

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ НАНОЧАСТИЦ
В МАТЕРИАЛ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ© 2024 г. Г. Ж. Сахвадзе^{1,*}, Г. Г. Сахвадзе¹¹Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: sakhvadze@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2024 г.

После доработки 01.08.2024 г.

Принята к публикации 15.08.2024 г.

В статье изучается новая технология, называемая имплантацией наночастиц в поверхностный слой легкого сплава с использованием лазерной ударной волны. Разработаны конечно-элементные и аналитические модели для определения глубины имплантации WC-наночастиц в алюминиевую подложку при имплантации наночастиц с помощью лазерной ударной волны. Рассматриваются 2 режима: однократное применение технологии имплантации наночастиц в поверхностный слой, и последовательное двукратное применение имплантации наночастиц в поверхностный слой. Полученные результаты показали, что в обоих исследуемых режимах наночастицы имплантируются в поверхностный слой алюминиевого сплава АД1 с разной интенсивностью. Показано, что рассчитанные с помощью метода конечных элементов и аналитической моделью глубины имплантации наночастиц хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает достоверность разработанных моделей глубин имплантации.

Ключевые слова: имплантация наночастиц, лазерная ударная волна, моделирование, метод конечных элементов, глубина имплантации

DOI: 10.31857/S0235711924060094, EDN: NOTPED

Сплавы из легких металлов (например, сплавы алюминия, магния и титана) широко используются в аэрокосмической и автомобильной промышленности, которые постоянно работают в условиях высоких напряжений, при этом параллельно ужесточаются требования по снижению их удельного веса из-за роста цен на топливо. Однако низкая твердость и износостойкость поверхностей легких металлов существенно ограничивают срок их службы [1].

Путем оптимального сочетания высоких физико-механических свойств наночастиц [2] и преимуществ технологии лазерного ударного упрочнения (ЛУУ) [3–5], в последние годы была разработана новая технология, называемая имплантацией наночастиц в поверхностный слой легкого сплава с использованием лазерной ударной волны (ИНЛУВ). Например, в [6] использовали ЛУУ для создания слоя наноалмазного покрытия на верхней поверхности алюминиевого сплава. В работе [7] описан способ создания покрытия из наночастиц карбида вольфрама (WC), подвергнув поверхность алюминиевого сплава ЛУУ. Было обнаружено, что твердость поверхности и возникающие при этом остаточные напряжения были выше, чем при использовании классической технологии ЛУУ. В работе [8] нанопокрывтие SiC с высокой микроструктурой было успешно изготовлено на поверхности чистого алюминия с помощью ИНЛУВ и разработан возможный механизм формирования покрытия нано-SiC.

В работе [9] показано, улучшение поверхностных свойств легких металлов, армированных наночастицами, связано не только с микроструктурой и составом поверхностного слоя, но и со степенью дисперсионной однородности и глубиной внедрения армированных частиц. Однако до сих пор лишь немногие публикации освещают вопросы однородности дисперсии и глубины имплантации армированных частиц посредством ИНЛУВ. В частности, требует более глубокого изучения определение максимальной глубины имплантации частиц, которое играет ключевую роль в улучшении свойств поверхности. В [9] также изучается процесс имплантации наночастиц под действием ЛУВ в поверхностный слой алюминиевого сплава АД1. Для моделирования динамического поведения наночастиц под действием ЛУВ, имплантированных в алюминиевый сплав АД1, разработана конечно-элементная модель. Разработаны модели для определения глубины имплантации наночастиц в алюминиевый сплав АД1, подвергнутых однократному и двукратному воздействиям ЛУВ. Рассчитанные глубины имплантации наночастиц сравниваются с экспериментальными данными.

Конечно-элементное моделирование технологии ИНЛУВ. В качестве материала подложки (матрицы) используется алюминиевый сплав АД1. Для моделирования процесса имплантации наночастиц в поверхностный слой алюминиевого сплава АД1 с помощью технологии ИНЛУВ используется метод конечных элементов (МКЭ), в частности, программный комплекс ABAQUS. При моделировании принята кубовидная 3D-осесимметричная модель, в которой на поверхностном слое в центральной области выбрана сетка с высокой плотностью (рис. 1). WC-наночастицы со средним диаметром 50–100 нм, считаются жесткими шариками, они располагаются на поверхности в два слоя. В разработанной модели к наночастицам прикладывается давление, образованное лазерной ударной волной, вследствие чего им сообщается определенная начальная скорость. Расположение наночастиц схематически показано на рис. 1. Имитационная модель состоит из 196611 конечных элементов типа C3D8R для алюминиевого сплава АД1 и 1263 элементов типа C3D4

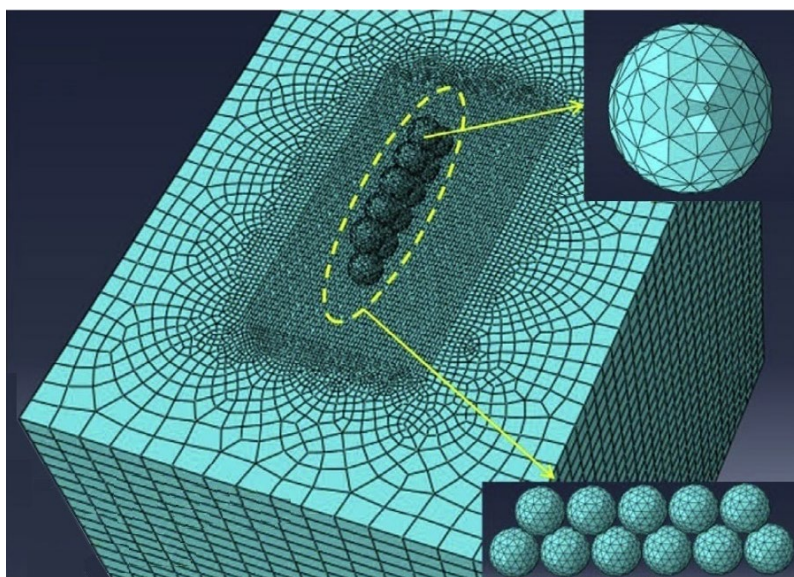


Рис. 1. Конечно-элементная модель имплантации WC-наночастиц в алюминиевый сплав АД1 под действием ЛУВ.

для WC-наночастиц. По границам подложки накладываются симметричные граничные условия (жесткое защемление). Более детально особенности создания конечно-элементной модели изложены в [12].

Основные допущения и исследуемый материал. В процессе моделирования были сделаны следующие допущения: 1) пластическая деформация верхней поверхности алюминиевого сплава АД1, вызванная ЛУВ, считается одноосной и плоской; 2) ударное давление прикладывается строго по нормали к центральной части верхней поверхности; 3) эффектом вязкости материала подложки пренебрегаем.

В табл. 1 приведены необходимые параметры определяющего соотношения Джонсона–Кука для алюминиевого сплава АД1, которое применяется для конечно-элементного моделирования технологии ИНЛУВ [8].

Таблица 1. Параметры определяющего соотношения Джонсона–Кука и другие характеристики алюминиевого сплава АД1 [8]

Параметр, обозначение	Значение
A , МПа	120
B , МПа	200
C	0.01
N	0.3
Коэффициент Пуассона ν	0.33
Модуль упругости E , ГПа	69
Динамический предел прочности σ_y , МПа	600
Плотность ρ , г/см ³	2.7
Акустический импеданс поглощающего слоя Z_{cl} , г/(см ² с)	$0.143 \cdot 10^6$
Акустический импеданс алюминия Z_{al} , г/(см ² с)	$1.7 \cdot 10^6$

В табл. 2 представлены использованные при расчетах пиковые давления, которые образуются при различных энергиях импульса. Вид определяющего соотношения, методика расчета приложенного ударного давления и другие подробности процедуры моделирования приведены в [8].

Таблица 2. Пиковые давления при различных энергиях лазерного импульса

Энергия лазерного импульса, Дж	Пиковое давление в ударной волне, ГПа
6	3.69
9	4.53
12	5.23

Физические основы технологии ИНЛУВ. В [9] изложены основные физические принципы технологии ИНЛУВ, к которым мы и придерживаемся: воздействие лазерной ударной волны на материал происходит в наносекундном диапазоне со сверхвысоким давлением, которые вызывают сверхвысокие скорости деформации. Вкратце процесс ИНЛУВ можно хронологично описать следующим образом: под действием высокоэнергетичного лазерного импульса (с интенсивностью несколько ГВт/см²) поглощающий слой испаряется с образованием плазмы высокого давления, которая начинает быстро расширяться. Поскольку пространство для расширения ограничено небольшим зазором между предварительно нанесенным слоем наночастиц и про-

зрачным слоем, происходит быстрое увеличение давления плазмы с образованием сильной ударной волны, которая воздействует на предварительно нанесенный слой наночастиц. Параллельно лазерная ударная волна в приповерхностных областях подложки вызывает пластические деформации различной интенсивности. В результате, в процессе ИНЛУВ в приповерхностном слое подложки сформируется слой, армированный наночастицами, и слой с пластическими деформациями [10].

Результаты и обсуждение. Процесс имплантации наночастиц в подложку с помощью ЛУВ. На рис. 2 показан процесс ИНЛУВ, полученный с помощью конечно-элементного моделирования, при котором происходит проникновение наночастиц в алюминиевый сплав АД1 при энергии лазерного импульса 6 Дж. В начале процесса ($t = 0$ нс) предварительно нанесенные WC-наночастицы и верхняя поверхность алюминиевого сплава АД1 находятся в статическом состоянии (рис. 2а). В этот момент на верхней поверхности алюминиевого сплава АД1 пластических деформаций еще нет. К моменту времени $t = 1000$ нс наночастицы под механическим воздействием ЛУВ приобретают определенную начальную скорость (рис. 2б). К моменту времени $t = 1500$ нс глубина имплантации WC-наночастиц в подложку постепенно увеличивается, одновременно в поверхностном слое подложки возникают большие пластические деформации (рис. 2в). К моменту времени $t = 4000$ нс скорости наночастиц падают до нуля, и соответственно глубина их имплантации, достигают максимальных значений (рис. 2г).

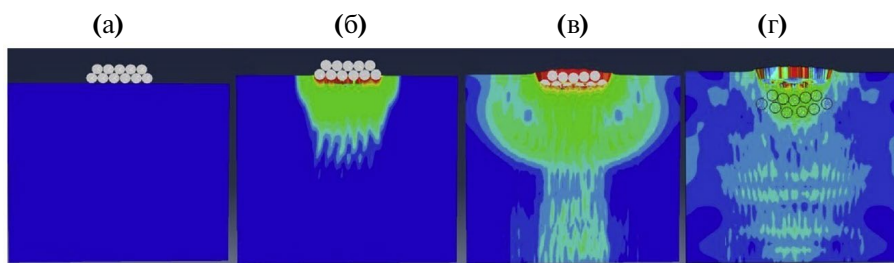


Рис. 2. Имплантация WC-наночастиц в сплав АД1 под действием ЛУВ:
(а) — $t = 0$ нс; (б) — $t = 1000$ нс; (в) — $t = 1500$ нс; (г) — $t = 4000$ нс.

Таким образом, получили, что при ИНЛУВ в поверхностном слое алюминиевого сплава АД1 формируется композитный нанослой, состоящий из WC-наночастиц и алюминиевого сплава АД1. Показано, что с помощью механического воздействия ЛУВ наночастицы имплантируются в поверхностный слой. Заметим, что ИНЛУВ представляет собой чисто физический процесс (без химических превращений).

Глубина имплантации WC-наночастиц при разных режимах ИНЛУВ и при разных энергиях лазерного импульса. На рис. 3 показаны конечные расположения WC-наночастиц при разных режимах ИНЛУВ и при различных энергиях лазерного импульса, полученные с помощью МКЭ. Соответствующие численные значения глубин имплантации приведены в табл. 3.

В настоящей статье рассматривается 2 режима ИНЛУВ. Однократное применение технологии ИНЛУВ (назовем его режимом ИНЛУВ-1), и последовательное двукратное применение ИНЛУВ (режим ИНЛУВ-2). Как видим из табл. 3, при ИНЛУВ-1 глубины имплантации наночастиц при энергиях лазерного импульса 6, 9 и 12 Дж составляют 945.1, 1595.8 и 1923.9 нм соответственно. Глубины имплантации увеличиваются на 650.7 и 328.1 нм при варьировании энергии лазерного импульса в диапазонах 6–9 и 9–12 Дж соответственно. При ИНЛУВ-2 глубины имплантации

Таблица 3. Округленные (до целых значений) глубины имплантации при разных режимах ИНЛУВ и при различных энергиях лазерного импульса

Режим ИНЛУВ	Энергия лазерного импульса, Дж	Глубина имплантации, нм
ИНЛУВ-1	6	945
	9	1596
	12	1924
ИНЛУВ-2	6	1646
	9	2026
	12	2185

наночастиц уже составляют 1646.1, 2025.5 и 2185.1 нм при энергиях лазерного импульса 6, 9 и 12 Дж соответственно.

Таким образом, видим, что глубины имплантации наночастиц при режиме ИНЛУВ-2 по сравнению с ИНЛУВ-1 увеличиваются в 1.7 и 1.3 раза (при варьировании энергии лазерного импульса в диапазонах 6–9 и 9–12 Дж соответственно). Легко обнаружить закономерность, что глубина имплантации наночастиц увеличивается с увеличением подводимой лазерной энергии нелинейным образом. Аналогичная нелинейная зависимость между ними наблюдается и в [11].

Аналитическое определение глубины имплантации наночастиц в алюминиевый сплав АД1 при ИНЛУВ. ИНЛУВ представляет собой сложный физический процесс, включающий генерацию и распространение лазерных ударных волн, ускорение и взаимное столкновение наночастиц, имплантацию наночастиц и механическое воздействие ударных волн на поверхностный слой алюминиевого сплава АД1.

При разработке математической модели для определения глубины имплантации наночастиц в алюминиевый сплав АД1 при ИНЛУВ были сделаны следующие допущения: 1) лазерная ударная волна распространяется в прямолинейном направлении и ее энергия равномерно распределена в лазерном пятне; 2) энергия ударной волны

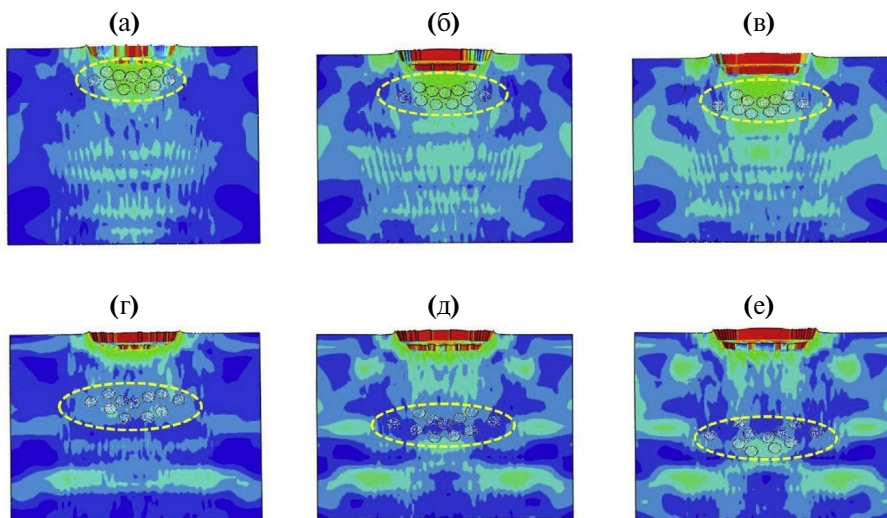


Рис. 3. Конечные расположения WC-наночастиц при разных режимах ИНЛУВ и при различных энергиях лазерного импульса: (а) — ИНЛУВ-1 и 6 Дж; (б) — ИНЛУВ-1 и 9 Дж; (в) — ИНЛУВ-1 и 12 Дж; (г) — ИНЛУВ-2 и 6 Дж; (д) — ИНЛУВ-2 и 9 Дж; (е) — ИНЛУВ-2 и 12 Дж.

поглощается наночастицами равномерно; 3) наночастицы распределены по поверхности равномерно и имеют одинаковую кинетическую энергию; 4) наночастицы представляют собой твердые тела, направление имплантации строго перпендикулярно верхней поверхности алюминиевого сплава АД1, а площадь контакта остается неизменной в течение всего процесса имплантации.

Схематизация столкновения между наночастицами. Принимаем, что столкновение между наночастицами происходит нецентральный способ, которое схематично показано на рис. 4. Принимаем, что при нагружении лазерной ударной волной все шары в верхнем слое получают одинаковую начальную скорость, т. е. $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5 = v$. Принимается также, что массы всех наночастиц одинаковы, т. е. $m_1 = m_2 = \dots = m_{10} = m_{11} = m$. Тогда коэффициент восстановления скорости e будет варьироваться в диапазоне 0.3–0.7 [11]. В этом случае скорости, например, восьмого и девятого шаров после столкновения (v_8 и v_9), находящихся во втором слое, можно определить следующим образом [12]:

$$\begin{cases} v_8 = \frac{1+e}{2} \sqrt{(v_3 \cos \theta)^2 + (v_2 \cos \theta)^2}, \\ v_9 = \frac{1+e}{2} \sqrt{(v_4 \cos \theta)^2 + (v_3 \cos \theta)^2}. \end{cases} \quad (1)$$

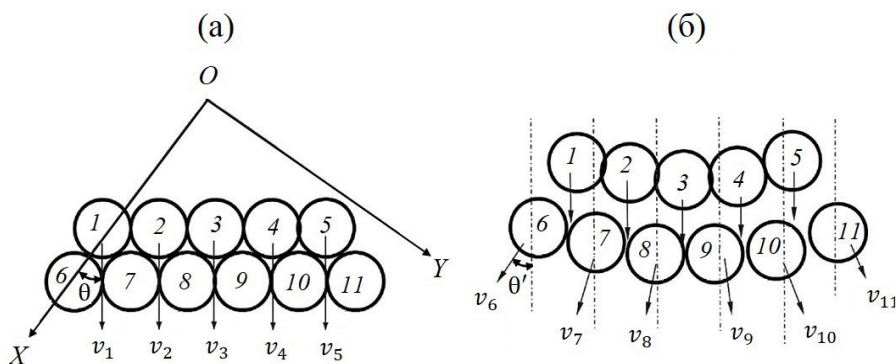


Рис. 4. Схема столкновения наночастиц, вызванного лазерной ударной волной. Показаны скорости шариков в верхнем и нижнем слоях: (а) — состояние шариков до столкновения; (б) — скорости шариков после столкновения шаров.

Определяя из формул (1) соответствующие скорости, видим, что скорости, передаваемые шарикам в нижнем слое в режиме ИНЛУВ-2 составляют всего 65–85% от начальных скоростей шара, которые шары в верхнем слое получили от первой лазерной ударной волны. Принимаем, что $v_8 = v_9 = kv$, где k — коэффициент передачи скорости [11]. Таким образом, наночастицы нижнего слоя после воздействия второй лазерной ударной волны (в режиме ИНЛУВ-2) получают скорости, составляющие примерно 75% от скорости, полученной после первой лазерной ударной волны (в режиме ИНЛУВ-1). Таким образом, получаем, что $k \approx 0.75$.

Режим ИНЛУВ-1. Во время ИНЛУВ наночастицы, которые предварительно нанесены в виде покрытия между поглощающим слоем и верхней поверхностью подложки, под механическим воздействием ударных волн имплантируются в поверхностный слой материала на большую глубину. Проведя аналогию с процессом проникновения шарика в пластину при их высокоскоростном столкновении [12], принимаем, что глубина имплантации наночастицы, кроме скорости и свойств материала, зависит

также от угла проникновения и формы наночастицы. Будем использовать теорию упругопластичности полубесконечной пластины при нормальном проникновении в нее шарика. Тогда сопротивление F_Z , возникающее в процессе проникновения шарика по направлению Z , можно выразить следующим образом [13]:

$$F_Z = A\sigma_y + \rho_t Au^2, \quad (2)$$

где σ_y — динамический предел текучести материала подложки; ρ_t — плотность подложки; A — площадь контакта шарика и подложки по направлению проникновения; u — скорость проникновения шарика.

С учетом уравнения (2), масса шарика m , скорость его проникновения u и время t связаны между собой зависимостью

$$du = -\frac{F_Z}{m} = -\frac{A\sigma_y + \rho_t Au^2}{m} dt. \quad (3)$$

Пусть T — время до полной остановки шарика в подложке, тогда максимальную глубину проникновения в интегральной форме можно определить следующим образом:

$$Z_{\max} = \int_0^T u dt. \quad (4)$$

Подставив уравнение (3) в уравнение (4), выражение для максимальной глубины проникновения шарика можно записать в виде [13]

$$Z_{\max} = \int_0^T u dt = \int_0^{u_0} \frac{mu}{A\sigma_y + \rho_t Au^2} du = \frac{m}{4A\rho_t} \ln \left(1 + \frac{\rho_t u_0^2}{\sigma_y} \right), \quad (5)$$

где u_0 — начальная скорость шарика, которую при ИНЛУВ можно определить следующим образом [13]:

$$u_0 = \sqrt{\frac{8E}{\pi d^2} \left(\frac{1}{3} + \frac{\rho_f}{h\rho_b} \right)^{-\frac{1}{2}}}, \quad (6)$$

где ρ_f — плотность наночастицы; ρ_b — плотность подложки; h — отношение толщины поглощающего слоя к толщине слоя наночастиц; E — энергия лазерного импульса; d — диаметр лазерного пятна.

Подставив уравнение (6) в уравнение (5), получаем максимальную теоретическую глубину проникновения наночастицы, имплантированной в алюминиевый сплав АД1 при ИНЛУВ-1:

$$Z_{1,\max} = \frac{m}{4A\rho_t} \ln \left[1 + \frac{8E\rho_t}{\pi d^2 \sigma_y} \left(\frac{1}{3} + \frac{\rho_f}{h\rho_b} \right)^{-\frac{1}{2}} \right]. \quad (7)$$

Необходимые для вычисления параметры и их значения приведены в табл. 4. Теоретически максимальная глубина проникновения наночастиц в режиме ИНЛУВ-1 получается приблизительно 3.15 мкм.

Таблица 4. Параметры, их обозначения, единицы измерения и соответствующие значения во время имплантация WC-наночастиц в алюминий АД1

Параметры, обозначения, единицы измерения	Значение
Плотность наночастицы WC ρ_{WC} , г/см ³	15.63
Высота цилиндра l , нм	100
Плотность сплава АД1 $\rho_{АД}$, г/см ³	2.7
Энергия импульса E , Дж	6, 9, 12
Динамический предел текучести сплава АД1 σ_y , МПа	600
Диаметр лазерного пятна d , мм	3
Отношение толщины поглощающего слоя к толщине слоя наночастиц h	4

В экспериментальных исследованиях, проведенных в работе [7], наночастицы WC размером 100–500 нм имплантировали в поверхностный слой алюминиевого сплава АД1с помощью ЛУВ. Результаты показали, что глубина имплантации наночастиц WC в алюминиевый сплав АД1 составляет около 3 мкм. Таким образом, максимальная теоретическая глубина проникновения наночастицы в алюминиевый сплав АД1, полученные нами расчетным путем, хорошо согласуется с экспериментальным значением, что подтверждает достоверность разработанных конечно-элементной и аналитической моделей при режиме ИНЛУВ-1.

Режим ИНЛУВ-2. После ИНЛУВ-1 в алюминиевый сплав АД1 крупные зерна поверхностного слоя измельчаются, и, соответственно, динамический предел текучести увеличился. Динамический предел текучести подложки σ_y при ИНЛУВ можно определить следующим образом [13]:

$$\sigma_y = \frac{1}{2} \frac{\rho_t v_t u_0^2}{\exp\left(\frac{3}{2} \rho_t v_t \frac{b}{d \rho_q} - 1\right)}, \quad (8)$$

где ρ_t — плотность подложки; v_t — коэффициент Пуассона подложки; ρ_q — плотность шарика; u_0 — скорость проникновения; b — толщина подложки; d — диаметр шарика. В случае когда толщина подложки значительно больше диаметра шарика, формула заметно упрощается:

$$\sigma_y = \frac{\rho_t v_t u_0}{2}. \quad (9)$$

При ИНЛУВ-2 глубину проникновения имплантированной наночастицы можно определить из уравнения [14]

$$Z_{2, \max} = \frac{\rho_f l}{4 \rho_t} \ln \left[1 + \frac{8k}{3 v_t} \left(\frac{1}{3} + \frac{\rho_f}{h \rho_b} \right)^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{8E}{\pi d^2}} \right]. \quad (10)$$

Суммарную глубину проникновения WC-наночастицы в сплав АД1 при двукратном лазерном воздействии можно определить следующим образом:

$$Z = Z_{1, \max} + Z_{2, \max}. \quad (11)$$

Подставив все параметры в уравнение (11), получим, что общая глубина проникновения наночастиц WC в алюминиевый сплав АД1 при ЛУВИН-2 составляет примерно 5.32 мкм. В экспериментальных исследованиях [7] глубина имплантации наночастиц WC в алюминиевый сплав АД1 в режиме ЛУВИН-2 составляет около 5.11 мкм. Таким образом, расчетное значение глубины имплантации достаточно хорошо согласуется с экспериментальным значением, что подтверждает достоверность разработанных конечно-элементной и аналитической моделей и при режиме ИНЛУВ-2.

Выводы. Разработаны конечно-элементное и аналитические модели для определения глубины имплантации наночастиц в алюминиевую подложку при ИНЛУВ. Изучены 2 режима: однократное применение технологии ИНЛУВ (режим ИНЛУВ-1), и последовательное двукратное применение ИНЛУВ (режим ИНЛУВ-2). Показано, что глубина имплантации наночастиц при ИНЛУВ постепенно увеличивается как с увеличением энергии лазерного импульса, так и количества лазерных импульсов.

Показано, что рассчитанные с помощью МКЭ и аналитической моделью глубины имплантации наночастиц хорошо согласуются с экспериментальными данными как при ИНЛУВ-1, так и ИНЛУВ-2, что подтверждает достоверность разработанных моделей глубин имплантации.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания, шифр научной темы FFGU-2024-0019.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zeng L. J., Wang Y., Wang. H. et al. Numerical and experimental investigation on temperature distribution of the discontinuous welding // Comput. Mater. Sci. 2009. V. 44. P. 1153.
2. Ferkel H., Mordike B. L. Magnesium strengthened by SiC nanoparticles // Mater. Sci. Eng. 2001. V. 298. P. 193.
3. Yilbas B. S., Arif A. F. Laser shock processing of aluminum: model and experimental study // J. Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 6740.
4. Sakhvadze G. Zh. Use of laser shock hardening technology to improve the corrosion resistance of magnesium alloy implants // J. Mach. Manuf. Reliab. 2023. V. 52 (8). P. 895.
5. Sakhvadze G. Zh., Sakhvadze G. G. Combined model based on the finite element method and artificial neural networks for modeling laser shock peening of titanium–niobium implants // J. Mach. Manuf. Reliab. 2023. V. 52 (7). P. 741.
6. Molian P., Moliaa R., Nair R. Laser shock wave consolidation of nanodiamond powders on aluminum 319 // Appl. Surf. Sci. 2009. V. 255. P. 3859.
7. Lu L., Huang T., Zhong M. L. WC nano-particle surface injection via laser shock peening onto 5A06 aluminum alloy // Surf. Coating. Technol. 2012. V. 206 (22). P. 4525.
8. Cui C. Y., Cui X. G., Zhao Q. Simulation, microstructure and microhardness of the nano-SiC coating formed on Al surface via laser shock processing // Mater. Des. 2014. V. 62. P. 217.
9. Cui C. Y., Cui X. G., Li X. D. et al. Plastic-deformation-driven SiC nanoparticle implantation in an Al surface by laser shock wave: mechanical properties, micro structure characteristics, and synergistic strengthening mechanisms // Int. J. Plast. 2018. V. 102. P. 83.
10. Shypylenko A. V., Pshyk B., Crzeskowiak K. et al. Effect of ion implantation on the physical and mechanical properties of Ti-Si-N multifunctional coatings for biomedical applications // Mater. Des. 2016. V. 110. P. 821.
11. Lu L. Research on Micro-nano Particles Surface Injection via Laser Shock Peening Technology. Tsinghua University Doctoral Dissertation. Beijing. 2013. 147 p.
12. Ye C., Suslov S., Kim B. J. et al. Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening // Acta Mater. 2011. V. 59. P. 1014.

-
13. *Jia G. H., Sun X. Q., Pei S. X.* Critical penetration velocity and dynamic yield strength of target material // *J. Ballist.* 1998. V. 4. P. 46.
 14. *Ren X. D., Zhang Y. K., Yongzhuo H. F. et al.* Effect of laser shock processing on the fatigue crack initiation and propagation of 7050-T7451 aluminum alloy // *Mater. Sci. Eng.* 2011. V. A 528. P. 2899.