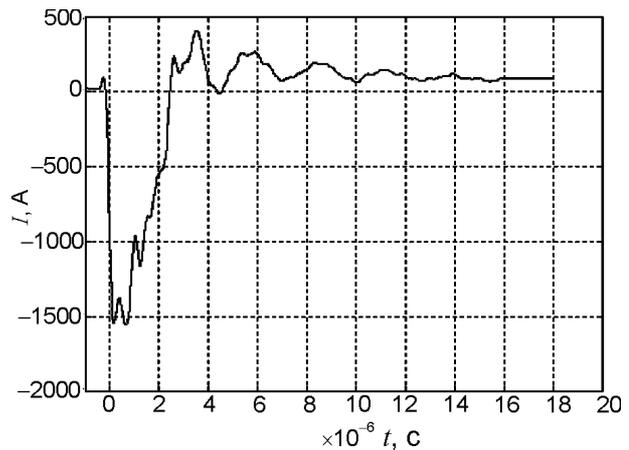


Рис. 8. Осциллограмма тока СРЭП на мишени.

ВЫВОДЫ

Воздействие трубчатого сильноточного релятивистского электронного пучка на нержавеющие стали в режиме абляции приводит к обеднению поверхностного слоя легирующими элементами, формированию структур приповерхностного слоя (мартенситных) с повышенной микротвёрдостью, а так же влияет на механизм и кинетику γ - α превращения. В зоне термического воздействия пучка, прилегающей к области переплава наблюдаются полосы ликвации, направления которых соответствуют расположению изотемпературных линий.

ЛИТЕРАТУРА

- Доровской В.М., Елесин Л.А., Столяров В.Л., Стеблевский А.В., Уруцкоев Л.И., Филиппов Д.В. Исследование продуктов электровзрыва титановых фольг с помощью электронного микроскопа// Прикладная физика. – 2006. – № 4. – С. 28-34.
- Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971.

3. Muller G., Schultheiss C. Deposition means of pulsed electron beam ablation//Proc. Beams. – 1994. – Vol. II. – P. 833-836.
 4. Донец С.Е., Кившик В.Ф., Клепиков В.Ф., Литвиненко В.В., Пономарев А.Г., Уваров В.Т. Абляция медных мишеней при облучении сильноточным трубчатым пучком релятивистских электронов// Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 2. – С. 8-12.
 5. Базалеев Н.И., Донец С.Е., Клепиков В.Ф. и др. Особенности формирования зоны радиационного воздействия релятивистского пучка электронов в цилиндрическо-коаксиальном диоде//Тезисы 7-ой Межд. конф. Физические явления в твердых телах. – Харьков. – 2005. – С. 126.
 6. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986.
 7. Уваров В.Т., Ткач Ю.В., Гадецкий Н.П., Скачек Г.В., Пономарев А.Г., Кившик В.Ф., Гапоненко Н.И., Козачек А.С., Прасол Е.А. Получение сильноточных пучков микросекундной длительности с высоким к.п.д. Препринт ХФТИ 84-30. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. – 13 с.
 8. Донец С.Е., Леденев В.В., Литвиненко В.В. Стержневой шунт для измерения сильных токов с фронтами микросекундной длительности//Вестник НТУ ХПИ.//Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2008. – № 44. – С. 39-44.
 9. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов/Пер. с англ. – М.: 1967.
 10. Каганов М.И., Кравченко В.Я., Нацик В.Д. Электронное торможение дислокаций в металлах//Успехи физических наук. – 1973. – Т. 111, Вып. 4. – С. 655-682.
 11. Спицын В.И., Троцкий О.А., Электропластическая деформация металлов. – М.: Наука, 1985.
- LITERATURA**
1. Dorovskoy V.M., Yelesin L.A., Stolyarov V.L., Steblevskiy A.V., Urutskoyev L.I., Filippov D.V. Issledovaniye produktov elektrovzryva titanovykh folg s pomoshchyu elektronnoy mikroskopii//Prikladnaya fizika.– 2006.– № 4.– S. 28-34.
 2. Naugolnykh K.A., Roy N.A. Elektricheskiye razryady v vode. – М.: Nauka, 1971.
 3. Muller G., Schultheiss C. Deposition means of pulsed electron beam ablation//Proc. Beams. – 1994. – Vol. II. – P. 833-836.
 4. Donets S.E., Kivshik V.F., Klepikov V.F., Litvinenko V.V., Ponomarev A.G., Uvarov V.T. Abyatsiya mednykh misheney pri obluchenii silnotochnym trubchatym puchkom relyativistskikh elektronov// Fizika i khimiya obrabotki materialov. – 2011. – № 2. – S. 8-12.
 5. Bazaleyev N.I., Donets S.E., Klepikov V.F. i dr. Osobennosti formirovaniya zony radiatsionnogo vozdeystviya relyativistskogo puchka elektronov v tsilindrichesko-koaksialnom diode//Tezisy 7^{oy} Mezhd. konf. Fizicheskiye yavleniya v tverdykh telakh. – Kharkov. – 2005. – S. 126.
 6. Gulyayev A.P. Metallovedeniye. – М.: Metallurgiya, 1986.
 7. Uvarov V.T., Tkach Yu.V., Gadetskiy N.P., Skachek G.V., Ponomarev A.G., Kivshik V.F., Gaponenko N.I., Kozachek A.S., Prasol Ye.A. Polucheniye silnotochnykh puchkov mikrosekundnoy dlitelnosti s vysokim k.p.d. Preprint KhFTI 84-30. – М.: TsNIIatominform, 1984. – 13 s.
 8. Donets S.E., Ledenev V.V., Litvinenko V.V. Sterzhnevoy shunt dlya izmereniya silnykh tokov s frontami mikrosekundnoy dlitelnosti//Vestnik NTU KhPI.//Tekhnika i elektrofizika visokikh napryazheniy. – 2008. – № 44. – S. 39-44.
 9. Vayngard U. Vvedeniye v fiziku kristallizatsii metallov/Per. s angl. – М.: 1967.
 10. Kaganov M.I., Kravchenko V.Ya., Natsik V.D. Elektronnoye tormozheniye dislokatsiy v metallakh//Uspekhi fizicheskikh nauk. – 1973. – Т. 111, Vyp. 4. – S. 655-682.
 11. Spitsyn V.I., Trotskiy O.A., Elektroplasticheskaya deformatsiya metallov. – М.: Nauka, 1985.