

**CONTROL OF THE ELECTRON BEAM CURRENT DURING THE PULSE  
FOR ALLOYING THE SURFACE OF STAINLESS STEEL  
WITH TITANIUM AND ALUMINUM**

*Dmitry Alekseevich Shpanov<sup>a</sup>, Pavel Vladimirovich Moskvин, Elizaveta Alekseevna Petrikova,  
Yurii Fedorovich Ivanov, Maxim Sergeevich Vorobyov*

Institute of High-Current Electronics SB RAS, 2/3 Akademicheskii pr., 634055, Tomsk, Russia

<sup>a</sup> das138@tpu.ru

**ABSTRACT**

By irradiating the “film (Ti) / film (Al) / (12H18N10T/ AISI 304) substrate” system with a low (up to 25 keV) electron beam modulated during a pulse of up to 1 ms, the surface wear rate was reduced by  $\approx 1300$  times with a constant high (0.61–0.73) dry friction coefficient and a slight change in surface microhardness. The application of Ti and Al films with a thickness of 5  $\mu\text{m}$  was carried out by the method of electric arc plasma-assisted spraying. The irradiation of the samples was performed by an electron source with an arc plasma cathode. The exposure modes were selected based on the results of numerical modeling in Comsol Multiphysics to ensure the fastest heating of the sample to the required temperatures and the retention of this temperature for a specified time. Electron beam alloying of the 12H18N10T steel with titanium and aluminum has not been previously studied. The methods of X-ray diffraction analysis, scanning and transmission diffraction electron microscopy were used to study the elemental and phase composition, the state of the defective substructure of samples irradiated with an electron beam in the identified optimal mode. The regularities of evolution of the defective substructure, phase and elemental composition, microhardness, wear resistance and friction coefficient of the “film (Ti) / film (Al) / (12H18N10T) substrate” system subjected to electron beam treatment have been revealed. Possible applications of this type of processing of steel parts for agriculture and mechanical engineering are indicated.

**KEYWORDS**

Electron beam; steel 12H18N10T / AISI 304; alloying; surface modification; ultra-high-speed crystallization; plasma cathode.

**УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА  
В ТЕЧЕНИЕ ИМПУЛЬСА ДЛЯ ЛЕГИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ  
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ТИТАНОМ И АЛЮМИНИЕМ**

*Дмитрий Алексеевич Шпанов<sup>a</sup>, Павел Владимирович Москвин,  
Елизавета Алексеевна Петрикова, Юрий Фёдорович Иванов, Максим Сергеевич Воробьёв*

Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

<sup>a</sup> das138@tpu.ru

## АННОТАЦИЯ

Путем облучения системы «пленка (Ti) / пленка (Al) / (12X18H10T/ AISI 304) подложка» модулированным в течение импульса (до 1 мс) электронным пучком низкой (до 25 кэВ) энергии снижена скорость износа поверхности в  $\approx 1300$  раз при постоянном высоком (0,6–0,73) коэффициенте сухого трения и слабом изменении микротвердости поверхности. Нанесение пленок Ti и Al толщиной 5 мкм проведено методом электродугового плазменно-ассистированного распыления. Облучение образцов выполнено источником электронов с плазменным катодом. Режимы облучения выбраны по результатам численного моделирования пучка в Comsol Multiphysics для обеспечения наиболее быстрого нагрева образца до требуемых температур и удержания этой температуры в течение заданного времени. Электронно-пучкового легирования стали 12X18H10T титаном и алюминием ранее не исследовалось. Методами рентгеноструктурного анализа, сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии осуществлены исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры образцов, облученных электронным пучком в выявленном оптимальном режиме. Выявлены закономерности эволюции дефектной субструктуры, фазового и элементного состава, микротвердости, износостойкости и коэффициента трения системы «пленка (Ti) / пленка (Al) / (12X18H10T) подложка», подвергнутой электронно-пучковой обработке. Указаны возможные области применения данного вида обработки стальных деталей для сельского хозяйства и машиностроения.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электронный пучок; сталь 12X18H10T/ AISI 304; легирование; модификация поверхности; сверхскоростная кристаллизация; плазменный катод.

### Введение

Аустенитные стали, в том числе нержавеющая сталь 12X18H10T, широко распространены в промышленности благодаря хорошим механическим свойствам в сочетании с высокой коррозионной стойкостью. Однако стали данного класса, как правило, имеют низкую износостойкость. Наиболее дешевым и технологичным способом повышения триботехнических свойств деталей узлов трения является упрочнение поверхности трения [1, 2], например, путем сверхбыстрой закалки из расплава Ti и Al в поверхностном слое стали с образованием твердых интерметаллидов. Электронно-пучковое легирование лидирует над другими способами ввода энергии в поверхность образца [3, 4] по КПД до 90%, вследствие малого отражения электронов, по контролю и однородности теплового потока [3] и неоднократно применялось для улучшения механических свойств металлов и сплавов [4, 5], в том числе много-

слойных [6], а также керамики [7]. Так как используются электроны с энергией менее 30 кэВ, тормозной рентген от взаимодействия пучка электронов с образцом полностью экранируется стенками камеры.

Целью настоящей работы является анализ структуры и трибологических свойств поверхности стали 12X18H10T, модифицированной путем воздействия на систему «пленка (Ti) / пленка (Al) / (12X18H10T) подложка» импульсным пучком электронов.

### 1. Методика исследований

Испытуемым материалом послужила нержавеющая сталь 12X18H10T (AISI 304) ( $\leq 0,08$  C,  $\leq 0,08$  Si,  $\leq 2$  Mn, 8,0–11,0 Ni, 17,5–20,0 Cr,  $\leq 0,045$  P,  $\leq 0,03$  S,  $\leq 1,0$  Cu и остаток Fe, масс.%). Образцы размерами 15×15×5 мм были сначала покрыты пленкой Al толщиной 5 мкм, а затем пленкой Ti толщиной 5 мкм методом плазменно-дугового напыления на вакуумной ионно-плазменной установке

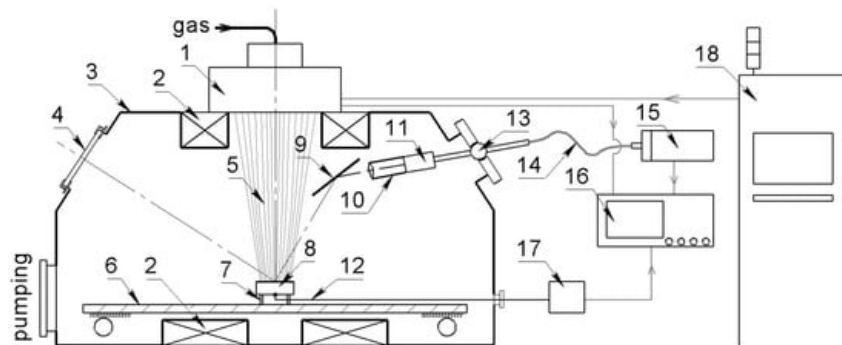
QUINTA [8]. В составе комплекса UNIKUUM она входит в перечень уникальных научных установок России [9] и предоставляет возможность обрабатывать объекты длиной до 40 см и весом до 1 кг для предварительной очистки поверхности и нагрева в аргоновой плазме, а также для ионно-плазменного асистирирования при вакуумно-дуговом осаждении, что повышает адгезию покрытия с подложкой и стабильность вакуумной дуги.

Система «пленка (Ti) / пленка (Al) / (12X18H10T) подложка» облучалась электронным пучком на установке SOLO (рис. 1) (также входит в состав комплекса UNIKUUM), источник электронов которой позволяет генерировать пучки диаметром до 5 см, энергией до 25 кэВ и плотностью энергии до 100 Дж/см<sup>2</sup> при длительности импульса 20–1000 мкс [10]. Уникальной особенностью данного типа источников электронов является возможность малоинерционно управлять током пучка, который слабо зависит от ускоряющего напряжения [11]. Таким образом, можно управлять мощностью

пучка в субмиллисекундном диапазоне длительностей импульсов [3] и, следовательно, скоростью подвода энергии к поверхности обрабатываемой мишени в рамках импульса тока пучка [12]. Управление подачей энергии позволяет управлять температурным полем в поверхностном слое мишени и, следовательно, его структурой и фазовым состоянием.

Режимы облучения были выбраны таким образом, чтобы поверхностный слой был прогрет выше температуры плавления алюминия (>650 °С), но при этом не достигал температуры плавления стали и титана (<1500 °С), то есть находился на уровне около 1000 °С. Ожидалось, что при этом пленки Ti и Al будут эффективно диффундировать в поверхность стали.

Температурное поле, формируемое в системе «пленка (Ti) / пленка (Al) / (12X18H10T) подложка» при интенсивном импульсном электронно-лучевом облучении (плотность энергии пучка 10–50 Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса тока 50–500 мкс) было оценено с помощью математического моделирования.



**Рис. 1.** Схема электронно-лучевого облучения:

- 1 – источник электронов, 2 – магнитные катушки, 3 – вакуумная камера, 4 – смотровое окно, 5 – импульсный электронный пучок, 6 – двухкоординатный стол-манипулятор, 7 – крепежные пластины, 8 – облученный образец, 9 – медное зеркало, 10 – коллиматор, 11 – объектив, 12 – термомпара, 13 – вакуумный ввод, 14 – волоконно-оптический кабель, 15 – высокоскоростной инфракрасный пирометр, 16 – осциллограф, 17 – нормализующий преобразователь, 18 – блоки питания и автоматики

**Fig. 1.** Schematic diagram of electron-beam irradiation:

- 1 – electron source, 2 – magnetic coils, 3 – vacuum chamber, 4 – observation window, 5 – pulsed electron beam, 6 – two-coordinate manipulator table, 7 – fastening plates, 8 – irradiated specimen, 9 – copper mirror, 10 – collimator, 11 – lens, 12 – thermocouple, 13 – vacuum joint, 14 – fiber-optic cable, 15 – high-speed infrared pyrometer, 16 – oscilloscope, 17 – normalizing converter, 18 – power-supply units and automation system

При средней энергии электронов пучка на мишени ~10 кэВ можно считать, что источник энергии действует на поверхность, а тепловые процессы с длительностями импульсов 50–500 мкс можно рассматривать в одномерном приближении, поскольку поперечный размер воздействия энергии значительно больше глубины распространения теплового поля. При этих допущениях оценка нагрева сводится к решению уравнения теплопроводности (1) с граничными условиями (2), (3) и начальным условием (4):

$$d \cdot \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = d \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q(t) = U(t) \cdot I(t) \frac{J}{\sum_i [U(t_i) \cdot I(t_i) \cdot (t_i - t_{i-1})]}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (3)$$

$$T \Big|_{t \rightarrow 0} = T_0, \quad (4)$$

где  $d$  – толщина тонкого слоя,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $q(t)$  – плотность мощности внешнего теплового источника,  $U(t)$  и  $I(t)$  ускоряющее напряжение и ток пучка,  $J$  – плотность энергии за весь импульс (из данных калориметрии),  $t_i$  – отсчеты времени.

Математическая модель включает наличие двухфазной зоны, которая в системе «твердое тело – жидкость» характеризуется средней объемной долей жидкой фазы  $\theta$ . Фазовый переход происходит в интервале температур  $\Delta T$ , в котором фаза материала моделируется сглаженной функцией  $\theta$ , изменяющейся от 1 до 0. Эффективная теплопроводность системы «твердое тело – жидкость»  $\lambda_s$  и проводимостью жидкости  $\lambda_l$  (5). Аналогично для плотности и теплоемкости:

$$\lambda = (1-\theta) \lambda_s + \theta \lambda_l, \quad (5)$$

**Таблица 1.** Режимы обработки системы «пленка (Ti) / пленка (Al) / (12X18H10T) подложка»

**Table 1.** Processing modes of the «film (Ti) / film (Al) / (AISI 304) substrate» system

Достижимая температура, °C / The temperature reached, °C	Длительность основной части импульса, мкс / The duration of the main part of the pulse, μs				
	50	100	200	500	1000
700		Режим №6, Режим №9 Преднагрев 450 °C, 1 мс / Mode No. 6, Mode No. 9 Preheating 450 °C, 1 ms			
900–950	Режим №2 Mode No. 2	Режим №7 Преднагрев 450 °C, 1 мс / Mode No. 7 Preheating 450 °C, 1 ms	Режим №3 / Mode No. 3	Режим №8 / Mode No. 8	Режим №1 / Mode No. 1
1400	Режим №4 Преднагрев 320 мкс до 600 °C / Mode No. 4 Preheating 320 μs to 600 °				
1900	Режим №5 Преднагрев 320 мкс до 700 °C / Mode No. 5 Preheating 320 μs to 700				

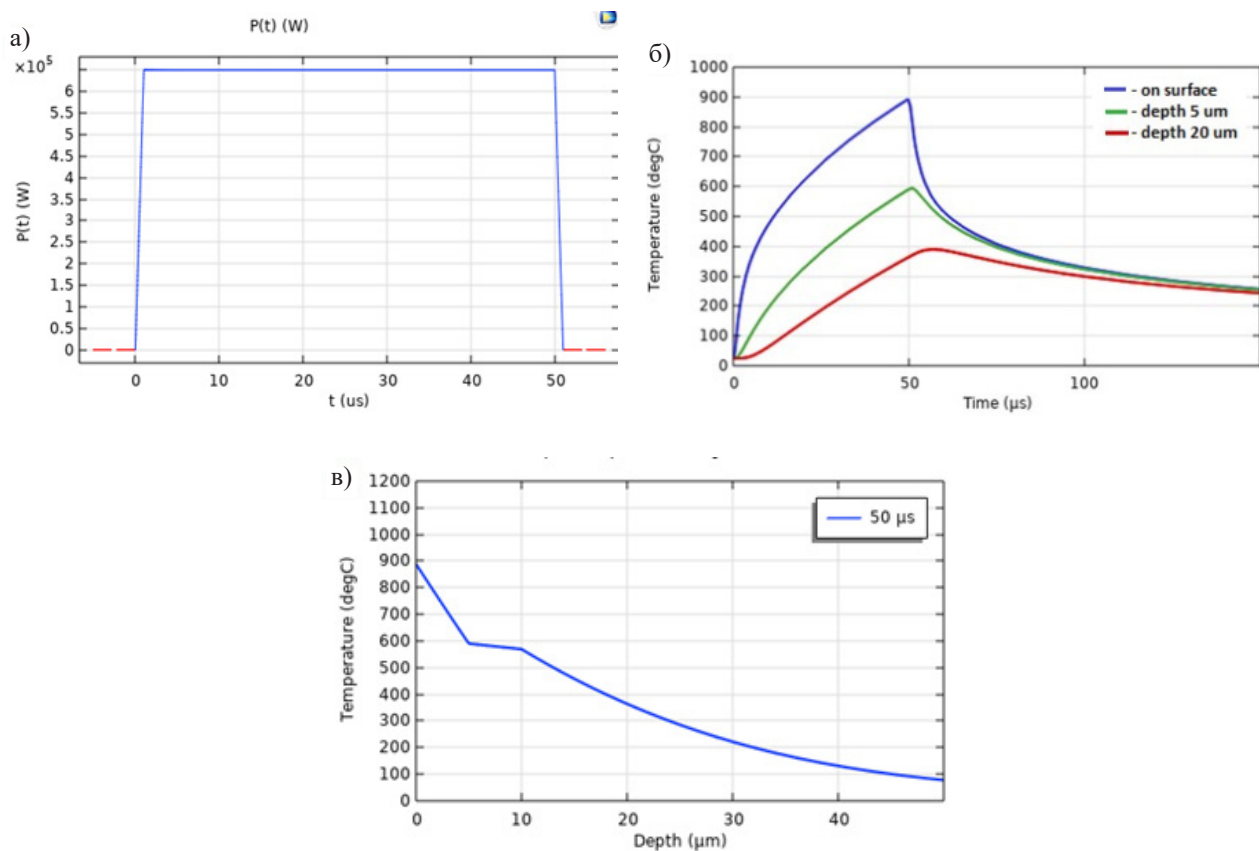
Для учета плавления применяется метод кажущейся теплоемкости, при котором скрытая теплота плавления  $L$  включается в качестве дополнительного члена в теплоемкость (6) [13]:

$$c = c_s + L/\Delta T. \quad (6)$$

При численном решении задачи учитывалось изменение теплофизических коэффици-

ентов от температуры с помощью кусочно-линейных функций [14, 15].

Были выбраны 9 режимов облучения, приведенные в табл. 1. На рис. 2 представлены результаты модели режима 2 в Comsol Multiphysics. Облучение проводили при давлении аргона 20 мПа в магнитном поле в области образца 100 мТл и 50 мТл – в области эмиттера. Плотность энергии пучка на коллекторе составила 10 Дж/см<sup>2</sup>.



**Рис. 2.** Моделирование режима №2:

- а* – динамика мощности в цепи ускоряющего промежутка;  
*б* – изменение температуры в течение импульса (квадрат – на поверхности;  
 круг – глубина 5 мкм; треугольник – глубина 20 мкм);  
*в* – изменение температуры по глубине в конце импульса

**Fig. 2.** Simulation of mode No. 2:

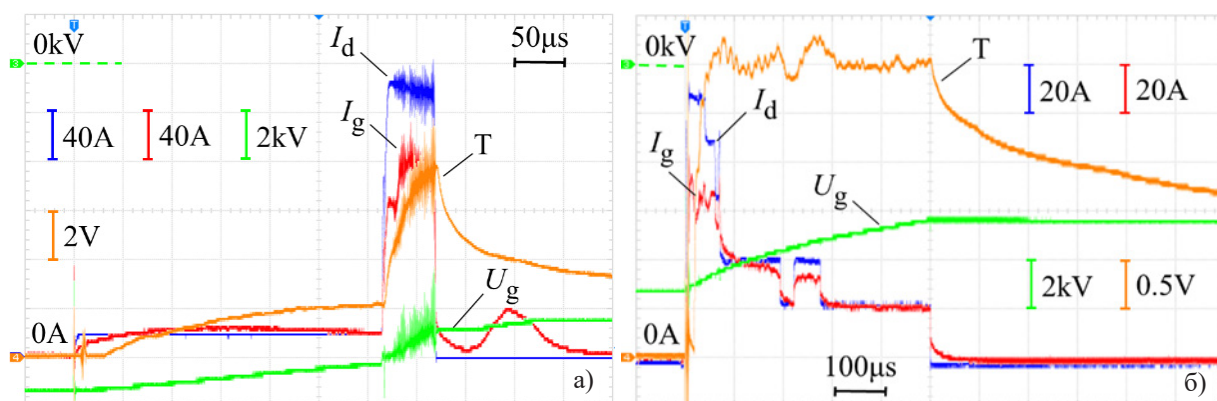
- a* – power dynamics in the accelerating gap circuit;  
*b* – temperature change during the pulse (square – on surface;  
 circle – depth of 5 μm; triangle – depth of 20 μm);  
*v* – temperature change in depth at the end of the pulse

## 2. Результаты и обсуждения

Осциллограммы, полученные при облучении образцов в режимах №5, №8 приведены на рис. 3.

Показано, что микротвердость образца, облученного в режиме №5, когда после предварительного нагрева до 700 °С длительностью 350 мкс в основной части импульса

длительностью 50 мкс достигали 1900 °С, превышает микротвердость исходного образца более чем на 22%, скорость износа снизилась в ≈1300 раз (табл. 2), коэффициент трения изменился незначительно. Эти свойства востребованы для деталей почвообрабатывающих машин в сельском хозяйстве, для пар трения тяжело нагруженных узлов сухого трения [2].



**Рис. 3.** Характерные осциллограммы работы источника электронов в режиме: а – №5, б – №8.  $I_d$  – ток разряда плазменного катода,  $I_g$  – ток в ускоряющей промежутке,  $U_g$  – ускоряющее напряжение,  $T$  – температура ( $T[°C]=300+200*T[V]$ )

**Fig. 3.** Characteristic oscillograms of the electron source operation in mode: а – No. 5, б – No. 8.  $I_d$  – discharge current of the plasma cathode,  $I_g$  – accelerating gap current,  $U_g$  – accelerating voltage,  $T$  – temperature ( $T[°C]=300+200*U[V]$ )

**Таблица 2.** Коэффициент трения, скорость износа и микротвердость системы «пленка/подложка» при различных режимах обработки

**Table 2.** Coefficient of friction, wear rate and microhardness of the film/substrate system under various processing modes

№ образца / Sample number	Скорость износа*10 <sup>-6</sup> , мм <sup>3</sup> /Нм / Wear rate*10 <sup>-6</sup> , mm <sup>3</sup> /Nm	Коэффициент трения / Coefficient of friction	Микротвердость, кг/мм <sup>2</sup> / Microhardness, kg/mm <sup>2</sup>
№4	740	0,64	264,6
№5	0,53	0,73	545,4
№8	720	0,60	367,9
Исходный (с покрытием TiAl) / Initial (with TiAl coating)	690	0,70	372,2

При других режимах свойства материалов становятся немного хуже, чем свойства исходного образца стали с нанесенными пленками без модификации. Из диапазона разброса значений микротвердости от среднего значения при заданном режиме (рис. 4) можно предполагать наличие неоднородности поверхности образцов по структуре, т.е. имеются значительно более твердые и значительно менее твердые области с разным элементным составом (рис. 5). Можно заметить, что наибольшая неоднородность поверхности наблюдается у образцов, модификация которых сопровождалась длительным удержанием температуры (образцы №1, №5, №7).

Элементный состав поверхностного слоя у образцов стали, подвергнутых облучению интенсивным импульсным электронным пучком, изучали методом энергодисперсионного анализа (рис. 5). На изображениях по-

верхности образцов стали со сканирующего электронного микроскопа видно образование микрократеров в поверхностном слое материала за счет испарения легколетучих примесей из приповерхностных слоев системы [16], а у образца №5 помимо них есть микротрещины. После обработки на поверхности присутствуют области, обогащенные алюминием (рис. 5, а) и области, на которых преобладает титан (рис. 5, б). На образце №5 происходит полное плавление всех структурных элементов и их дальнейшее перемешивание, соответственно, на поверхности присутствуют как элементы покрытия, так и подложки (рис. 5, в).

Исследования фазового состава поверхности образцов модифицированной стали проводили методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000). Рентгенограммы исследованных образцов приведены на рис. 6.

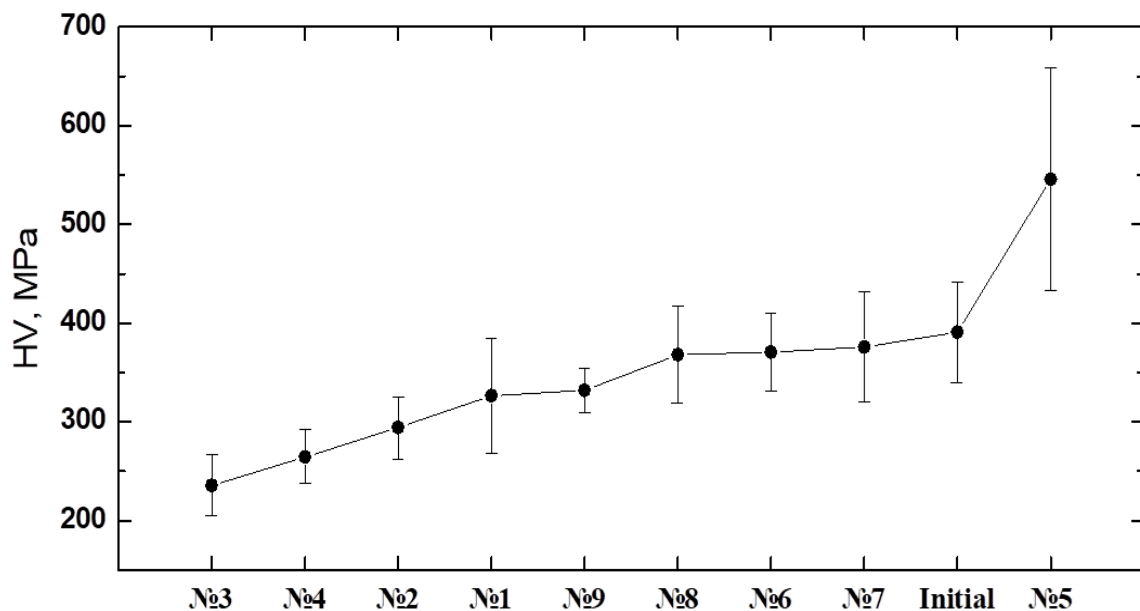


Рис. 4. Микротвердость поверхности образца в зависимости от режима электронно-пучкового воздействия

Fig. 4. Microhardness of the sample surface depending on the mode of electron beam treatment

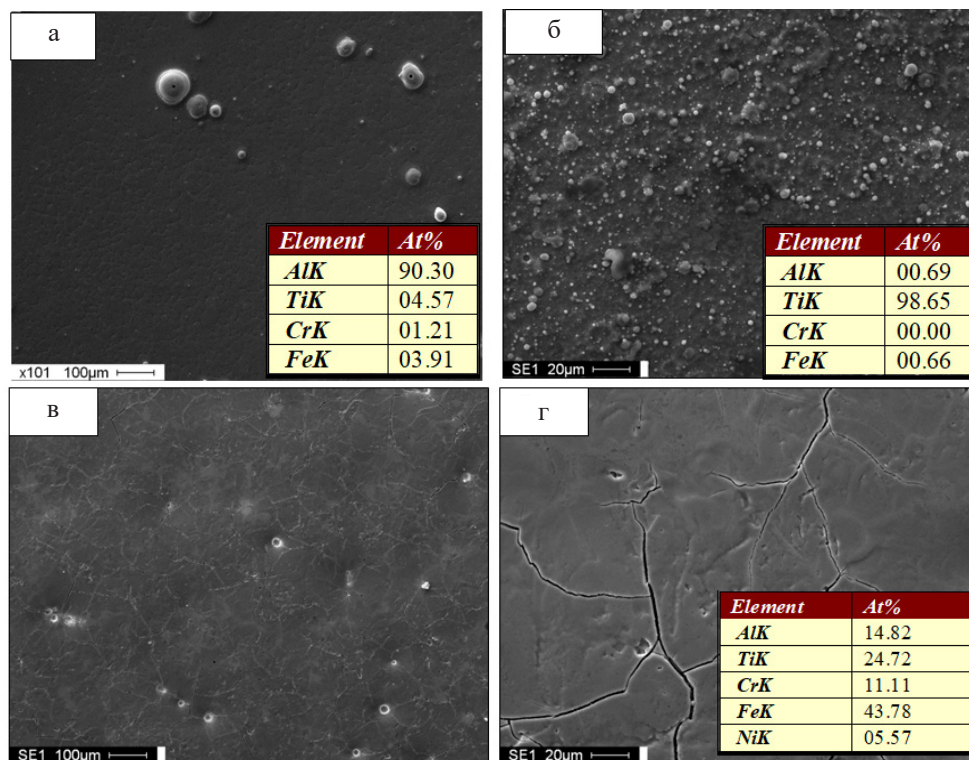


Рис. 5. СЭМ-изображение структуры поверхности образцов № 1 (а, б), №5 (в, г) после облучения импульсным электронным пучком

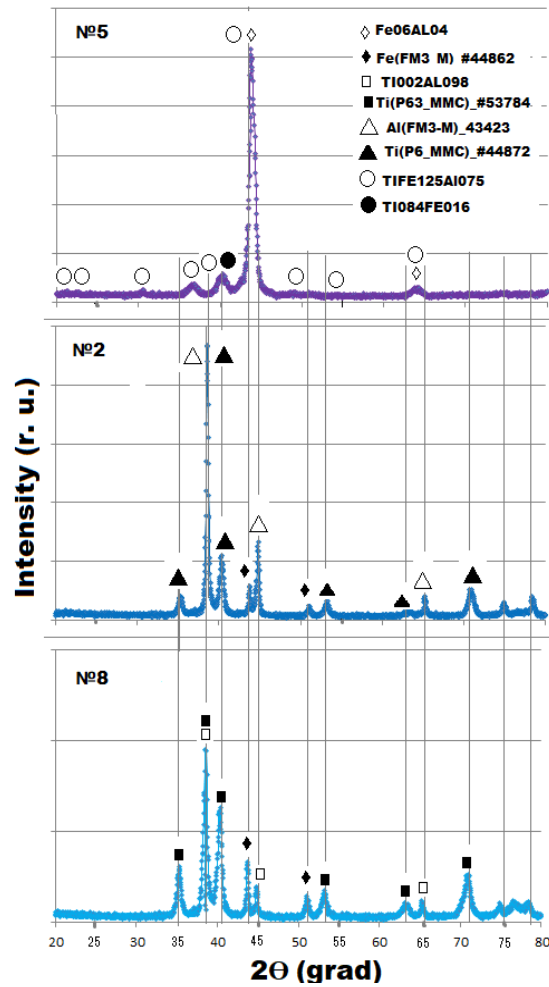
Fig. 5. SEM-image of the surface structure of samples No. 1 (a, б), No. 5 (в, г) after irradiation with a pulsed electron beam

Установлено, что высокоскоростное плавление поверхностного слоя системы «пленка (Ti) / пленка (Al) / (12X18H10T) подложка» электронным пучком сопровождается образованием твердых растворов на основе титана и алюминия и новых упрочняющих фаз. Как было показано выше, наиболее высокие значения микротвердости и износостойкости были получены при исследовании образца №5. Данный образец был подвергнут структурно-фазовым исследованиям методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM 2100F, JEOL). Установлено, что в поверхностном слое системы «пленка/подложка» в результате облучения импульсным электронным пучком формируется субмикро- нанокристаллическая многофазная структура преимущественно столбчатого (ячеистого) типа. Причиной формирования такой структуры является сверхвысокая скорость охлаждения материала при обработке импульсным

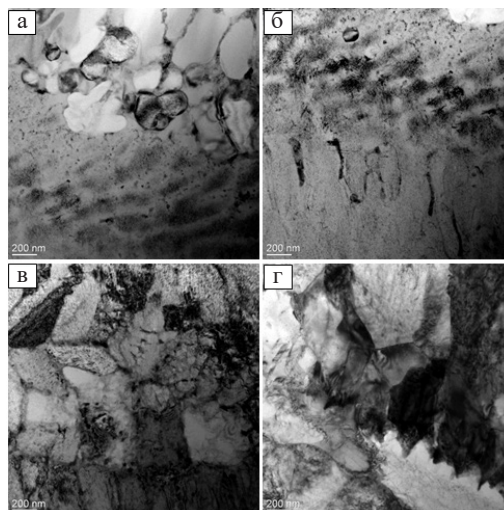
электронным пучком. Толщина слоя с субмикро- нанокристаллической структурой достигает 20 мкм (рис. 7). При большем удалении от поверхности облучения выявляется поликристаллическая структура стали, характеризующаяся высокой плотностью дислокаций, что обусловлено релаксацией термомеханических напряжений, возникающих в материале вследствие высоких скоростей нагрева и охлаждения поверхностного слоя при облучении электронным пучком.

Видно (рис. 8, а, б), что объем ячеек кристаллизации слоя подложки, контактирующего с пленкой, обогащен атомами железа, хрома и никеля. Ячейки разделены прослойками, обогащенными атомами алюминия и титана. Обратная картина наблюдается при анализе распределения элементов в слое покрытия, а именно, объем ячеек кристаллизации обогащен атомами титана и алюминия, прослойки, разделяющие ячейки, обогащены атомами железа, никеля и хрома (рис. 8, в, г).



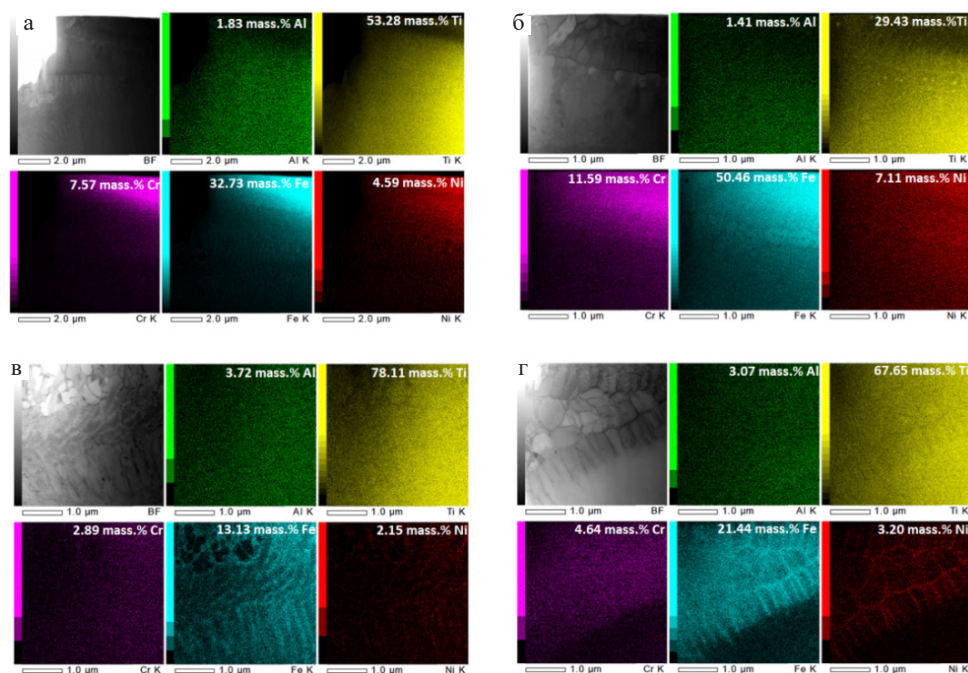


**Рис. 6.** Рентгенограммы системы «сталь 12Х18Н10Т (подложка)/ TiAl (пленка)» при разных режимах облучения  
**Fig. 6.** X-ray diffraction patterns of the «steel AISI 304 (substrate)/ TiAl (film)» system under different irradiation modes



**Рис. 7.** ПЭМ-изображение структуры образца №5 на глубине:  
*a – 4 мкм, б – 6 мкм, в – 9 мкм, г – 18 мкм*

**Fig. 7.** TEM image of the structure of sample No. 5 at a depth of:  
*a – 4 μm, б – 6 μm, в – 9 μm, г – 18 μm*



**Рис. 8.** Результаты микрорентгеноспектрального анализа различных участков поверхностного слоя системы «пленка (алюминий+титан)/(сталь 12Х18Н10Т) подложка». Стрелкой обозначена сторона образца, обращенная к поверхности облучения

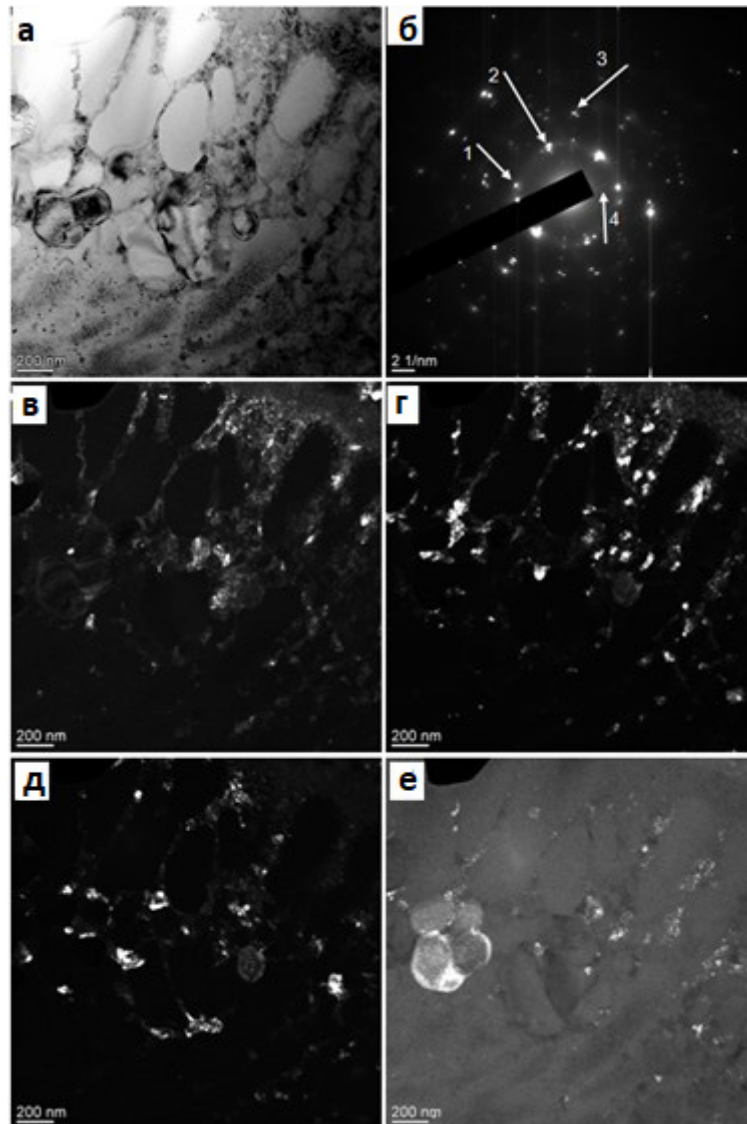
**Fig. 8.** Results of electron microprobe analysis of various regions of the surface layer of the «film (aluminum+titanium)/(steel AISI 304) substrate» system. The arrow indicates the side of the sample facing the irradiation surface

Электронно-микроскопическое изображение структуры напыленного слоя, примыкающего к границе с подложкой, приведено на рис. 9. Наряду со столбчатой структурой присутствуют ячейки (кристаллиты) округлой (глобулярной) формы (рис. 9, а). Размеры кристаллитов глобулярной формы изменяются в пределах (150–200) нм.

Микродифракционный анализ показывает, что столбчатая структура сформирована фазой  $Al_3Ti$  (рис. 9, в). Образования глобулярной формы сформированы фазой  $Al_5NiFe$  (рис. 9, е). По границам столбчатой структуры располагаются наноразмерные (20–50 нм) включения состава  $NiTi$ ,  $Al_6Fe$  (рис. 9, з),  $Al_{13}Fe_4$ ,  $CrNiTiFe$  (рис. 9, д). Таким образом, в слое покрытия, примыкающем к подложке, фазообразование осуществляется с участием элементов и покрытия, и подложки. На глубине 10 мкм и более ос-

новной фазой является твердый раствор на основе  $\gamma-Fe$  (ГЦК кристаллическая решетка на основе железа). В объеме зерен  $\gamma$ -фазы наблюдаются наноразмерные (15–20 нм) частицы  $Ni_3Ti$ . Этот факт указывает на диффузию атомов титана из покрытия в подложку в процессе облучения импульсным электронным пучком.

По результатам исследований структурно-фазового состояния модифицированной стали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии можно заключить, что повышение механических (микротвердость) и трибологических (параметр износа) свойств системы «пленка (алюминий+титан)/(сталь 12Х18Н10Т) подложка» обусловлено формированием субмикро- нанокристаллической многофазной структуры, содержащей включения интерметаллидных фаз.



**Рис. 9.** Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя системы «пленка/подложка»:

*a* – светлое поле; *б* – микроэлектроннограмма; *в–е* – темные поля, полученные в рефлексах  $[004]Al_3Ti$  (*в*),  $[111]NiTi + [004]Al_6Fe$  (*з*),  $[446]Al_{13}Fe_4 + [402]CrNiTiFe$  (*д*),  $[021]Al_3NiFe$  (*е*). На (*б*) стрелками указаны рефлексы, в которых были получены темные поля: 1 – для (*в*); 2 – для (*з*), 3 – для (*д*), 4 – для (*е*)

**Fig. 9.** Electron microscopic image of the structure of the surface layer of the film/substrate system:

*a* – bright field; *б* – micro electron diffraction pattern; *в–е* – dark fields obtained in reflections  $[004]Al_3Ti$  (*в*),  $[111]NiTi + [004]Al_6Fe$  (*з*),  $[446]Al_{13}Fe_4 + [402]CrNiTiFe$  (*д*),  $[021]Al_3NiFe$  (*е*). In (*б*), the arrows indicate the reflections in which dark fields were obtained: 1 – for (*в*); 2 – for (*з*), 3 – for (*д*), 4 – for (*е*)

## Выводы

Разработан метод электронно-пучкового легирования системы «пленка (Ti) / пленка (Al) / (12X18H10T) подложка» модулированным электронным пучком в источнике с плазменным катодом SOLO на основе чис-

ленной модели. Повышение микротвердости и параметра износа обусловлено формированием субмикро- нанокристаллической многофазной структуры столбчатого (ячеистого) типа, содержащей включения интерметаллидных фаз типа  $Al_5NiFe$ ,  $NiTi$ ,  $Al_6Fe$ ,  $Al_{13}Fe_4$ ,  $CrNiTiFe$ .

Данный метод повышения износостойкости стали 12Х18Н10Т отличается низкими затратами легирующих элементов и электроэнергии, а также стоимостью, поскольку легирование можно использовать как постобработку готовых изделий. Из модифицированной стали можно изготавливать детали почвообрабатывающих машин для сельского хозяйства, пары трения для тяжело нагруженных узлов сухого трения как альтернативу металлокерамическим фрикционным материалам.

### Благодарности / Acknowledgments

*Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10015-П). Результаты рентгеновской дифракции и растровой электронной микроскопии получены в Научно-образовательном центре «Физика и химия высокоэнергетических систем» Национального исследовательского Томского государственного университета.*

*The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 20-79-10015-P). The results of X-ray diffraction and scanning electron microscopy were obtained at the Scientific and Educational Center «Physics and Chemistry of High-Energy Systems» of the National Research Tomsk State University.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smolyakova M.Yu. Study of the influence of low-temperature nitriding on the corrosion resistance and tribological properties of steel 12H18N10T //Advanced Materials. – 2013. – No. 10. – pp. 63-69. (in Russian) [Смолякова М.Ю. Исследование влияния низкотемпературного азотирования на коррозионную стойкость и трибологические свойства стали 12Х18Н10Т // современные материалы. – 2013. - №10. - С. 63-69.]
2. Sevostyanov N.V., Burkovskaya N.P. Modern aspects of the development of tribological materials science of heavily loaded dry friction units (review) //Proceedings of VIAM. – 2022. – №. 10 (116). – Pp. 76-89. [Севостьянов Н. В., Бурковская Н. П. Современные аспекты развития триботехнического материаловедения тяжело нагруженных узлов сухого трения (Обзор) //Труды ВИАМ. – 2022. – №. 10 (116). – С. 76-89.] DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-76-89
3. Kumar N., Mukherjee M., Bandyopadhyay A. Comparative study of pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 and AISI 316 stainless steels //Optics & Laser Technology. – 2017. – Т. 88. – С. 24-39.
4. Budovskikh, E.A., Karpjij, S.V. & Gromov, V.E. Formation of metal and alloy surface layers at electroexplosive alloying. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 73, 1253–1256 (2009). <https://doi.org/10.3103/S1062873809090160>
5. Vorobyov M.S., et al. Dynamic control of the power of a megawatt electron beam of submillisecond duration in a source with a plasma cathode. Letters to ZhTF, 2021, volume 47, issue. 10, p. 38-42 (in Russian) [Воробьев М.С., Москвин П.В., Шин В.И., Коваль Н.Н., Ашурова К.Т., Дорошкевич С.Ю., Девятков В.Н., Торба М.С., Леванидов В.А. Динамическое управление мощностью мегаваттного электронного пучка субмиллисекундной длительности в источнике с плазменным катодом. Письма в Жтф, 2021, том 47, вып. 10, С. 38-42] DOI : PJTF .2021.10.50972.18719
6. Vorobyov M.S; Petrikova E.A.; Shin V.I; Moskvina P.V.; Ivanov Yu.F; Koval N.N.; Koval T.V; Prokopenko N.A.; Kartavtsov R.A.; Shpanov D.A. Steel Surface Doped with Nb via Modulated Electron-Beam Irradiation: Structure and Properties. Coatings 2023 , 13 , 1131. DOI : 10.3390/coatings13061131
7. Vorobyov M.S. et al. Treatment of silumin surface by a modulated submillisecond electron beam //High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2022. – Т. 26. – №. 4. DOI: 10.1615/HighTempMatProc.2022043754
8. Rotshtein V.P. et al. Modification of surface layers of metallic materials by low-energy high-current electron beams, Novosibirsk: Nauka, 2019
9. Rotshtein V.P. et al. Synthesis of Ti 3 Al and TiAl based surface alloys by pulsed electron-beam melting of Al (film)/Ti (substrate) system //Technical Physics Letters. – 2011. – Т. 37. – С. 226-229.
10. Ivanov Y.F. et al. Thermal Processes at Electron-Beam Treatment of Yttrium-Stabilized Zirconium Dioxide Ceramics //Key Engineering Materials. – 2016. – Т. 683. – С. 58-64. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.683.58
11. Shugurov V.V.; Koval N.N.; Krysina O.V.; Prokopenko N.A. QUINTA equipment for ion-plasma modification of materials and products surface and vacuum arc plasma-assisted deposition of coatings. J. Phys. Conf. Ser. 2019 , 1393 , 012131–012141. DOI: 10.1088/1742-6596/1393/1/012131
12. A complex of unique electrophysical installations for effective electron-ion-plasma modification of the surface of materials and products «UNIQUE» // Scientific and technological infrastructure of the Russian Federation. URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/434216/>

(date of access: 03/29/2024) (in Russian) [Комплекс уникальных электрофизических установок для эффективной электронно-ионно-плазменной модификации поверхности материалов и изделий «УНИКУУМ» // Научно-технологическая инфраструктура Российской Федерации. URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/434216/> (дата обращения: 29.03.2024)].

13. Koval N.N. et al. Effect of Intensified Emission during the Generation of a Submillisecond Low-Energy Electron Beam in a Plasma-Cathode Diode. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2009, 37, 1890–1896. DOI: 10.1109/TPS.2009.2023412

14. Vorobyov M.S et al. Electron beam generation with variable current amplitude during its pulse in a source with a grid plasma cathode. *J. Phys. Conf. Ser.* 2019, 1393, 012064. DOI:10.1088/1742-6596/1393/1/012064

15. Vorobyov M.S. et al. Controlling the Specimen Surface Temperature during Irradiation with a Submillisecond Electron Beam Produced by a Plasma-Cathode Electron Source. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2021, 49, 2550–2553. DOI: 10.1109/TPS.2021.3089001

16. Series 740 / [Электронный ресурс] // Kleiber Infrared : [сайт]. — URL: <https://www.kleiberinfrared.com/index.php/en/products/highspeed/series-740-730/series-740.html> (дата обращения: 29.05.2024).

17. Kaplan F. et al. Modeling and analysis of phase change materials for efficient thermal management //2014 IEEE 32nd International Conference on Computer Design (ICCD). – IEEE, 2014. – С. 256-263. DOI: 10.1109/ICCD.2014.6974690

18. Thermal conductivity and thermal diffusivity coefficients of 12Kh18N10T stainless steel in a wide temperature range/Stankus S.V., Savchenko I.V., Baginskii A.V. [et al.] // *High Temperature*. – 2008. – Vol. 46, No. 5. – P. 731-733. – DOI 10.1134/S0018151X08050222. – EDN LLHVHR.

19. Cezairliyan A., Miiller A.P. Thermophysical measurements on low carbon 304 stainless steel above 1400 K by a transient (subsecond) technique // *International Journal of Thermophysics*. – 1980. – Т. 1. – №. 1. – С. 83-95. DOI: 10.1007/BF00506274

20. Ivanov, Y.F.; Gromov, V.E.; Zagulyaev, D.V.; Kononov, S.V.; Rubannikova, Y.A. Improvement of Functional Properties of Alloys by Electron Beam Treatment. *Steel Transl.* 2022, 52, 71–75. DOI: 10.3103/S0967091222010120