

## ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ НАГРУЗОК, СОЗДАВАЕМЫХ В УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

И.В. Боровицкая<sup>1)</sup>, В.Н. Пименов<sup>1)</sup>, С.А. Масляев<sup>1)</sup>, Г.Г. Бондаренко<sup>2)</sup>,  
М. Падух<sup>3)</sup>, Е.В. Матвеев<sup>4)</sup>, А.Б. Михайлова<sup>1)</sup>, А.И. Гайдар<sup>4)</sup>,  
А.С. Демин<sup>1)</sup>, Н.А. Епифанов<sup>1), 2)</sup>, Е.В. Морозов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Ленинский пр. 49,  
119334 Москва, Россия, [symp@imet.ac.ru](mailto:symp@imet.ac.ru), [pimval@mail.ru](mailto:pimval@mail.ru), [maslyaev@mail.ru](mailto:maslyaev@mail.ru),  
[sasham1@mail.ru](mailto:sasham1@mail.ru), [casha@bk.ru](mailto:casha@bk.ru), [mophix94@gmail.com](mailto:mophix94@gmail.com), [lieutenant@list.ru](mailto:lieutenant@list.ru)

<sup>2)</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
ул. Мясницкая 20, 101000 Москва, Россия, [gbondarenko@hse.ru](mailto:gbondarenko@hse.ru)

<sup>3)</sup>Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза,  
01-497 Варшава, Польша, [marian.paduch@ifpilm.pl](mailto:marian.paduch@ifpilm.pl)

<sup>4)</sup>Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий,  
ул. Малая Пионерская 12, 115054 Москва, Россия, [niipmt@mail.ru](mailto:niipmt@mail.ru)

В работе представлены результаты исследования влияния облучения на установке Плазменный фокус (ПФ) на механические свойства (микротвердость, модуль Юнга) и текстуру поверхности сплавов Cu - 10 ат% Ga и Cu - 10 ат% Ga – 4 ат% Ni. Установки данного типа могут быть использованы для оценки стойкости материалов к радиационно-термическим и ударно-волновым нагрузкам, которым они будут подвергаться в условиях эксплуатации в реакторах термоядерного синтеза. В проведенных экспериментах на исследуемые образцы воздействовала импульсная (длительность импульса ~50 нс) дейтериевая плазма с плотностью потока от  $10^7$  до  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> и ионы дейтерия при плотности потока от  $10^8$  до  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup>, которые помимо прочего, создавали в образцах ударные волны.

Было обнаружено снижение микротвердости поверхностных слоев сплавов после облучения, в отличие от результатов ранее проведенных экспериментов по облучению на установке ПФ ванадия и титана азотной плазмой. Показано, что данный эффект обусловлен термическим воздействием плазмы, поскольку состав поверхностных слоев меняется незначительно. Существенного изменения модуля Юнга в поверхностных слоях медных сплавов при данных режимах облучения не происходит. Методом рентгеноструктурного анализа зафиксировано изменение текстуры поверхностных слоев. В случае формирования в поверхностном слое острой текстуры <111>, являющейся плоскостью скольжения в ГЦК-металлах, происходит интенсивное пластическое течение под действием термомеханических напряжений с формированием «блочной» микроструктуры, где блоки образованы сеткой линий скольжения.

**Ключевые слова:** медные сплавы; Плазменный фокус; микротвердость; модуль Юнга; текстура.

## CHANGES IN THE MECHANICAL PROPERTIES AND SURFACE TEXTURE OF COPPER-BASED ALLOYS UNDER THE INFLUENCE OF PULSE RADIATION-THERMAL AND SHOCK-WAVE LOADS CREATED IN THE PLASMA FOCUS INSTALLATION

I.V. Borovitskaya<sup>1)</sup>, V.N. Pimenov<sup>1)</sup>, S.A. Maslyaev<sup>1)</sup>, G.G. Bondarenko<sup>2)</sup>,  
M. Paduch<sup>3)</sup>, E.V. Matveev<sup>4)</sup>, A.B. Mikhailova<sup>1)</sup>, A.I. Gaidar<sup>4)</sup>,  
A.S. Demin<sup>1)</sup>, N.A. Epifanov<sup>1), 2)</sup>, E.V. Morozov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>A.A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science RAS, 49 Leninsky Ave.,  
119334 Moscow, Russia, [pimval@mail.ru](mailto:pimval@mail.ru), [symp@imet.ac.ru](mailto:symp@imet.ac.ru), [casha@bk.ru](mailto:casha@bk.ru),  
[mophix94@gmail.com](mailto:mophix94@gmail.com), [maslyaev@mail.ru](mailto:maslyaev@mail.ru), [lieutenant@list.ru](mailto:lieutenant@list.ru), [porfirievna@mail.ru](mailto:porfirievna@mail.ru)

<sup>2)</sup>National Research University «Higher School of Economics», 20 Myasnitskaya Str.,

101000 Moscow, Russia, [gbondarenko@hse.ru](mailto:gbondarenko@hse.ru)

<sup>3</sup>Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion,  
01-497 Warsaw, Poland, [marian.paduch@ifpilm.pl](mailto:marian.paduch@ifpilm.pl)

<sup>4</sup>Research Institute of Advanced Materials and Technologies,  
12 Malaya Pionerskaya Str., 115054 Moscow, Russia, [niipmt@mail.ru](mailto:niipmt@mail.ru)

The paper presents the results of a study of the effect of irradiation at the Plasma Focus (PF) facility on the mechanical properties (microhardness, Young's modulus) and surface texture of Cu - 10 at% Ga and Cu - 10 at% Ga - 4 at% Ni alloys. Installations of this type can be used to assess the resistance of materials to radiation-thermal and shock-wave loads to which they will be subjected under operating conditions in fusion reactors. In the experiments, the samples were exposed to pulsed (pulse duration ~50 ns) deuterium plasma with a flux density of  $10^7$  to  $10^9$  W/cm<sup>2</sup> and deuterium ions with a flux density of  $10^8$  to  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>, which, among other things, created shock waves in the samples.

A decrease in the microhardness of the surface layers of the alloys after irradiation was found, in contrast to the results of earlier experiments on irradiation of vanadium and titanium with nitrogen plasma at the PF facility. It is shown that this effect is due to the thermal effect of the plasma, since the composition of the surface layers changes slightly. There is no significant change in the Young's modulus in the surface layers of copper alloys under these irradiation conditions. The change in the texture of the surface layers was recorded by X-ray diffraction analysis. In the case of the formation of a sharp texture <111> in the surface layer, which is the sliding plane in FCC metals, an intense plastic flow occurs under the action of thermomechanical stresses with the formation of a "block" microstructure, where the blocks are formed by a grid of sliding lines.

**Keywords:** copper alloys; Plasma focus; microhardness; Young's modulus; texture.

## Введение

Сплавы на основе меди находят широкое применение в различных областях техники благодаря сочетанию высокой электро- и теплопроводности, пластичности, прочности, технологичности. В том числе, они могут быть использованы и в установках термоядерного синтеза, где будут подвергаться импульсным ударно-волновым и радиационно-термическим нагрузкам, что делает актуальной оценку их стойкости к различным повреждениям в этих жестких условиях. Перспективным методом такой оценки является облучение в установке Плазменный фокус (ПФ), где материал-мишень подвергается комплексному воздействию импульсной высоко-температурной плазмы, потоков быстрых ионов и электронов, рентгеновского излучения и ударных волн. В данной работе представлены результаты исследования изменения текстуры, микротвердости и модуля Юнга в поверхностных слоях сплавов Cu - 10 at% Ga и Cu - 10 at% Ga - 4 at% Ni под воздействием указанных выше импульсных нагрузок, создаваемых в установке Плазменный фокус с энергетическим запасом 600 кДж.

## Методика проведения эксперимента

Исследуемые сплавы состава Cu - 10 at% Ga и Cu - 10 at% Ga - 4 at% Ni были получены выплавкой в вакуумной печи в графитовых тиглях. Содержание легирующих элементов выбиралось в пределах их растворимости в меди. Образцы для исследований имели форму таблеток диаметром 9 мм и толщиной 2 мм. Облучение образцов проводили на установке Плазменный фокус PF-1000 (Польша) с энергетическим запасом 600 кДж. В качестве рабочего газа использовался дейтерий при давлении в камере  $P=470$  Па. Длительность импульса плазмы ~50 нс. Было проведено две серии экспериментов, в процессе которых образцы располагались в катодной части установки ПФ и были закреплены либо на переднем или заднем торце стальной трубы (рис. 1а), либо на барабане-держателе перед анодом (рис. 1б). В результате изменения расстояния от анода до образца, а также смещения образцов от оси установки, можно было варьировать плотность потока дейтериевой плазмы (ДП) и ионов дейтерия (ИД), которые воздействовали на образец. При этом, на образец, закрепленный на заднем

конце стальной трубы, воздействовала только дейтериевая плазма, поскольку поток быстрых ионов дейтерия экранировался стенкой трубы. Параметры облучения образцов приведены в табл. 1.

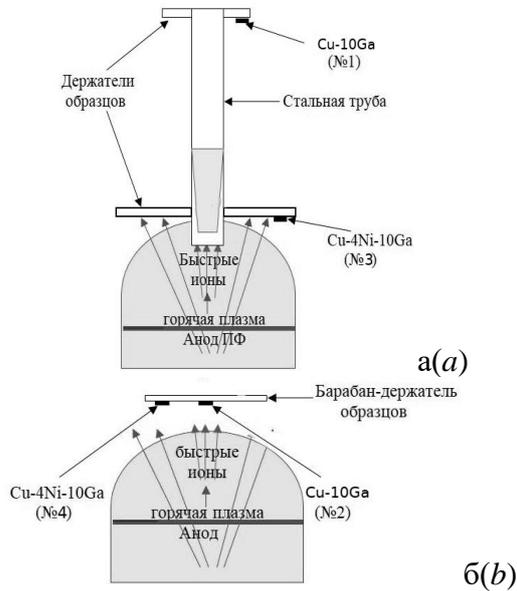


Рис.1. Схема облучения образцов в установке ПФ  
Fig.1. Scheme of irradiation of samples in the PF

Таблица 1. Параметры облучения образцов сплавов в установке ПФ

Tabl.1. Parameters of irradiation of alloy samples in the PF installation

Состав сплава	№	L, см	$q_{пл}$ , Вт/см <sup>2</sup>	$q_n$ , Вт/см <sup>2</sup>	n
Cu-10Ga	1	40	$10^7$	—	4
	2	12	$10^9$	$10^{11}$	9
Cu-10Ga-4Ni	3	15	$5 \cdot 10^7 - 10^8$	$10^8 - 10^9$	4
	4	12	$10^8 - 10^9$	$10^9 - 10^{10}$	5

L – расстояние от образца до анода установки;  $q_{пл}$  – плотность потока плазмы;  $q_n$  – плотность потока ионов  $D^+$ ; n – число импульсных воздействий

После эксперимента образцы исследовали в растровом электронном микроскопе EVO 40 фирмы Zeiss, оснащенный приставкой для рентгеноспектрального анализа. Для рентгеноструктурных исследований использовали рентгеновский дифрактометр “Ultima IV” фирмы “Rigaku” (Япония). Измерения микротвердости проводили на микротвердометре Shimadzu DUH-211S (Япония) с использованием алмазного индентора Виккерса (угол между гранями 136°). Микротвердость

определяли двумя методами: методом инструментального (кинетического) индентирования ( $H_{it}$ ,  $HV^*$ ) и методом восстановленного отпечатка ( $HV$ ) при нагрузке  $F_{max} = 50$  мН (5.01 г) и времени выдержки 5 с. Метод инструментального (кинетического) индентирования основан на непрерывной записи диаграммы зависимости нагрузки  $F$ , Н от глубины внедрения  $h$ , мм индентора в испытуемый материал и программном расчете на основе этих данных твердости индентирования  $H_{it}$ , МПа и «приведенной» микротвердости по Виккерсу  $HV^*$  по формуле  $HV^* = 0.0945H_{it}$ , кгс/мм<sup>2</sup> (единицы по шкале Виккерса). В случае кинетического индентирования твердость рассчитывается как отношение нагрузки к площади поверхности невосстановленного отпечатка, выраженной через его глубину, а для расчета твердости по восстановленному отпечатку  $HV$  использовалась формула  $HV = F_{max}/S = 1,854F_{max}/d^2$ ,  $S$  – площадь боковой поверхности полученного отпечатка,  $d$  – среднее арифметическое длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки. Кроме того, по результатам инструментального индентирования был определен модуль Юнга  $E_{it}$  сплавов до и после облучения на ПФ. Вычисления  $E_{it}$  велись с использованием модуля *DUNA-analysis*, основываясь на анализе начальной стадии участка разгрузки, когда деформация имеет чисто упругий характер.

## Результаты и их обсуждение

Результаты измерений микротвердости, выполненных двумя способами – по восстановленному отпечатку ( $HV$ ) и методом кинетического индентирования ( $HV^*$ ), представлены в табл. 2. Из анализа приведенных данных можно отметить следующее. Во-первых, видна общая тенденция снижения микротвердости после облучения на ПФ. Это могло бы быть связано с испарением легирующих элементов из поверхностного слоя, однако результаты рентгеноспектрального анализа показали, что значимого (превышающего погреш-

ность измерения) снижения его концентрации в поверхностном слое не происходит. Следовательно, вероятной причиной является термическое воздействие плазмы и быстрых ионов. Следует отметить, что при обработке ряда других материалов на ПФ, например, ванадия [1] или титанового сплава [2] при использовании азота в качестве рабочего газа, происходит упрочнение поверхности, что коррелирует с измельчением блоков ОКР (области когерентного рассеяния), ростом величины микродеформации решетки и образованием нитридов. Таким образом, результат воздействия на прочностные свойства поверхности зависит от конкретных условий облучения на ПФ и самого материала-мишени.

Таблица 2. Результаты измерений твердости  $HV$  и  $HV^*$  и модуля Юнга  $E$  сплавов в исходном состоянии и после облучения на установке ПФ по разным режимам

Tabl. 2. Results of measurements of the hardness  $HV$  and  $HV^*$  and Young's modulus  $E$  of alloys in the initial state and after irradiation at the PF facility under different modes

Сплав	№	$HV$ , кг/мм <sup>2</sup>	$HV^*$ , кг/мм <sup>2</sup>	$E$ , МПа
Cu-10Ga	Исходный	139.3	218.4	112533
	1	101.5	127.0	96493
	2	130.9	147.4	97017
Cu-10Ga-4Ni	Исходный	142.6	209.6	116933
	3	104.7	132.0	113967
	4	107.3	139.0	115633

Второе, что можно отметить – значения кинетической твердости выше, чем микротвердости, определяемой по восстановленному отпечатку, хотя, казалось бы, восстановленный отпечаток имеет меньший размер и соответственно значения микротвердости должны быть выше. Анализируя литературные данные (например, [3]), этот эффект можно объяснить спецификой определения площади отпечатка при кинетическом индентировании – по глубине лунки до и после разгрузки, когда она в одном случае оказывается завышенной, а в другом – заниженной; кроме того, при расчете используются усред-

ненные корреляционные зависимости, а не зависимости, построенные индивидуально для каждого материала.

Параллельно с измерением микротвердости были определены значения модуля Юнга в поверхностных слоях сплавов (табл. 2). Очевидно, что в случае существенной разницы в модулях упругости облученного поверхностного слоя и кристаллической подложки, на границе их раздела возникнут сильные растягивающие и сжимающие нормальные напряжения и вызванные ими деформации. Результаты, представленные в табл. 2 показывают, что модуль меняется незначительно: обработка на ПФ несколько снижает модуль упругости в образцах сплава Cu-10Ga (не более 13%) и практически не меняет его в образцах сплава Cu-10Ga-4Ni.

Рентгеноструктурные исследования показали изменение кристаллической текстуры в поверхностных слоях образцов. Скорее всего, причина формирования текстуры – направленный теплоотвод при кристаллизации оплавленного поверхностного слоя. Наиболее существенные изменения происходят в образце сплава Cu-10Ga-4Ni (образец № 3), в котором в результате облучения формируется острая текстура  $\langle 111 \rangle$  (рис. 2).

Характерно, что в этом же образце наблюдаются и наиболее существенные изменения в микроструктуре, выраженные в формировании «блочной» структуры, где блоки образованы сеткой линий скольжения (рис. 3). Столь интенсивное пластическое течение в данном образце обусловлено формированием благоприятной текстуры – она совпадает с плоскостью скольжения в металлах с ГЦК-решеткой, к которым относится медь (плоскость  $\langle 111 \rangle$ ). Блочная микроструктура в образцах, облученных импульсной высокотемпературной плазмой, наблюдалась также в ванадии, вольфраме и ряде других металлов, но образована она была ориентированно расположенными трещинами, а не линиями скольжения.

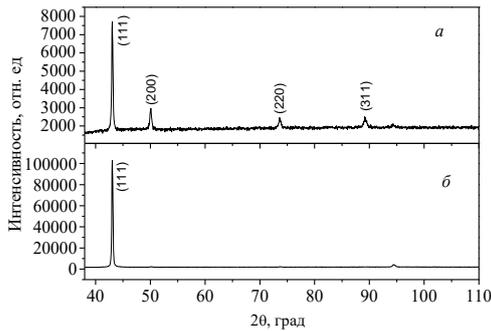


Рис. 2. Рентгенограммы образца сплава Cu-10Ga-4Ni в исходном состоянии (а) и после облучения на установке Плазменный фокус по режиму  $q_{пл}=10^7-10^8 \text{Вт/см}^2$ ,  $q_{и,} = 10^8-10^9 \text{Вт/см}^2$ ,  $n=4$ ,  $L=15 \text{ см}$  (б)

Fig. 2. X-ray images of the Cu-10Ga-4Ni alloy sample in the initial state (a) and after irradiation at the Plasma Focus unit according to the mode  $q_{pl}=10^7-10^8 \text{W/cm}^2$ ,  $q_{i,} = 10^8-10^9 \text{W/cm}^2$ ,  $n=4$ ,  $L=15 \text{ cm}$  (b)

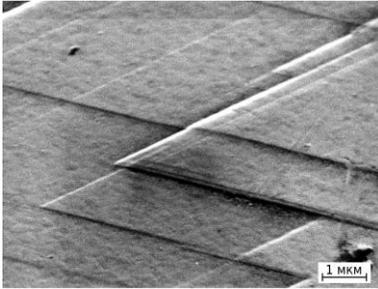


Рис. 3. Микроструктура образца сплава Cu-10Ga-4Ni после облучения на установке Плазменный фокус по режиму  $q_{пл}=10^7-10^8 \text{Вт/см}^2$ ,  $q_{и,} = 10^8-10^9 \text{Вт/см}^2$ ,  $n=4$ ,  $L=15 \text{ см}$

Fig. 3. Microstructure of the Cu-10Ga-4Ni alloy sample after irradiation at the Plasma Focus unit according to the  $q_{pl}=10^7-10^8 \text{W/cm}^2$ ,  $q_{i,}=10^8-10^9 \text{W/cm}^2$ ,  $n=4$ ,  $L=15 \text{ cm}$

### Заключение

Проведенные исследования изменений механических свойств поверхности медных сплавов Cu-10Ga и Cu-10Ga-4Ni показали, что при реализованных режимах облучения на установке ПФ происходит снижение микротвердости в поверхностных слоях, обусловленное термическим воздействием плазмы. Значительных изменений модуля упругости в поверхностных слоях медных сплавов при данных режимах облучения не зафиксировано. Методом рентгеноструктурного анализа обнаружено изменение текстуры поверхностных слоев. В случае формирования в

поверхностном слое острой текстуры  $\langle 111 \rangle$ , являющейся плоскостью скольжения в ГЦК-металлах, происходит интенсивное пластическое течение под действием термомеханических напряжений с формированием «блочной» микроструктуры, где блоки образованы сеткой линий скольжения.

Работа выполнена по государственному заданию № 075-00328-21-00.

### Библиографические ссылки

1. Боровицкая И.В., Никулин В.Я., Бондаренко Г.Г., Михайлова А.Б., Силин П.В., Гайдар А.И. и др. Воздействие импульсных потоков азотной плазмы и ионов азота на структуру и механические свойства ванадия. *Металлы* 2018; (2): 54-64.
2. Пименов В.Н., Рошупкин В.В., Масляев С.А., Демина Е.В., Ляховицкий М.М., Грибков В.А. и др. Поверхностные эффекты при воздействии импульсных потоков ионов азота и азотной плазмы на сплав системы Ti-Al. *Перспективные материалы* 2011; (4): 77-85.
3. Воробьев Р.А., Литовченко В.Н., Дубинский В.Н. Исследование твердости и модуля упругости феррита методом кинетического индентирования. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов* 2016; (5): 82: 55-60.

### References

1. Borovitskaya I.V., Nikulin V.Ya., Bondarenko G.G., Mikhaylova A.B., Silin P.V., Gaydar A.I. et al. Vozdeystvie impul'snykh potokov azotnoy plazmy i ionov azota na strukturu i mekhanicheskie svoystva vanadiya. [Effect of Pulsed Nitrogen Plasma and Nitrogen Ion Fluxes on the Structure and Mechanical Properties of Vanadium]. *Metally* 2018; (2): 54-64.
2. Pimenov V.N., Roshchupkin V.V., Maslyaev S.A., Demina E.V., Lyakhovitskiy M.M., Gribkov V.A. et al. Poverkhnostnye efekty pri vozdeystvii impul'snykh potokov ionov azota i azotnoy plazmy na splav sistemy Ti - Al. [Surface effects under the action of pulsed fluxes of nitrogen ions and nitrogen plasma on an alloy of the Ti - Al system]. *Perspektivnye materialy* 2011; (4): 77-85.
3. Vorob'ev R.A., Litovchenko V.N., Dubinskiy V.N. Issledovanie tverdosti i modulya uprugosti ferrita metodom kineticheskogo inden-tirovaniya. [Investigation of the hardness and elastic modulus of ferrite by kinetic indentation]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* 2016; (5): 82: 55-60.